



PAJUARVOKETJUISTA
UUTTA LIIKETOIMINTAA

PAJUN KÄYTTÖ BIOHIILEN VALMISTUKSESSA

Kirjallisuuskatsaus

Katri Juva

2026



Sisällysluettelo

1	Johdanto	2
2	Pajubiohiilen tuotanto	3
2.1	Pyrolyysiprosessi ja reaktiotuotteet	3
2.2	Pajun korjuu ja kuivaus ennen pyrolyysia	4
2.3	Hidaspyrolyysiteknologia	5
2.4	Pajubiohiilen tuotannon konsepteja ja soveltuvia laitteistoja	6
3	Pajupohjaisen biohiilen ominaisuudet ja käyttökohteet	8
3.1	Maaperäkäyttö	9
3.1.1	Maanparannuskäyttö	9
3.1.2	Vesien suodatusratkaisut ja -rakenteet	11
3.2	Tekninen käyttö	12
3.3	Pajubiohiili ilmastoratkaisuna	13
4	Pajupohjaisen pyrolyysinesteen käyttömahdollisuudet ja siihen liittyvä lainsäädäntö	15
4.1	Tervajae	15
4.2	Etikkahappopitoinen jae	16
4.3	REACH-asetus	18
4.4	Kasvinsuojelulainlainsäädäntö.....	20
4.5	Lannoitelainsäädäntö	20
4.6	CLP-asetus ja laki vaarallisten aineiden kuljetuksesta	21
5	Pajupohjaisen biohiilen arvoketjut	21
6	Biohiilen markkina ja pajupohjainen biohiili liiketoiminnassa	22
7	Pohdinta ja yhteenveto	23
8	Lähteet.....	25

1 Johdanto

Paju on Pohjois-Euroopan nopeimmin kasvava puulaji. Lyhytkiertoinen pajuviljelmä voi tuottaa suuria määriä tasalaatuista puuainesta lyhyessä ajassa, minkä vuoksi sillä on nähty potentiaalia esimerkiksi energiapuuna. Pajun ominaisuudet tekevät siitä potentiaalisen raaka-aineen myös korkeamman jalostusasteen biopohjaisiin tuotteisiin ja pajun viljelyä onkin viime vuosina tarkasteltu uudesta biokiertoalouden näkökulmasta. Yksi lupaavista mahdollisuuksista on pajun hyödyntäminen biohiilen raaka-aineena. (1)

Biohiileen on viime vuosina kohdistunut paljon mielenkiintoa ja suuria odotuksia johtuen erityisesti biohiilen mahdollisuuksista ilmastomuutoksen hillinnässä. Biohiili hillitsee ilmastomuutosta vaikuttamalla biomassan sisältämän hiilen kiertoon. Normaalisti biomassassa ei toimi pitkäaikaisena hiilivarastona, sillä luonnossa hajotessaan tai poltettaessa se vapauttaa hiilidioksidia ilmakehään. Biohiilen valmistuksessa noin puolet biomassan sisältämästä hiilestä sitoutuu biohiileen, ja maanparannuksessa käytettynä tämä hiili voi säilyä maaperässä satoja tai jopa tuhansia vuosia.

Toinen biohiilen erityisominaisuus on sen erittäin huokoinen rakenne. Biohiilen huokokset varastoivat sekä kuljettavat nesteitä sekä suodattavat erilaisia yhdisteitä. Nämä ovat tärkeitä ominaisuuksia biohiilen maaperäkäytössä. Maaperäkäytön lisäksi biohiilelle on löydetty monia muitakin käyttösovelluksia uusiutumattomien raaka-aineiden korvaajana mm. kaasujen ja vesien suodatuksessa, eläinten ruokinnassa, metalliteollisuudessa ja rakennusteollisuudessa.

Monenlaiset biomassat soveltuvat biohiilen raaka-aineeksi, mutta käytettävän biomassan laatu vaikuttaa olennaisesti biohiilen ominaisuuksiin, ilmastovaikutukseen sekä käyttösovelluksiin. Pajupohjaisesta biohiilestä on julkaistu Suomessa useita tutkimusartikkeleita ja paju on biohiilitutkimuksessa nähty potentiaalisenä biohiilen raaka-aineena. Pajun korkean biomassatuotoksen vuoksi ammattimainen pajunviljely voisi tuottaa runsaasti tasalaatuista raaka-ainetta biohiilituotantoon (2). Lisäksi paju on huokoinen puulaji ja sen huokoinen rakenne näkyy myös pajusta valmistetun biohiilen rakenteessa. Pajubiohiilen huokokset ovat suuria ja tästä ominaisuudesta on todettu olevan hyötyä ainakin maanparannus- ja kasvualustakäytössä. (1)

Tähän kirjallisuuskatsaukseen on koottu tutkimustietoa pajupohjaisen biohiilen valmistusprosessista, ominaisuuksista ja käyttömahdollisuuksista sekä tietoa pajubiohiilen roolista biohiilialan liiketoiminnassa. Kirjallisuuskatsaus on kooste tämän hetken tilanteesta ja tutkimustiedosta. Koska biohiileen kohdistuu suurta mielenkiintoa, on oletettavaa, että ala kehittyy edelleen nopeasti, ja näkymä biohiilen mahdollisuuksiin saattaa lähivuosina muuttua.

Biohiilituotannon sivutuotteena muodostuvan pyrolyysinesteen kaupallisella hyödyntämisellä on nähty olevan tärkeä merkitys biohiilituotannon kannattavuudelle. Pyrolyysinesteen kaupallistaminen on lainsäädännöllisistä syistä ollut haastavaa. Tässä katsauksessa nostetaan esiin myös pyrolyysinesteen kaupallisen hyödyntämisen tilanne lainsäädännön näkökulmasta sekä käydään läpi tutkimustietoa pyrolyysinesteen ominaisuuksista ja mahdollisista käyttösovelluksista.

Kirjallisuuskatsauksen aineistona on hyödynnetty verkossa vapaasti saatavilla olevia lähteitä, kuten tutkimusartikkeleita ja -raportteja, opinnäytetöitä, hankejulkaisuja sekä biohiilialan toimijoiden verkkosivustoja ja ajankohtaista uutisointia. Katsaus on laadittu osana Pajuarvoketjuista uutta liiketoimintaa -hanketta, ja sen tavoitteena on koota taustatietoa hankkeessa kehitettävän, pajubiohiilen tuottamiseen keskittyvän liiketoimintamallin tueksi.

Pajuarvoketjuista uutta liiketoimintaa -hanke on Euroopan unionin osarahoittama. Rahoituksen on myöntänyt Satakuntaliitto. Hankkeen toteuttaja on Satafood Kehittämisyhdistys ry.

2 Pajubiohiilen tuotanto

Biohiiltä voidaan valmistaa hyvin monenlaisista biomassoista pyrolyysin avulla, mutta käytännössä markkinoilla olevat biohiilet ovat valtaosin puupohjaisia. Yleisimmin raaka-aineena hyödynnetään metsätalouden sivuvirtoja ja kierrätyspuuta, sillä niiden saatavuus on hyvä ja ne muodostavat melko tasalaatuisen raaka-ainepohjan. Myös viljelypaju soveltuu ominaisuuksiensa puolesta erinomaisesti biohiilen raaka-aineeksi. Pajuviljelmillä on potentiaalia tuottaa runsaasti tasalaatuista, puupohjaista biomassaa, josta on mahdollista valmistaa moniin käyttötarkoituksiin soveltuvaa tasalaatuista biohiiltä.

Pelkkä tasalaatuisen raaka-aineen saatavuus ei kuitenkaan vielä riitä biohiilituotannon käynnistämiseen. Biomassa on muokattava pyrolyysiin sopivaan muotoon. Muun muassa biomassan kosteus ja palakoko vaikuttavat pyrolyysin onnistumiseen ja lopputuotteen laatuun. Lisäksi tarvitaan biohiilen tuotantokonseptiin soveltuva pyrolyysilaitteisto. Pyrolyysilaitteistoja löytyy markkinoilta eri kokoluokissa sekä siirrettävinä että kiinteinä ratkaisuin.

Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan näitä pajubiohiilen tuotantoketjuun liittyviä prosesseja ja teknologiaa. Luvuissa käydään läpi pajubiomassan korjuu ja biomassan prosessoinnin tarpeet ennen pyrolyysia sekä pajubiohiilen tuotantoon soveltuvia teknologisia ratkaisuja. Lisäksi tarkastellaan lyhyesti itse pyrolyysiprosessia ja sen termokemiallisia periaatteita.

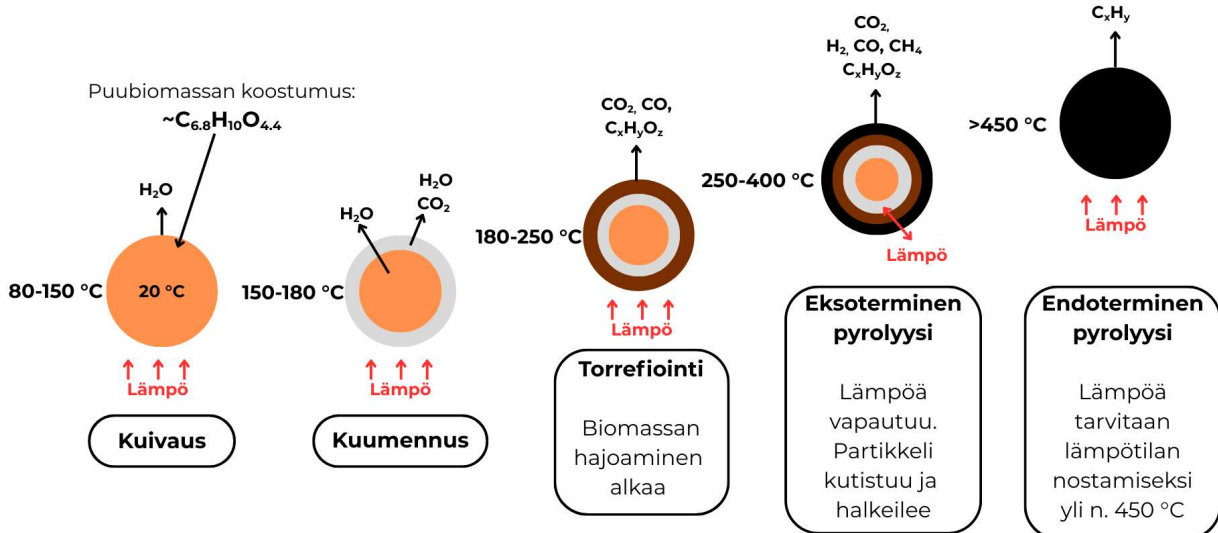


Kuva 1. Biohiileksi 680 C-asteessa pyrolysoitua pajua, XAMKin Biosampo-tutkimuslaboratorio, Kouvolassa 26.3.2025

2.1 Pyrolyysiprosessi ja reaktiotuotteet

Biohiilen valmistusprosessia kutsutaan pyrolyysiksi. Pyrolyysi on termokemiallinen prosessi, jossa biomassaa kuumennetaan hapettomissa tai vähähappisissa olosuhteissa, jolloin biomassa hiiltyy. Pyrolyysissa biomassan ketjumaiset hiiliyhdisteet muuntuvat aromaattisiksi eli rengasrakenteisiksi hiiliyhdisteiksi, jotka ovat erittäin pysyviä verrattuna hiiliketjuihin. Biohiilen valmistuksessa biomassaa

kuumennetaan tyypillisesti noin 300–700 °C lämpötilaan (3). Pyrolysoituminen alkaa jo noin 250 °C lämpötilassa, mutta varsinainen karbonisaatio, joka tuottaa runsashiilistä biohiiltä alkaa vasta n400 °C:ssa (kuva 1) (4).



Kuva 2. Pyrolyysiprosessin eri vaiheet puuaineksen sisällä: 1) Kuivaus, 2) Kuumennus, 3) Torrefiointi, 4) Eksoterminen (lämpöä vapauttava) pyrolyysi ja 5) Endoterminen (lämpöä vaativa) pyrolyysi. Pyrolyysin edetessä kuivauksesta kuumennukseen ja edelleen seuraaviin vaiheisiin, biomassa alkaa hajota. Hajoavasta biomassasta vapautuu ensin yksinkertaisia kaasuja (vesihöyryä ja hiilidioksidia) ja lämpötilan noustessa molekyyliarakeeltaan monimutkaisempia yhdisteitä, kuten öljyhiilivetyjä. Lämpöä vapauttavan, eksotermisen pyrolyysin alkaessa pyrolyysilämpöä siirtyy biomassan ”eksotermiseen vyöhykkeeseen” sekä sieltä ulospäin, ja pyrolyysi etenee vähitellen syvemmälle biomassaan. Mukailten Joseph&Taylor 2024 (4).

Pyrolyysiprosessissa syntyy biohiilen lisäksi pyrolyysinestettä sekä pyrolyysikaasua. Kaasu- ja nestefraktioiden osuuksiin vaikuttaa mm. pyrolyysilämpötila, kuumennusnopeus sekä raaka-aine (5). Biohiilen valmistukseen tähtäävässä pyrolyysiprosessissa biomassa kuumennetaan hitaasti, jolloin reaktiotuotteina saadaan karkeasti noin kolmasosa kiinteää biohiiltä, kolmasosa pyrolyysinestettä ja kolmasosa pyrolyysikaasua (6). Tekniikkaa kutsutaan hidasperäiseksi. Pyrolyysineste koostuu tervamaisesta, veteen liukenemattomasta osasta sekä vesiliukoisesta, etikkahappopitoisesta osasta (7). Pyrolyysikaasu koostuu mm. hiilidioksidista, hiilimonoksidista (häkä), metaanista, etaanista ja etyleenistä (6).

2.2 Pajun korjuu ja kuivaus ennen pyrolyysia

Pyrolysoitavan biomassan tulisi olla melko kuivaa, jotta energiaa ei tarvitse käyttää veden haihduttamiseen ja pyrolyysin tuottama lämpö riittää materiaalin hiilettämiseen. Liian märkä raaka-aine myös heikentää biohiilen laatua (4). Ruokamo & Punttila (2025) esittävät, että pyrolysoitavalle pajulle sopiva kosteuspitoisuus olisi noin 10-20 % (8).

Biohiilen valmistukseen tarkoitetut pajut kannattaa korjata mahdollisimman kuivana eli kevättalvella, kun maa on roudassa ja hanki painunut ainakin sen verran, että koneellinen niitto onnistuu (9). Paju ei tässäkin vaiheessa ole riittävän kuivaa pyrolyysiprosessia ajatellen. Basun mukaan biomassan

tuorekosteus on tavallisesti välillä 30–60 % (10). Myös BioCarbonValue-hankkeen testausten perusteella keväälläkin korjatusta pajusta valmistetun hakkeen kosteus oli luokkaa 60 %. Hankkeen testeissä em. kosteudessa olevaa pajuhaketta kuivattiin puristamalla, mutta tällä menetelmällä hakkeesta ei saatu riittävän kuivaa pyrolyysia ajatellen. Melko energiaintensiivisen mekaanisen puristuksen tavoitteena olikin erottaa pyrolyysiin menevästä hakkeesta nestefraktio sen mahdollista jatkojalostusta varten. (8) (11) Pajun nestefraktion sisältämät uuteaineet saattavat sisältää bioaktiivisia yhdisteitä ja muita arvokkaita ainesosia (11).

Toisessa BioCarbonValue-hankkeen testissä pajurunkoja kuivattiin huoneenlämmössä, jonka jälkeen ne murskattiin pieneksi 6 mm matriisiksi pelletöintiä varten ja näin päästiin 11 paino-%:n kosteuteen (8). Pajun luonnollisella varastokasoissa tapahtuvalla kuivauksella on joidenkin tutkimusten varastointikokeissa päästy 26 % vesipitoisuuteen (12). Kuivausta voidaan luontaisen kuivauksen jälkeen jatkaa keinotekoisesti tarvittaessa. Keinotekoisien kuivauksen keskimääräiseksi lämmön- ja sähkönkulutukseksi on arvioitu 1,251 kWh (lämpö) ja 0,070 kWh (sähkö) poistettua vesikiloa kohden (2).

Edellä esitettyjen tulosten perusteella voidaan sanoa, että energiatehokasta prosessia tavoiteltaessa biohiilen raaka-aineeksi tuotettavat pajut kannattaa korjata kevättalvella kokonaisina runkoina ja kuivata niitä varastokasoissa mahdollisimman kuivissa olosuhteissa. Mikäli kuivaukseen on käytettävissä esimerkiksi jonkinlaista hukkalämpöä, kannattaisi tätä pyrkiä hyödyntämään termisessä kuivauksessa. Yksi mahdollisuus olisi hyödyntää pyrolyysikaasuista tuotettua lämpöä märkien syötteiden kuivaamisessa esimerkiksi kesäaikana, kun pyrolyysissa muodostuvalle ylijäämälämmölle ei muuten ole tarvetta. Pihlaja (2025) käy erilaisia puuraaka-aineen termiseen kuivaukseen tarkoitettuja laitteistoja läpi opinnäytetyössään (13).

Pihlaja (2025) on opinnäytetyössään selvittänyt myös biohiilen valmistuksen puupohjaisen raaka-aineen sopivaa palakokoa haastatteleamalla suomalaisia biohiilialan asiantuntijoita ja toimijoita. Haastateltujen mukaan raaka-aineen palakoko asettaa vaatimuksia kuivaukselle ja käytettävä pyrolyysilaitteisto taas asettaa vaatimuksia palakoolle. Paras raaka-aineen palakoko biohiilen tuotantoprosessia ajatellen olisi haastatteluiden perusteella 20–30 mm. Energiapuun haketuksen tarkoitetuilla hakkureilla on mahdollista tuottaa tällaista melko tasakokoista fraktiota tehokkaasti. Palakoon pienentämiseen voidaan käyttää myös siirrettävää murskainta. Murskaimella ei saada yhtä tasakokoista palaa kuin hakkurilla. Haketun puun kohdalla haastatellut mainitsivat haasteeksi hakkeen seassa olevan hienoaineksen eli ns. nollajakeen, joka saattaa tehdä massasta liian tiivistä onnistuneeseen kuivaukseen ja pyrolyysiin. Tämän nollajakeen erottelu ja pelletöinti tunnistettiin mahdolliseksi jatkotutkimuskysymykseksi. (13)

2.3 Hidaspyrolyysiteknologia

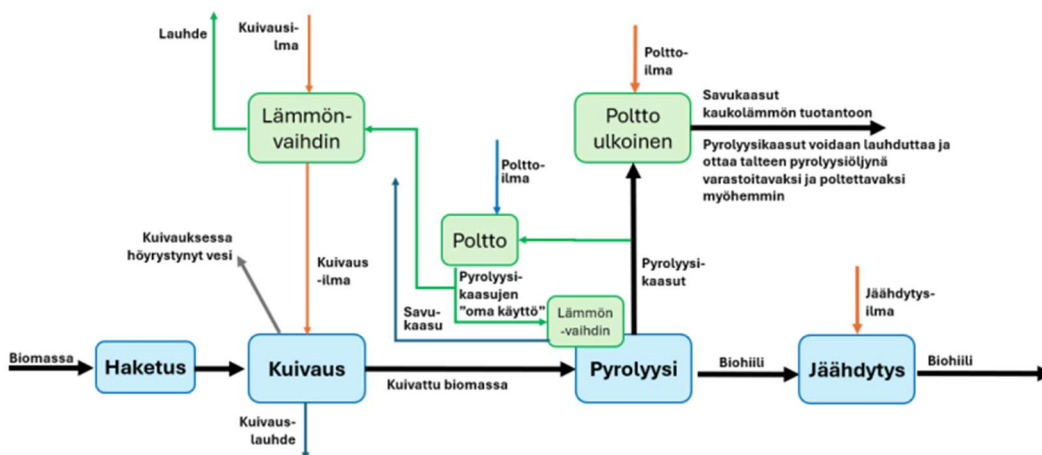
Hidaspyrolyysilaitteistoja on kehitetty monenlaisia pienimuotoisista tutkimus- ja pilottilaitteista aina teollisen mittakaavan yksiköihin. Laitteistoissa käytetyt tekniset ratkaisut vaihtelevat. Saatavilla on panostoimisia laitteistoja eli retortteja, joihin pyrolysoitava biomassapanos ladataan kerralla ja odotetaan, kunnes ladattu panos on pyrolysoitunut. (14) (15) Markkinoilla on myös jatkuvatoimisia laitteistoja. Jatkuvatoimisuus tarkoittaa, että biomassaa kulkee pyrolyysiprosessin läpi jatkuvana virtana esimerkiksi siirtoruuvien tai erilaisten melojen avulla tai painovoimaisesti. Pienemmän mittakaavan jatkuvatoimisissa hidaspyrolyysilaitteistoissa käytetään tyypillisesti siirtoruuveja. Suuremman mittakaavan biohiilituotannossa käytetään esimerkiksi rumpu- ja monikerrosuuneja.

Rumpu-uuneissa pyrolyysi tapahtuu pyörivässä putkessa. Monikerrosuuneissa biomassa kulkee hiljalleen alaspäin pyörivien levyjen säädellässä biomassan etenemistä. (16) (17)

Useimmat suomalaiset biohiilialan yritykset ovat kehittäneet omaa teknologiaa ja laitteita biohiilen valmistukseen. Tällaisia toimijoita ovat ainakin Carbofex Oy (18), PUHI Oy (19), Carbo Culture Oy (20), Soilcare Oy (15) ja GRK Suomi Oy (21). Osa toimijoista myös myy kehittämänsä laiteteknologiaa. Markkinoilla toimii myös useita ulkomaisia laitevalmistajia, kuten esimerkiksi Pyreg GmbH (22) ja BioMacon GmbH (23).

Biohiililaitteistot hyödyntävät tyypillisesti pyrolyysin sivutuotteena muodostuvaa pyrolyysikaasua energiantuotantoon. Pyrolyysissä muodostuva pyrolyysikaasu on energiapitoista ja sitä voidaan polttaa erillisessä jälkipolttimessa prosessin vaatimaa lämmöntuotantoa varten. Näin pyrolyysiprosessi voidaan tehdä energiaomavaraiseksi. Pyrolyysikaasujen polttamisesta syntyy myös ylijäämlämpöä, joka voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämmön tuotannossa, rakennusten lämmityksessä tai kosteiden pyrolyysisyötteiden kuivauksessa. Pyrolyysikaasujen hyödyntämistä on havainnollistettu alla olevassa kaaviossa (kuva 3, (24)).

Osa pyrolyysilaitteistoista ottaa talteen myös pyrolyysinesteet ja osa taas polttaa myös nämä jakeet. Pyrolyysinesteen käyttömahdollisuuksista on kerrottu tarkemmin luvussa 4 *Pajupohjaisen pyrolyysinesteen käyttömahdollisuudet ja siihen liittyvä lainsäädäntö*.



Kuva 3. Puupohjaisen biohiilen valmistusta kuvaava prosessikaavio, jossa on esitetty myös pyrolyysikaasujen hyödyntäminen kosteiden syötteiden kuivaukseen sekä kaukolämmön tuotantoon. Kuvan lähde: Salo ym. (2025), (24).

2.4 Pajubiohiilen tuotannon konsepteja ja soveltuvia laitteistoja

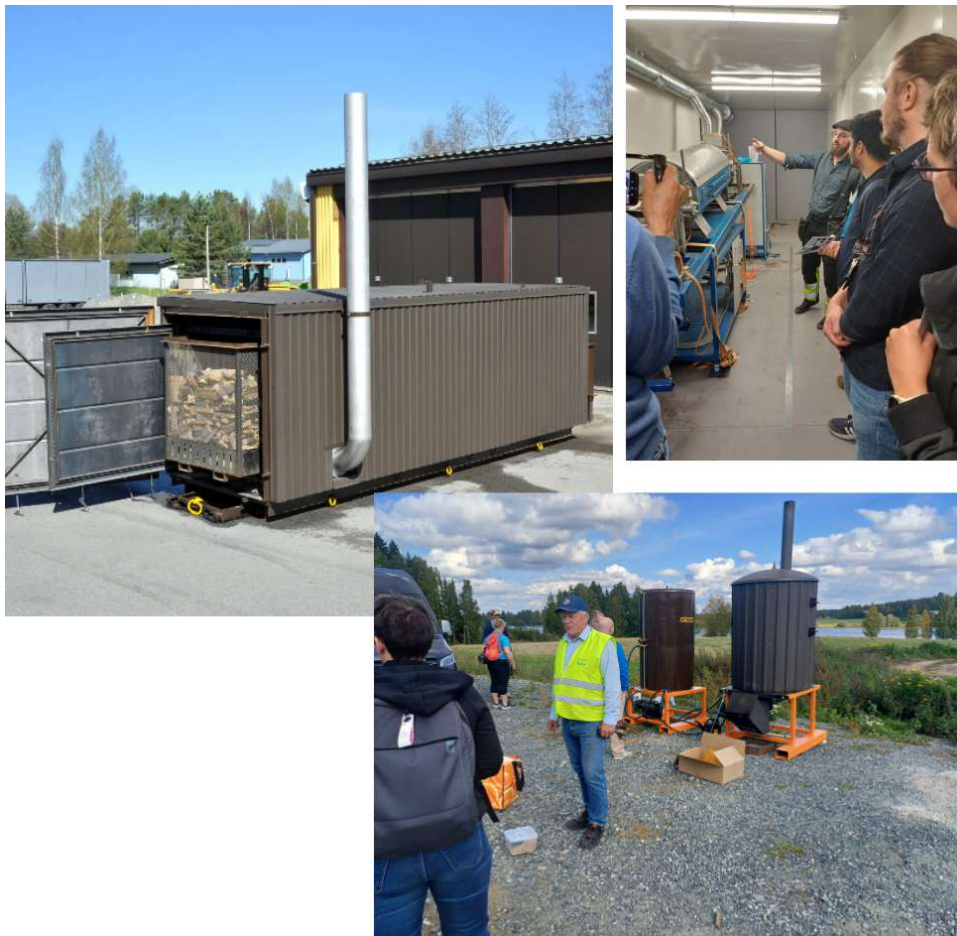
2020-luvun taitteessa Suomeen oli suunnitteilla pajun viljelyn keskittymiä biohiilituotannon tarpeisiin. Carbons Finland Oy:n Markku Suutarin mukaan lähellä toisiaan sijaitsevat, yhteensä 2 000 hehtaarin pajuviiljelmat tuottaisivat riittävästi materiaalia yhdelle siirrettävälle pyrolyysilaitteistolle. (25) Tähän tarkoitukseen soveltuvia, siirrettäviä laitteistoja ovat kehittäneet Suomessa ainakin Soilcare Oy ja Raussin Metallit Oy. (25), (26) Siirrettävien laitteistojen kohdalla on huomioitava, että pyrolyysiprosessin ylijäämlämmön hyödyntäminen ei ole välttämättä mahdollista. Kuitenkin ainakin Soilcaren siirrettävä Amacee 1700 -laitteisto voidaan liittää lämmöntuotantojärjestelmään. Laitteisto tuottaa yhdellä ajolla 5-5,5 m³ biohiiltä (karkeasti 1-1,5 tonnia) ja yksi ajo kestää useamman tunnin.

Siirrettävät laitteistot ovat panostoimisia. Niiden etuna voidaan pitää raaka-aineen kuljetusmatkan minimointia. Toisaalta pajun viljelyn keskittymä voisi tuottaa riittävästi raaka-ainetta myös viljelykeskittymän lähelle sijoitettavalle kiinteälle pyrolyysilaitteistolle. Keskitetty biohiilituotanto

jatkuvatoimisella pyrolyysilaitteistolla helpottaisi tuotteen käsittelyä ja jatkojalostusta sekä varastointia. Keskitetyt laitokset mahdollistavat suuremman tuotantokapasiteetin kuin siirrettävät pyrolyysilaitteistot. Pienialaisempien, kauempana toisistaan sijaitsevien pajuviljelmien kohdalla siirrettävä laitteisto saattaisi olla tarkoituksenmukaisempi.

Esimerkkejä keskitetyistä, jatkuvatoimisista teollisen mittakaavan biohiililaitoksista ovat Utajärvellä sijaitseva GRK:n vuonna 2023 valmistunut biohiililaitos, jonka tuotantokapasiteetti on 3 000 tonnia vuodessa (27). Ylöjärvellä toimiva Carbofexin keskitetty biohiililaitos voi tuottaa 1 000 tonnia biohiiltä vuodessa (18). Karelian Pajun vuonna 2025 valmistuneen teollisen mittakaavan biohiililaitoksen tuotantokapasiteetti on 4600 t/vuosi (28) ja Hämeenlinnaan valmistunut PUHI Oy:n biohiililaitos tuottaisi täydessä toiminnassaan noin 7 000 tonnia biohiiltä vuodessa (29).

Saksalaiset Pyreg GmbH ja Biomacon GmbH valmistavat eri kokoisia jatkuvatoimisia pyrolyysilaitteistoja, jotka tuottavat biohiilen lisäksi lämpöä. Molemmilla valmistajilla on tarjolla lämmön- ja biohiilen tuotantokapasiteetiltaan eri kokoisia laitteistoja. Pyregin laitteistojen biohiilen tuotantokapasiteetti on 300-3 600 tonnia biohiiltä vuodessa (22). BioMaconin laitteistot tuottavat noin 20 – 100 kg biohiiltä tunnissa (23). 8 000 vuosittaisella käyttötunnilla laskettuna tämä vastaa noin 150 – 800 tonnin vuosituotantoa. Pyregin ja BioMaconin ilmoittamien tietojen mukaan vaadittavan biomassan määrä on noin 3,6-5 kertainen tuotettavan biohiilen määrään nähden (22) (23).



Kuva 4. Kuvia erityyppisistä biohiilen tuotantolaitoksista. Vasemmalla ylhäällä siirrettävä Soilcare Oy:n valmistama panostoiminen Amacee 1700 -laitteisto (kuvan lähde: (30)). Vasemmalla ylhäällä PUHI Oy:n jatkuvatoiminen demo-/tutkimustarkoitukseen valmistettu biohiililaitteisto ja oikealla alhaalla Tuomo Leppänen esittelee Soilcaren pienempiä siirrettäviä panostoimisia laitteistoja (Kuvat: Katri Juva).

3 Pajupohjaisen biohiilen ominaisuudet ja käyttökohteet

Biohiilen kemialliset ominaisuudet vaihtelevat raaka-aineen, prosessointiteknologian ja käytettyjen prosessiolosuhteiden mukaan. Kemialliselta koostumukseltaan biohiili on aina suurimmaksi osaksi hiiltä. Se sisältää myös jonkin verran happea ja vetyä, vaikkakin pääosa näistä alkuaineista kaasuuntuu pyrolyysissa. Biohiileen jää tuhkana raaka-aineesta peräisin olevia muita alkuaineita, kuten ravinteita ja raskasmetalleja, jotka eivät kaasuunnu pyrolyysissa.

Pajusta 500 °C:n, 700 °C:n ja 900 °C:n lämpötiloissa valmistetun biohiilen hiilipitoisuus oli VTT:n tutkimuksen mukaan (Siipola ym. 2025) korkea, n. 90 %, ja tuhkapitoisuus alhainen, alle 5 %, verrattuna oljesta, kauran kuorista sekä ruokohelvestä valmistetun biohiilen vastaaviin (11). Korkea hiilipitoisuus parantaa biohiilen kemiallista pysyvyyttä. Korkea hiilipitoisuus ja alhainen tuhkapitoisuus ovat tyypillisiä ominaisuuksia ligniinipitoisista, puupohjaisista raaka-aineista valmistetuille biohiilille.

Huokoinen rakenne on yksi biohiilen tärkeimmistä ominaisuuksista. Maanparannuskäytössä biohiilen huokokset varastoivat vettä ja veteen liuenneita ravinteita ja voivat luovuttaa niitä hitaasti kasvien käyttöön. Lisäksi biohiilen huokospinnat adsorboivat erilaisia yhdisteitä, kuten esimerkiksi ravinteita ja joitakin haitta-aineita. Tätä ominaisuutta voidaan hyödyntää, kun halutaan suodattaa ravinteita tai haitta-aineita vesistä. (1)

Biohiilen huokoisuutta kuvataan yleisesti sekä huokostilavuuden osuutena massasta (%) että huokosten ominaispinta-alana (m^2/g), jota mitataan BET-menetelmällä. Usein puhutaan BET-ominaispinta-alasta. BET-ominaispinta-alan mittaamenetelmä perustuu inertin kaasun, kuten typen, adsorption mittaamiseen materiaalin pinnalla, jolloin voidaan laskea huokospintojen pinta-ala massa-yksikköä kohti, m^2/g . Huokosten ominaispinta-alaa on pidetty tärkeänä biohiilen laatua ja huokoisuutta kuvaavana muuttujana ja hyvälaatuisen biohiilen ominaispinta-alaksi on usein mainittu yli 200 m^2/g (31) (32). BET-ominaispinta-ala ei kuitenkaan kerro biohiilen huokosten kokojakaumasta, joka myös vaikuttaa biohiilen toimivuuteen erilaisissa käyttösovelluksissa. Huokosten kokojakaumaa voidaan tutkia 3D-kuvantamisen avulla. (33)

Biohiilessä on karkeasti ottaen kahden kokoluokan huokosia: suurempia mikrometriluokan huokosia eli ns. makrohuokosia ja pienempiä nanometrikokoluokan huokosia. Mikrometri on millimetrin tuhannesosa, ja nanometri on millimetrin miljoonasosa. (1) Biohiilen makrohuokosten osuutta määrittää pitkälti raaka-aineena käytetyn biomassan alkuperäinen huokosrakenne. Pajun puuaine on huokoista, ja huokosrakenteen suuret, yhtenäiset putkilomaiset huokokset näkyvät suurempina, jatkuvina huokosina myös pajusta valmistetussa biohiilessä. Pajubiohiilessä makrohuokokset ovat siis vallitsevia. Pienempiä, nanometriluokan huokosia ei ole merkittävästi, jolloin pajubiohiilen BET-pinta-ala voi jäädä alhaiseksi (34), (35).

Pajubiohiilen makrohuokosilla on merkitystä biohiilen vesitalousvaikutuksissa: Kasvien juuret pystyvät hyödyntämään nimenomaan makrohuokosissa olevaa vettä. Lisäksi 3D-kuvantamistutkimuksissa on selvinnyt, että pajubiohiilen huokokset ovat putkilomaisia ja jatkuvia, ja tämä ominaisuus tekee pajubiohiilestä toimivan maaperässä ja kasvualustoissa vedenjohtavuuden ja vedenpidätyskyvyn säätelyssä. (33) (35)

Pajubiohiilen käyttökohteet on tässä luvussa karkeasti jaettu maaperäkäyttökohteisiin ja teknisiin käyttökohteisiin. Maaperäkäytöllä tarkoitetaan tässä sovelluksia, joissa biohiiltä käytetään maanparannusaineena tai biosuodatinmateriaalina tai kohteissa, joista biohiili lopulta yleensä päätyy

maaperään. Teknisellä käytöllä tarkoitetaan sovelluksia, joissa biohiiltä käytetään teollisissa prosesseissa eikä se välttämättä päädy maaperään.

3.1 Maaperäkäyttö

Pajusta voidaan monien muiden puupohjaisten biomassojen tapaan tuottaa ominaisuuksiltaan maaperäkäytön eri sovelluksiin sopivia biohiiliä esimerkiksi pyrolyysilämpötilaa muuttamalla. Matalan lämpötilan ($\leq 550\text{ °C}$) pehmythiilet sitovat ravinteita ja soveltuvat parhaiten kompostin ja lietteen sekaan sekä suoraan pellolle levitettäväksi. Korkean lämpötilan ($\geq 550\text{ °C}$) kovahiilet taas ovat huokoisempia ja soveltuvat paremmin ympäristörakentamisen ja vesien biosuodatuksen sovelluksiin, joissa tarkoituksena on maaperän tai kasvualustan vedenpidätyskykyyn vaikuttaminen tai veteen liuenneiden yhdisteiden suodattaminen. Taulukko 1 kokoaa tietoa eri lämpötiloissa valmistetun puupohjaisen biohiilen soveltuvuudesta maaperäkäytön eri sovelluksiin. (36)

Taulukko 1. Eri lämpötiloissa valmistetun puupohjaisen biohiilen keskeisiä ominaisuuksia sekä tietoa hiiltien soveltuvuudesta maaperäkäyttöön. Mukailten Välinen & Tuohiniitty (2024) (36).

Hiiltämis- lämpötila	Keskeiset ominaisuudet	Soveltuvuus maaperäkäyttöön		
		Maatalous	Ympäristö- rakentaminen	Biosuodatus
$\leq 550\text{ °C}$ (pehmythiili)	<ul style="list-style-type: none"> Alhaisempi huokoisuus Runsaasti orgaanisia funktionaalisia ryhmiä Korkea kationinvaihtokapasiteetti Korkea tuhkapitoisuus 	<ul style="list-style-type: none"> Lannan, lietteen, kompostin ja biokaasurejektin sekaan Ravinnehävikin vähentämiseen Suoralevitys pellolle 	<ul style="list-style-type: none"> Kasvualustat, nurmikot, golfkentät, istutukset (ravinteiden sitominen) 	<ul style="list-style-type: none"> Ei suositeltu
$\geq 550\text{ °C}$ (kovahiili)	<ul style="list-style-type: none"> Korkea BET-huokoisuus Korkeampi adsorptiokyky Korkea vedensidontakyky Alhainen PAH-pitoisuus Korkeampi pisyvyys 	<ul style="list-style-type: none"> Lietelanta- altaiden kattamiseen ja kuivikkeisiin 	<ul style="list-style-type: none"> Kasvualustat (vesitalous) Hulevesi- ja muut vesien suodatusratkaisut Haitta-aineiden sitominen vesistä tai maaperästä 	<ul style="list-style-type: none"> Hule- ja muiden vesien biosuodatusrakenteet Eroosiosuojaus ja muut vesien-suojelulliset suojausrakenteet

3.1.1 Maanparannuskäyttö

Pajubiohiilen suurilla makrohuokosilla ja niiden jatkuvuudella on arvioitu olevan suuri merkitys biohiilen maanparannuskäytössä, koska kasvien juuret pystyvät käyttämään näissä huokosissa olevaa

vettä ja ravinteita. Pajupohjaista biohiiltä pidetäänkin lupaavana esimerkiksi maatalouden ja kasvualustakäytön sovelluksissa. (1) (33)

Biohiili on luonnostaan niukkaravintainen materiaali. Käsitlemättömän biohiilen maanparannusvaikutukset perustuvat ennen kaikkea sen suureen huokoisuuteen, ominaispinta-alaan ja huokospintojen funktionaalisiin ryhmiin, jotka vaikuttavat maaperän vedenpidätyskykyyn, rakenteeseen ja ravinteiden käyttäytymiseen. Karkearakeisissa maissa tällainen biohiili lisää maaperän veden varastointia ja kasvien kuivuudensietoa, kun taas savimaissa se voi kasvattaa juurille käyttökelpoisten huokosten määrää. (37) (35) Huokoisen rakenteensa ansiosta biohiili sitoo maaperästä liuenneita ravinteita, vapauttaa niitä hitaasti kasvien käyttöön ja vähentää ravinnevalumia tarjoten samalla elinympäristön maaperän mikrobeille (38) (37).

Biohiiltä voidaan myös rikastaa ravinteilla ennen sen maaperäkäyttöä (ns. lataus tai charging). Lataaminen parantaa biohiilen lannoitusvaikutusta. Ravinnekäsittely tehdään sekoittamalla biohiiltä ravinnerikkaaseen biomassaan, kuten kompostiin, lantaan tai lietteeseen tai vaikka biokaasulaitoksen mädätysjäännökseen. Suositusten mukaan biohiiltä on hyvä ladata noin 2-4 viikkoa ennen sen käyttöä. Biohiilen huokoiseen rakenteeseen sitoutuu lataamisen aikana ravinteita, jotka vapautuvat hitaasti kasvien käyttöön, jolloin ravinteiden huuhtoutuminen ja haihtuminen ilmaan vähenevät. (39) (36) (40)

Sekä lataamatonta että ladattua biohiiltä lisätään maaperään tai kasvualustoihin maanparannustarkoituksessa. Käyttökohteita löytyy maataloudesta, puutarhataloudesta, viherrakentamisesta, infrarakentamisesta sekä ympäristörakentamisesta. Maataloudessa lataamattoman biohiilen peltokäytöllä ei pohjoismaisissa tutkimuksissa ole saavutettu merkittäviä satovasteita (41).

Biohiilen lataaminen ravinteilla ennen sen käyttöä estää käsitlemättömän biohiilen maaperäkäyttöön liittyvän ilmiön, jossa biohiili välittömästi levityksen jälkeen sitoo maasta vettä ja ravinteita jopa hidastaen väliaikaisesti kasvien kasvua. Ravinnerikastuksella biohiilestä pyritään tekemään agronomisesti hyödyllisempi. (39) (36) Samoilla linjoilla on myös Carbons Finland Oy:n toimitusjohtaja Markku Suutari, joka Juho Heikarin (2025) opinnäytetyön haastattelussa on todennut, etteivät suurten biohiilimäärien kertaluontoiset peltolevytykset (5-20 t/ha) ole taloudellisesti kannattavia, vaan järkevämpää ja kannattavampaa olisi pienempien biohiilimäärien jatkuva lisäys esimerkiksi lannan tai lietteen seassa (42).

Biohiiltä voidaan maataloudessa käyttää myös rehun lisäaineena. Biohiili on EU:ssa hyväksytty rehun lisäaineeksi vuonna 2011. Tutkimusten mukaan lehmien rehun lisäaineena käytettynä biohiili parantaa ravinteiden sulavuutta, kasvua ja typen pidättymistä sekä vähentää metaanipäästöjä (43). Myös siipikarjan rehulisänä käytettynä biohiilellä on raportoitu olevan positiivisia vaikutuksia lintujen terveyteen ja kasvuun, vaikkakin artikkelissa todetaan, että systemaattisia tieteellisiä tutkimuksia rehulisän pitkäaikaisista vaikutuksista ei ole (44). Biohiilen myynti rehulisäaineeksi edellyttää rehulainsäädäntöön ja siihen liittyviin viranomaisvaatimuksiin ja standardeihin perehtymistä. Näistä löytyy tietoa Ruokaviraston verkkosivuilta (45). Rehulisäaineeksi tarkoitettu biohiili voidaan sertifioida esimerkiksi vapaaehtoisella eurooppalaisella biohiilisertifikaatilla EBC Feed. EBC Feed sertifikaatin mukaan rehulaatuisen biohiilen raaka-aineeksi soveltuvat kaikki kasviperäiset biomassat (46).

Biohiilen lisääminen biokaasuprosessiin parantaa joidenkin tutkimusten mukaan metaanintuottoa ja vakauttaa biokaasuprosessia erityisesti haastavissa olosuhteissa, kuten orgaanisen aineksen ylikuormitustilanteissa. Biokaasuprosessiin lisätty biohiili päätyisi ravinteilla latautuneena mädätteeseen ja sitä kautta maanparannukseen. Biokaasun ja biohiilen tuotannolle ja käytölle on löydetty monia muitakin, synergiaetuja, joista Mattila ym. (2025) kirjoittavat julkaisussaan.

Tutkimustietoa näistä synergioista on kuitenkin vielä rajallisesti ja se on osin ristiriitaista, mutta soveltavan tutkimuksen nähdään olevan avainasemassa kustannustehokkaiden kiertotalousratkaisujen löytämisessä. (40)

Esimerkki biohiilen käytöstä ympäristörakentamisessa on biohiilen käyttö kaivosalueiden ympäristöriskien hallinnassa. Luonnonvarakeskus ja GTK ovat kokeilleet purkupuupohjaisen biohiilen lisäämistä Kevitsan kaivoksen sivukivikasan moreenipeittoon. Koealoilla, joiden peittomateriaali sisälsi biohiiltä, kasvillisuus oli rehevämpää. Rehevä kasvillisuus ehkäisee veden ja lumen aiheuttamaa eroosiota, joka tuhoaa sulfidi- ja metallipitoisen sivukivikasan peittokerrosta. Lisäksi havaittiin, että biohiiltä sisältävillä alueilla kasvit eivät tarvitse syviä juuria. Syvät juuret peittokerroksessa ovat hankalia, koska ne avaavat vedelle väyliä, jolloin vesi pääsee reagoimaan kaivosjätteen kanssa. Suomesta löytyy paljon kaivosalueita, joiden sivukivi- ja rikastushiekka-alueiden aiheuttamiin ympäristöriskihin etsitään ratkaisuja. Biohiili nähdään potentiaalisena ratkaisuna, mutta haasteeksi voi muodostua biohiilen riittävyys ja logistiset haasteet. (47) (48) Paju ei kasva Lapissa, jossa on paljon kaivoksia, mutta mahdollisesti eteläisemmässä Suomessa sijaitsevien kaivosalueiden peittomateriaaleissa pajubiohiilellä voisi olla potentiaalia.

3.1.2 Vesien suodatusratkaisut ja -rakenteet

Biohiilen korkea huokoisuus ja sekä huokospintojen kyky adsorboida erilaisia yhdisteitä tekevät siitä toimivan suodatinmateriaalin. Biohiilen tiedetään suodattavan mm. ravinteita ja erilaisia haitta-aineita vesistä. Myös mikromuovien suodatuksesta on saatu lupaavia tuloksia (49) (50).

Gong ym. (2019) ovat havainneet, että ravinteet adsorboituvat tehokkaimmin biohiilen huokosiin, jotka ovat läpimitaltaan 0,6-2 nanometriä (51). Rasan ym. (2021) mukaan 500 °C:n lämpötilassa valmistetussa pajubiohiilessä tämän kokoluokan huokosten osuus on vähäinen (33). Rasan ym. tutkimuksissa 500 °C:ssa valmistetun pajubiohiilen huokosten pinta-alaa kuvaava BET-ominaispinta-ala jäi alle 10 m²/g, kun kaupallisissa suodatukseen tarkoitetuissa biohiilissä BET-ominaispinta-ala on yli 200 m²/g (31) (32) (35).

Biohiilessä esiintyvät makrohuokosia pienemmät, nanometriluokan huokokset ovat pitkälti pyrogeenisia, eli ne syntyvät pyrolyysiprosessin aikana, kun taas makrohuokokset heijastelevat raaka-aineen huokosrakennetta. Nanometrikokoluokan huokosten osuutta pajubiohiilessä voisikin mahdollisesti kasvattaa pyrolyysilämpötilaa nostamalla. Nanometrikokoluokan huokosia syntyy myös biohiilen aktivointiprosessissa. (1) (33) Pajubiohiilen huokosten ominaispinta-alaa ja nanometriluokan huokosten osuutta voidaan kasvattaa myös aktivoimalla biohiili esimerkiksi höyrykäsittelyllä tai kemiallisesti (11). Näin valmistetulla aktiivihiehellä on vesien suodatuksen ohella myös muita käyttömahdollisuuksia (kts. luku 3.2 Tekninen käyttö).

Aktivoimattoman pajubiohiilen suodatustehosta on saatu hyviä tuloksia esimerkiksi Ruotsissa. Pajubiohiilisuodattimen todettiin poistavan jätevedestä tehokkaasti fosfori- ja typpiyhdisteitä sekä orgaanista ainesta merkittävästi paremmin kuin kotitalouksien jätevesijärjestelmissä yleisesti käytettyjen hiekkasuodatinten. Puhdistusteho fosfaattifosforin osalta oli 89 % ja kokonaisfosforin osalta 86 %. Pajubiohiili nähtiin potentiaalisesti materiaaliksi jätevesisuodattimissa, mutta tutkimuksen mukaan biohiilisuodatinten pitkäaikaisesta toiminnasta tarvittaisiin vielä lisää tutkimusta. (52)

Helsingin Metsälään rakennettu hulevesien suodatusallas on yksi esimerkki biohiilen käytöstä hulevesien käsittelyratkaisuissa. Metsälän suodatus- ja viivytysaltaissa käsitellään alueelta kerättävät

hulevedet ennen niiden purkamista Haaganpuroon. Biohiili-murskesuodattimen on todettu poistavan hulevesistä fosforia, kiintoainesta, raskasmetalleja, öljyhiilivetyjä ja PAH-yhdisteitä. (53) Markkinoilla on myös biohiilisuodatinsäkkejä, jotka voidaan sijoittaa esimerkiksi kaivoihin tai ojiin poistamaan ravinteita ja haitta-aineita vesistä. Suodattimena käytetty biohiili voidaan käytön jälkeen hyödyntää maanparannuksessa. Kuitenkin, mikäli suodatetussa vedessä on ollut haitta-aineita, tulee ennen maaperäkäyttöä varmistaa, että haitta-ainepitoisuudet alittavat lannoitelainsäädännön mukaiset raja-arvot. (54) (36)

3.2 Tekninen käyttö

Pajubiohiilen soveltuvuutta aktiivihiiisovelluksiin, joissa tarvitaan suuren ominaispinta-alan ja korkean huokoisuuden omaavia hiiliä, on tutkittu BioCarbonValue-hankkeessa. Aktiivihiihen käyttökohteissa vaaditaan yleisesti ottaen korkeaa suodatustehoa ja hyvää puhdistustulosta. Aktiivihiihen käyttökohteita löytyy veden- ja jäteveden puhdistuksesta, kaasujen puhdistuksesta, metallien talteenotosta sekä elintarvike- ja lääketeollisuudesta korkeaa puhtausastetta vaativista prosesseista. Yleisimmin aktiivihiihen raaka-aineena käytetään fossiilista hiiltä tai kookospähkinän kuoria (24). Biohiilestä voidaan valmistaa aktiivihiihtä käyttämällä aktivoinnissa esimerkiksi vesihöyryä tai hiilidioksidilla. Aktivointi kasvattaa biohiilen ominaispinta-alaa ja huokoisuutta.

BioCarbonValue-hankkeessa pajuhakkeesta valmistettua biohiiltä aktivoitiin fysikaalisesti höyrykäsittelyllä ja saatiin aktiivihiihtä, jonka ominaispinta-ala oli kaupallisen aktiivihiihen luokkaa, 700 m²/g. Kaupallisten aktiivihiihen ominaispinta-ala vaihtelee karkeasti välillä 500–1500 m²/g. Ominaispinta-alaltaan pajubiohiilestä valmistettu aktiivihiihi vastasi tutkimuksessa käytettyjä kaupallisia verrokkeja (turve- ja puupohjaiset aktiivihiihet), mutta kokonaishuokoisuus oli näitä pienempi. Tämän arveltiin johtuvan huokoskokojakaumasta: pajupohjaisessa aktiivihiiheessä oli vähemmän pieniä, meso- ja nanokokoluokan huokosia (läpimitaltaan < 50 nm) kuin kaupallisissa verrokeissa. (11)

Pajusta tai muistakaan BioCarbonValue-hankkeessa agrobiomassoista (vehnän olki, ruokohelvi, kauran kuori ja vehnän oljen ligniini) valmistetut aktiivihiihet eivät pärjänneet testissä kaupallisille, turve- ja puupohjaisille verrokeille, kun kokeiltiin niiden toimivuutta jäteveden sisältämien orgaanisten haitta-aineiden suodatuksessa. Tämän arveltiin johtuvan nimenomaan meso- ja nanokokoluokan huokosten vähäisyydestä agrobiomassoista valmistetussa aktiivihiiheessä. Raskasmetallien poistamisessa jätevedestä pajuaktiivihiihi ja muutkin testatut agrobiomassoista valmistetut aktiivihiihet suoriutuivat kaupallisten aktiivihiihten veroisesti. Agrobiomassoista valmistetut aktiivihiihet nähtiin edelleen lupaavina vaihtoehtoina fossiiliselle aktiivihiihelle ja niiden valmistusprosessin optimointiin keskittyvä tutkimus- ja kehitystyö, joka tavoittelisi parempaa kilpailukykyä kaupallisten tuotteiden kanssa, nähtiin tarpeelliseksi. (11)

Viime vuosina on tutkittu myös akkujen pikalatauksessa käytettävien superkondensaattorien harvinaisten alkuaineiden korvaamista biopohjaisella aktiivihiihellä. Superkondensaattoreissa aktiivihiiheltä vaaditaan yli 1 000 m²/g huokospinta-aloja. Superkondensaattorihiilille käytetään usein kemiallista aktivointia johtuen niiden tarkoista pinta-ala- ja huokoskokovaatimuksista, jotka voidaan paremmin saavuttaa kemiallisia menetelmiä käyttämällä. (24)

Yli 1000 °C:n pyrolyysilämpötilassa biomassasta voidaan valmistaa myös akkujen anodimateriaaliksi soveltuvaa kovahiiltä. Kovahiili on kiderakenteeltaan pääosin amorfista hiiltä, jossa on jonkin verran grafiittisia alueita, ja se soveltuu esimerkiksi litium- ja natriumioniakkujen anodimateriaaliksi. Tällaiset akkusovellukset eivät edellytä hiileltä suuria ominaispinta-aloja; esimerkiksi natriumioniakkujen

anodimateriaaleilla pinta-alat ovat tyypillisesti noin 1–10 m²/g. Biomassapohjaisia kovahiiliä on kehitetty pääasiassa sellu- ja paperiteollisuuden sivuvirtana syntyvästä ligniinistä, sillä ligniinillä on valmiiksi korkea hiilipitoisuus ja sen rakenne on luontaisesti amorfinen. Esimerkiksi Stora Enso kehittää ligniinipohjaista Lignode®-materiaalia, jota on tutkittu biopohjaisena vaihtoehtona fossiiliselle grafiitille akkujen anodisovelluksissa. BioCarbonValue-hankkeessa valmistettiin kovahiiltä vehnän oljen ligniinistä, mutta valmistettu kovahiili ei ominaisuuksiltaan vastannut kaupallista fossiilipohjaista kovahiiltä. (24) (55) (56)

Biohiilestä voidaan valmistaa myös biokoksia metalliteollisuuden käyttöön. Biokoksilla voidaan osittain korvata fossiilista koksia ja siten pienentää metalliteollisuuden hiilijalanjälkeä. Biokoksi voi toimia metalliteollisuuden prosesseissa pelkistimenä, lämmönlähteenä ja hiilen lähteenä samaan tapaan kuin fossiilinen koksi. Biokoksia valmistetaan biohiilestä jauhamalla ja briketöimällä. Biokoksibrikettien tärkeitä ominaisuuksia ovat lujuus ja reaktiivisuus CO₂-ympäristössä. (57) (58) Metallinjalostusprosessit ovat aina tehdaskohtaisia ja metalliteollisuuden käyttöön tuotettava biokoksi muokataan tehdaskohtaisesti. Ajankohtainen esimerkki tästä on Outokumpu Oyj, joka uutisoi joulukuussa 2023 rakentavansa Tornioon biokoksin briketöintilaitoksen, jonka kapasiteetti on 25 000 tonnia vuodessa. Valmistettavaa biokoksia on tarkoitus käyttää ferrokromituotannossa pelkistimenä. (59) Osa biohiilestä tulisi briketöintilaitokselle Outokummun omalta biohiilitehtaalta Saksasta, joka käyttäisi raaka-aineenaan jätetuuta (60). Ferrokromin valmistuksessa käytettävän koksin tärkeitä ominaisuuksia ovat korkea hiilipitoisuus, hyvä mekaaninen lujuus, alhainen tuhka, rikki- ja fosforipitoisuus, alhainen haihtuvien yhdisteiden pitoisuus sekä hyvä kuumalujuus. (61)

Suomessa biohiilen käyttöpotentiaali metallurgiassa on n. 150 000–250 000 t/v ja yhtenä haasteena biokoksin käytössä nähdään biohiilen rajallinen saatavuus (24). Pajun käytöstä biokoksin raaka-aineena ei löytynyt tutkimuksia, mutta pajulla voisi tasalaatuisuutensa ja nopean biomassatuotannon puolesta olla potentiaalia myös tällä saralla. Puupohjaisen biohiilen etuna biokoksin tuotannossa nähdään sen valmiiksi alhainen tuhka- ja rikkipitoisuus (61). Mekaanista lujuutta voidaan kasvattaa esimerkiksi briketöinnillä (61).

Biohiilellä on nähty mahdollisuuksia myös betonin sideaineena käytettävän sementin osittaisessa korvaamisessa. Sementin korvaajana käytettäessä biohiilen on todettu lisäävän betonin kestävyyttä tiettyyn pisteeseen saakka, mutta suuren sementtimäärän korvaaminen ei ole mahdollista. Biohiili pienentää betonin hiilijalanjälkeä ja betoniin seostettavan biohiilen parhaaksi raaka-aineeksi tältä kannalta on nähty purkupuu tai muut jäte- ja sivuvirrat. (62)

3.3 Pajubiohiili ilmastoratkaisuna

Kuten aiemmin on todettu, pyrolyysissa suuri osa biomassan hiilestä sitoutuu biohiileen erittäin pysyvässä muodossa. Biohiilen maaperäkäytössä tämä biohiileen sitoutunut hiili säilyy jopa satoja tai tuhansia vuosia eikä vapaudu nopeasti takaisin ilmakehään. Kun biohiiltä käytetään maaperässä tai muissa sovelluksissa, joissa se säilyy pitkäaikaisena hiilivarastona, se muodostaa hiilinielun, joka pienentää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta.

Biohiilen hiilinielun suuruus riippuu siitä, kuinka paljon pysyvästi sitoutunutta hiiltä se sisältää. Biohiilen hiilipitoisuus ilmoitetaan yleensä prosentteina. Kun tiedetään biohiilen hiilipitoisuus, voidaan laskea sen sisältämä hiilimassa ja muuntaa tämä hiilidioksidiekvivalentiksi (CO₂-ekv). Muunnos tehdään kertomalla hiilimassa luvulla 3,67, joka kuvaa hiilen (C) ja hiilidioksidin (CO₂) välistä molekyylipainosuhdetta. Jos biohiilen hiilipitoisuus on esim. 90 %, yksi tonni biohiiltä sisältää 0,9 tonnia hiiltä. Kun suhdeluku 3,67 kerrotaan hiilipitoisuudella 0,9, saadaan 3,30

hiilidioksidiekvivalentttonnia (CO₂-ekv), joka tulkitaan biohiilen tarjoamaksi pysyväksi ilmastohyödyksi. Toki lopullisessa ilmastovaikutuksessa huomioidaan myös biohiilen tuotannon ja kuljetuksen päästöt, mutta hiilen pitkäaikainen varastoituminen maaperään muodostaa suurimman osan ilmastovaikutuksesta. Karkeasti voidaan sanoa, että yhden biohiilitonnin tuotanto sitoo 3 tonnia hiilidioksidia.

Näitä biohiileen sidottuja hiilidioksidiekvivalenttonneja voidaan sertifioida ja tuotteistaa vapaaehtoisilla päästökompensaatiomarkkinoilla myytäväksi ilmastoyksiköiksi eli hiilikrediiteiksi. Esimerkiksi päästökompensaatiomarkkinoilla toimiva Puro.earth sertifioi biohiilihankkeita ja laskee liikkeelle CORC-krediittejä, jotka vastaavat yhden hiilidioksiditonnin sitomista vähintään sadaksi vuodeksi pois ilmakehästä. CORC-krediittejä ostavat esimerkiksi Swiss Re, Microsoft ja Shopify, jotka kompensoivat omia päästöjään ostetuilla krediiteillä. (63)

Päästökompensaatioajattelu on tulossa vapaaehtoisilta markkinoilta myös politiikkaan: Vuonna 2024 voimaan tulleen EU:n CRCF-asetuksen (Carbon Removals and Carbon Farming) tavoitteena on kehittää yhteinen perusta hiilensidonnan mittaamiselle, raportoinnille ja todentamiselle. Asetuksella luodaan säännöt CRCF-ilmastoyksiköiden sertifiointille ja hyväksyttävälle hiilensidontatoimenpiteille. Taustalla on se, että EU:n on ilmastotavoitteisiin päästökseen lisättävä hiilinieluja päästöjen vähentämisen lisäksi ja hiilinielujen lisääminen edellyttää taloudellisia kannustimia. CRCF-asetus ei määrittele mekanismeja, joilla ilmastoyksiköillä käydään kauppaa, mutta mahdollisesti ilmastoyksiköitä voisi sisällyttää esim. EU:n päästökauppaan, maataloustukiin ja kestävyysraportointiin (CSRD). (64) Toistaiseksi ilmastoyksiköillä käydään kauppaa lähinnä vapaaehtoisilla kompensaatiomarkkinoilla, mutta CRCF-sääntely voi avata myös uusia markkinoita.

CRCF-asetus määrittelee tietyt hiiltä sitovat toimet pysyviksi hiilenpoistoiksi. Näiden toimien avulla voidaan tuottaa sertifioituja CRCF-ilmastoyksiköitä. Biohiileen perustuva hiilenpoisto (BCR, Biochar Carbon Removal) on mainittu yhdeksi CRCF-asetuksen pysyvän hiilenpoiston menetelmistä. BCR-menetelmällä tarkoitetaan biomassan pyrolysointia biohiileksi ja biohiilen pitkäaikaista varastointia maaperään tai muihin materiaaleihin. (65)

Biohiilen hiilensidonnan tuotteistaminen ilmastoyksiköiksi tai hiilikrediiteiksi edellyttää aina tuotantoprosessin sertifiointia, jolla varmistetaan mm. biohiilen pysyvyys ja kestävä tuotanto sekä todennetaan hiilensidonta. Esimerkiksi puro.earth on julkaissut biohiilen sertifiointimenetelmän, jossa määritellään, miten biohiilen tuotannon hiilidioksidin poistot lasketaan ja todennetaan. Em. metodologian mukaisesti pajupohjaisen biohiilen tuotannossa olisi esimerkiksi osoitettava, että koko prosessi pajun kasvatuksesta korjuuseen, kuljetukseen, pyrolyysiin ja biohiilen käyttöön poistaa enemmän hiiltä ilmakehästä kuin mitä se tuottaa päästöjä. (66)

Jos biohiili hyödynnetään metalliteollisuudessa biokoksina, se ei tuota pysyvää hiilivarastoa, eikä biokoksin tuotannolla voi siten tuottaa ilmastoyksiköitä tai hiilikrediittejä. Biokoksi tarjoaa sen sijaan terästeollisuudelle mahdollisuuden vähentää merkittävästi fossiilisen koksin käytöstä syntyviä päästöjä, jolloin myös biokoksilla on ilmaston kannalta merkittäviä myönteisiä vaikutuksia. Terästeollisuus hyötyy taloudellisesti päästöjen vähentämisestä, koska biokoksin käyttö vähentää päästökaupparamaksuja.

4 Pajupohjaisen pyrolyysinesteen käyttömahdollisuudet ja siihen liittyvä lainsäädäntö

Hidaspyrolyysissa sivutuotteena muodostuva pyrolyysineste koostuu tervamaisesta, veteen liukenemattomasta osasta sekä vesiliukoisesta, etikkahappopitoisesta osasta eli puuetikasta (7). Nämä eri jakeet voidaan erottaa pyrolyysinesteestä esimerkiksi painovoimaisesti: tervamainen jae on vettä raskaampaa ja kerrostuu vesiliukoisen osan alapuolelle. Jakeet voidaan myös ottaa talteen erikseen pyrolyysikaasujen jäähtymisen eri vaiheissa.

Pyrolyysinesteellä on tutkimusten mukaan käyttömahdollisuuksia mm. tuholaisten karkoitteena, rikkakasvihävitteenä, lietelannan hapotuksessa ja biostimulanttina. Pyrolyysinesteen tervamainen osa sisältää mm. haitallisia PAH-yhdisteitä, joiden lisääminen maaperään ei ole tarkoituksenmukaista, joten monet tutkimukset ovat keskittyneet pyrolyysinesteestä erotetun vesiliukoisen fraktion eli ns. puuetikan hyödyntämiseen näissä sovelluksissa. (7)

Puuetikan kaupallista hyödyntämistä Euroopan unionin sisällä rajoittaa tällä hetkellä Euroopan unionin kemikaalilainsäädäntöön kuuluvan REACH-asetuksen mukaisen rekisteröinnin vaatimus. Puuetikkaa ei ole rekisteröity em. asetuksen mukaisesti, joten Euroopan unionin sisällä ei ole mahdollista valmistaa tai tuoda maahan yli tonnia puuetikkaa vuodessa. REACH-asetuksen lisäksi puuetikan hyödyntämistä ohjaavaa keskeistä lainsäädäntöä ovat vaarallisten aineiden pakkaamista ja kuljetuksia ohjaavat CLP-asetus ja direktiivi vaarallisten aineiden kuljetuksesta sekä puuetikan käyttötarkoituksesta riippuen kasvinsuojelu- ja lannoitelainsäädäntö. Tässä luvussa käydään läpi pyrolyysinesteen hyödyntämismahdollisuuksien lisäksi tuotteiden kaupalliseen hyödyntämiseen keskeisesti liittyvää lainsäädäntöä ja viranomaisvaatimuksia.

Luvussa tukeudutaan lainsäädännön ja viranomaisvaatimusten osalta pitkälti Bioenergia ry:n vuonna 2024 julkaisemaan lainsäädäntöselvitykseen pyrolyysitöiden biostimulantti- ja lietelantasovellusten viranomaisvaatimuksista ja hyväksyttämispöytäkirjoista (67) sekä Luonnonvarakeskuksen vuonna 2019 julkaisemaan ns. PYSTI-lainsäädäntöselvitykseen (7).

4.1 Tervajae

Pyrolyysinesteen PAH-pitoinen tervajae hyödynnetään tyypillisesti energiana pyrolyysiprosessissa. VTT on tutkinut hidaspYROLYYSISTA saatavan tervajakeen koostumusta ja soveltuvuutta puun suoja-aineeksi vuonna 2021. Tutkimuksessa ei pyrolysoitu pajua vaan männynkuorta ja sekakuorta. Hankkeessa tutkittujen hidaspYROLYYSITERVOJEN koostumus ei eronnut dramaattisesti perinteisillä menetelmillä valmistettujen tervojen koostumuksesta. Tämän perusteella pyrolyysissa syntyvä tervajae voisi soveltua myös perinnerakennusten puurakenteiden suojaamiseen perinteisen tervan tapaan. Raportissa todetaan kuitenkin, että tervojen soveltuvuus puunsuoja-aineeksi vaatisi käytännön kokeen suoritusta. (68)

Perinteinen puunsuojaukseen käytettävä mäntyterva on rekisteröity REACH-lainsäädännön alaisuudessa toukokuussa 2018 tunnisteella CAS 8011-48-1 (69) (70). Tervan rekisteröinnissä mukana olleet yritykset (Suomen Hautaterva, Lentiiran Terwa ry ja Puirova) voivat tuottaa 1-10 tonnia tervaa vuodessa. Rekisteröinnin kokonaiskustannus oli noin 150 000 euroa ja rekisteröintiin saatiin rahoitusta mm. säätiöiltä, Kirkkohallitukselta, yhdistyksiltä ja yrityksiltä. Jatkossa Euroopan kemikaalivirasto ECHA määrää, mihin rekisteröintiin uudet tervan valmistajat liitetään ja tarvitaanko lisätutkimuksia. (69) Tämä koskee myös pajupohjaista pyrolyysitervaa, mikäli sitä valmistetaan yli 1 tonni vuodessa.

4.2 Etikkahappopitoinen jae

Pyrolyysinesteiden vesiliukoinen osa eli puuetikka koostuu lukuisista orgaanisista yhdisteistä, kuten etikkahaposta (4-20 %), furfuraalista sekä fenolisista yhdisteistä. Luonnonvarakeskus on tutkinut männynkuorista, metsäntähteistä, vehnän oljesta sekä pajusta valmistetun pyrolyysinesteen vesiliukoisen osan soveltuvuutta useisiin eri maa- ja puutarhatalouden sovelluksiin, kuten rikkakasvien torjunta-aineeksi, kasvintuhoojien torjunta-aineeksi ja lietelannan hapotukseen. Myös tutkittujen pyrolyysinesteiden koostumusta on analysoitu. Pajupohjainen pyrolyysineste erottuu tuloksista korkeammalla etikkahappopitoisuudella ja korkeammilla tiettyjen fenolisten yhdisteiden pitoisuuksilla (taulukko 1 ja taulukko 2). Fenoliset yhdisteet ovat heikkoja aromaattisia orgaanisia happoja, ja niiden pitoisuuksia on esitetty taulukossa 2. Monilla fenolisilla yhdisteillä on antioksidanttisia ja antiseptisiä ominaisuuksia, mutta suurina pitoisuuksina ne ovat haitallisia. (71)

Pajupohjainen pyrolyysineste oli merkittävästi muita pyrolyysinesteitä tehokkaampi sekä kotilokarkoitteena, rikkakasvihävitteenä että kirvantorjunnassa, kun sitä verrattiin männyn kuoresta, metsänharvennushakkeesta sekä vehnän oljesta tuotettujen pyrolyysinesteiden tehoon. Pajupohjainen pyrolyysineste oli rikkakasvihävitteenä jonkin verran tehokkaampi kuin kaupallinen etikkahappopohjainen herbisidi sekä kirvojen torjunnassa kaupallisen tuotteen veroinen. Pajupohjaisen pyrolyysinesteen happopitoisuus oli merkittävä tehoa selittävä tekijä, mutta ei selittänyt kokonaan aineen vaikutusta, jonka arvioitiin olevan monen yhdisteen yhteisvaikutusta. (71)

Taulukko 2. Hidaspyrolyysinesteissä ja hydortermisen hiillon (HTC-paju) nesteissä todettuja haihtuvimpien yhdisteiden pitoisuuksia (mg L^{-1}) Hagnerin ym. (2020) tutkimusartikkelin mukaan (71). Pajupohjainen pyrolyysineste erottuu joukosta mm. korkealla etikkahappopitoisuudellaan.

Yhdiste	Männyn kuori	Metsän tähteet	Vehnän olki	Paju	HTC-paju
Furaani	70	140	200	30	25
Metanoli	17 300	21 000	15 000	20 100	1880
Etanoli	150	170	100	140	40
2-Propanoli	940	330	150	100	50
Asetaldehydi	750	1050	880	330	60
Glykolialdehydi	690	1020	1500	1020	100
Furfuraali	3 230	1 270	530	1 170	35
5-Metyylifurfuraali	1 560	680	160	790	10
2-Asetyyli Furaani	310	260	330	490	80
Asetoni	870	760	550	330	480
Hydroksiasetoni	8 200	14 900	18 600	14 700	95
2-Butanoni	330	520	760	330	160
1-Hydroksi-2-butanoni	1 270	2 980	11 300	5 580	10
Muurahaishappo	4 300	7 000	4 600	5 300	100
Etikkahappo	43 900	66 800	84 400	162 000	9 390
Propionihappo	2800	3690	9560	5470	310

Taulukko 3. Hidaspyrolyysinesteissä ja hydortermisen hiillon (HTC-paju) nesteissä todettujen tärkeimpien aromaattisten yhdisteiden suuntaa antavat pitoisuudet (mg L^{-1}) Hagnerin ym. (2020) tutkimusartikkelin mukaan (71). Taulukossa esitettyjen

aromaattisten yhdisteiden summapitoisuus on suurin pajupohjaisella pyrolyysinesteellä. Yhdisteiden nimien suomennoksessa on hyödynnetty tekoälyä.

Yhdiste	Männyn kuori	Metsän tähteet	Vehnän olki	Paju	HTC-paju
Bentsoehappo	52	72	0	29	0
Fenoli	92	356	90	486	122
2-Metyylifenoli	15	32	22	58	0
3-Metyylifenoli	30	136	66	218	0
4-Metyylifenoli	15	104	77	131	0
Muut alkyylifenolit	7	24	44	44	0
4-Hydroksiasetofenoni	0	280	0	0	0
4-Hydroksibentsoehappo	0	72	0	0	22
3-(4-Hydroksifenyyl)-1-propanoli	37	88	0	0	0
Gvajakoli	37	264	363	522	29
4-Metyyligvajakoli	111	232	121	174	0
4-Etyyligvajakoli	22	32	121	160	0
4-Propenyyligvajakolit (3 isomeeria)	0	0	0	145	0
Vanilliini	222	160	220	319	0
Asetovanilloni	67	88	154	73	19
Gvajakyyliasetoni	111	272	176	261	15
Vanilliinihappo	74	56	11	15	0
Homovanilliinihappo	15	0	0	0	0
3-Gvajakyylipropanihappo	74	16	11	0	24
1-Gvajakyylietaanoli	81	0	11	29	0
Dihydrokoniferyylialkoholi	422	560	11	29	14
1-Gvajakyyli-1-hydroksiasetoni	81	32	11	0	0
Muut gvajakyylijohdannaiset	118	64	88	87	20
Syringoli	0	0	770	1088	136
4-Metyylisyringoli	0	0	165	493	0
4-Etyylisyringoli	0	0	99	406	14
4-Propylisyringoli	0	0	22	87	0
4-Propenyylisyringolit (3 isomeeria)	0	0	22	116	0
Syringaldehydi	0	0	22	290	0
Asetosyringoni	0	0	88	203	19
Propiosyringoni	0	0	0	73	0
Syringyyliasetoni	0	0	66	276	22
1-Hydroksi-1-syringyyliasetoni	0	0	11	87	0
Muut syringyylijohdannaiset	0	0	55	116	24
1,2,4-Bentseenitrioli	0	0	0	0	61
Hydrokkinoni	178	328	440	450	102
2-Metyylihydrokkinoni	52	40	176	174	46
Katekoli	1628	1280	1342	1175	146
3-Metylikatekoli	104	136	77	102	0
4-Metylikatekoli	363	240	407	334	31
4-Etylikatekoli	111	104	198	145	7
3-Metoksikatekoli	0	0	220	348	73
3-(2,3-Dihydroksifenyyl)-propanihappo	59	88	407	319	20

PlastLife-hankkeessa (1.1.2023–31.12.2029) on tehty tutkimusta pyrolyysinesteen vesifraktion hyödyntämisestä puutarhoihin ja viherrakentamiseen soveltuvana biohajoavana katemateriaalina.

Nestemäinen katemateriaali koostuu pyrolyysinesteen vesifraktiosta sekä kasviperäisistä kuitumateriaaleista. Vuonna 2024 hankkeessa tehtiin koe, jossa vertailtiin pyrolyysinestettä ja etikkahappoa sisältävien nestekatteiden tehoa omenatarhan nurmelle. Kaikki tutkimuksessa mukana olleet katemateriaalit pitivät kasvillisuuden kurissa noin 3 kuukautta, jonka jälkeen teho heikkeni ja erot materiaalien välillä alkoivat näkyä. Pyrolyysineste oli etikkahappoa tehokkaampi ja 5 % pyrolyysinestepitoisuuden todettiin parantaneen kateen tehoa kasvukauden loppua kohden. Katemateriaalisovelluksista on laadittu patenttihakemuksia. (72) (73) Lähteistä ei selvinnyt, minkälaisesta biomassasta katemateriaalissa käytetty pyrolyysineste oli valmistettu.

Pyrolyysinesteen etikkahappopitoisen osan on todettu soveltuvan myös korvaamaan rikkihappoa lietalannan hapotuksessa. Lietelannan happokäsittelyllä voidaan vähentää lietalannan typpihävikkiä, mutta lietalannan happokäsittely ei ole Suomessa laajasti käytössä. ProAgrian kokoamien tutkimustulosten mukaan lietalannan happokäsittely voi parantaa lannan typen hyväksikäyttöä, mutta hyöty vaihtelee vuodesta sekä kasvukauden ja kasvupaikan olosuhteiden mukaan. Happokäsittely kuitenkin vähentää lannan ammoniakkipäästöjä. (74) Luonnonvarakeskus on tutkinut pyrolyysinesteiden toimivuutta lietalannan hapotuksessa ja tutkituista pyrolyysinesteistä parhaaksi osoittautui pajusta tehty pyrolyysineste. Tulosten mukaan pajupohjaista pyrolyysinestettä tarvittaisiin noin 20-kertainen määrä rikkihappoon verrattuna. (75)

Viime vuosina Luonnonvarakeskuksessa on tutkittu pyrolyysinesteiden biostimulanttivaikutuksia. Useissa ulkomaisissa tutkimuksissa pyrolyysinesteillä on havaittu olevan biostimulanttivaikutuksia. Luken julkaisemattomien tutkimustulosten mukaan laboratoriokokeet ovat antaneet viitteitä siitä, että pienet pyrolyysinestepitoisuudet parantaisivat mansikan juurten kasvua. Viljoilla ja herneellä tehdyissä kenttäkokeissa pyrolyysinesteiden biostimulanttivaikutusta ei pystytty todentamaan, tosin kokeessa myöskään kaupallisilla biostimulanteilla ei havaittu vaikutuksia. (72)

Pyrolyysinesteiden kaupallinen käyttö kaikkiin tässä luvussa kuvattuihin sovelluksiin vaatii EU:n kemikaalirekisteröinnin eli REACH-rekisteröinnin, mikäli tuotetta valmistetaan tai tuodaan maahan yli 1 tonni vuodessa. (72)

Euroopan ulkopuolella, erityisesti Aasiassa (Japani, Korea, Kiina) sekä Australiassa ja Uudessa-Seelannissa, puuetikkaa (wood vinegar) käytetään laajasti maataloudessa kasvinsuojeluaineena ja biostimulanttina. Näissä maissa tuotteiden hyväksyntä perustuu yleensä käyttöhistoriaan ja toksikologiseen arvioon, eikä REACH-tyyppistä rekisteröintiä vaadita.

4.3 REACH-asetus

Euroopan unionin REACH-asetus on osa EU:n kemikaalilainsäädäntöä. Asetuksen tavoitteena on varmistaa, että EU:n alueella myytävät kemikaalit ovat turvallisia ihmisille ja ympäristölle. Lyhenne REACH tulee sanoista **R**egistration, **E**valuation, **A**uthorisation ja **R**estriction of **C**hemicals. REACH-asetuksessa säädetään mm., että kaikki EU:n alueella valmistettavat tai EU:n alueelle tuotavat kemikaalit on rekisteröitävä Euroopan kemikaalivirastossa (ECHA), mikäli valmistus- tai tuontimäärä ylittää 1 tonnin vuodessa. Tämä rekisteröintivaatimus koskee myös pyrolyysinesteitä, joilla ei siis toistaiseksi ole REACH-rekisteröintiä. (76)

REACH-asetus määrittelee rekisteröitävät aineet luonnossa esiintyviksi tai millä tahansa valmistusmenetelmällä valmistetuiksi alkuaineiksi tai niiden yhdisteiksi. Asetuksen mukaan aine voi sisältää yhden tai useamman pääainesosan, epäpuhtauksia ja lisäaineita. Seos määritellään useista

aineista koostuvaksi kemikaaliksi. Useammasta ainesosasta koostuvan aineen ja seoksen ero on, että useammasta ainesosasta koostuva aine on kemiallisen reaktion tulos. (77)

REACH-rekisteröinti koskee **aineita**. Rekisteröinnin piirissä ovat aineet sellaisenaan, aineet seoksissa ja esineistä tarkoituksella vapautuvat aineet. Rekisteröinnin yhteydessä rekisteröitävistä aineista toimitetaan vaadittavat tiedot Euroopan kemikaalivirastolle (ECHA). Vaadittavien tietojen määrä ja laajuus riippuvat pääosin aineen valmistus- tai maahantuontimäärästä. Vaaditut tiedot löytyvät tarkemmin REACH-asetuksen liitteistä. Kaikista rekisteröitävistä aineista on toimitettava seuraavat tiedot (lista löytyy TUKESin verkkosivuilta) (77) (78):

- valmistajan/maahantuojan ja aineen tunnistetiedot
- tiedot aineen valmistuksesta ja käyttötavoista
- aineen luokitus ja merkinnät
- ohjeet turvallisesta käytöstä
- tutkimustiivistelmät aineen ominaisuuksista
- testausehdotukset jos tarvitaan testejä selkärankaisilla (≥ 100 t/v aineet)
- ilmoitus ulkopuolisten arvioimista tiedoista
- altistumisreitit ja altistumistavat 1-10 t/v aineille.

REACH-asetus jakaa aineet kahteen pääryhmään: tarkasti määriteltyihin aineisiin ja koostumukseltaan tuntemattomiin tai vaihteleviin aineisiin eli UVCB-aineisiin. Tarkasti määriteltyjen aineiden sisältämät ainesosat voidaan yksilöidä ja aineen koostumus voidaan määritellä 100 prosenttisesti. Pyrolyysinesteen kemiallinen koostumus vaihtelee pyrolyysissa käytetystä raaka-aineesta, pyrolyysiparametreista ja teknologioista riippuen, eikä pyrolyysinesteen sisältämien ainesosien pitoisuuksia ole mahdollista määritellä yksiselitteisesti. Tästä syystä pyrolyysineste olisi rekisteröitävä UVCB-aineena. UVCB-aineet on luokiteltu niiden alkuperän perusteella neljään alaluokkaan. Pyrolyysineste on luokiteltavissa alaluokkaan 1: aineen *”alkuperä on biologinen ja prosessi on synteesi. Biologista materiaalia muokataan (bio)kemiallisilla prosesseilla siten, että saadaan uusia ainesosia.”* (67)

REACH-asetuksen tullessa voimaan vuonna 2007 haluttiin aineiden valmistajille ja maahantuojille mahdollistaa siirtymäajat varsinaiselle rekisteröinnille, joka vie jonkin verran aikaa. Siirtymäajaksi annettiin mahdollisuus aineiden esirekisteröinnille, joka oli käytännössä ECHA:lle tehtävä ilmoitus aineen tunnistetiedoista, yrityksen tiedoista sekä varsinaisen rekisteröinnin arvioidusta aikataulusta. Esirekisteröinti myös mahdollisti samaa ainetta käsittelevien yritysten verkostoitumisen ja liittymisen samaan ryhmään tietojen jakamista varten ja varsinaista rekisteröintiprosessia silmällä pitäen. (79) (80)

Pyrolyysineste esirekisteröitiin REACHiin Tekesin BioRefine – Uudet biomassatuotteet -ohjelmassa, joka oli käynnissä vuosina 2008–2011. Esirekisteröinnissä oli mukana useita yrityksiä, jotka liittyivät samaan SIEF-ryhmään (Substance Information Exchange Forum) (67). REACH-asetuksen siirtymäaika on kuitenkin päättynyt, eivätkä esirekisteröinnit ole enää voimassa (81). Näin ollen pyrolyysinesteen kaupallistaminen edellyttäisi varsinaisen rekisteröintiprosessin aloittamista.

PYSTI-lainsäädäntöselvityksessä (2019) esitetään, että pyrolyysinesteen REACH-rekisteröinnin eteenpäin viemiseksi olisi suositeltavaa perustaa uusi kansainvälinen konsortio. Lainsäädäntöselvityksen mukaan esirekisteröinnin yhteydessä perustetussa SIEF-ryhmässä tulisi aloittaa keskustelu vaadittavista tiedoista ja niiden saatavuudesta. Tietoja arvioidaan tarvittavan ainakin fysikaaliskemiallisten, toksikologisten ja ekotoksikologisten ominaisuuksien osalta. Mikäli saatavilla olevat tiedot eivät riitä REACH-rekisteröinnin vaatimuksiin, tulee esittää testausehdotus

rekisteröitävälle aineelle. (7) ECHA:n sivuilla julkaistaan rekisteröintioppaita, joista saa tarkempia tietoja vaatimuksista. REACH-rekisteröinti edellyttää usein laajoja teknisiä ja lainsäädännöllisiä selvityksiä, joten monet yritykset hyödyntävät sen valmistelussa asiaan perehtyneiden konsulttien tukea.

4.4 Kasvinsuojeluainelainsäädäntö

EU:n kasvinsuojeluaineasetuksen (EY) N:o 1107/2009 mukaan kasvinsuojeluaineen voi saattaa markkinoille vain, jos jäsenvaltion toimivaltainen viranomainen on hyväksynyt aineen. Suomessa toimivaltainen viranomainen on Turvallisuus- ja kemikaalivirasto Tukes, eli Suomessa saa myydä ja käyttää ainoastaan Tukesin hyväksymiä kasvinsuojeluaineita. Tämä on kirjattu myös kansalliseen kasvinsuojeluainelakiin 1563/2011. Tukes pitää yllä kansallista kasvinsuojeluainerekisteriä, josta hyväksytyt kasvinsuojeluaineet ovat löydettävissä. Edellytyksenä kasvinsuojeluaineen hyväksymiselle on, että valmisteen käyttö on turvallista terveydelle ja ympäristölle ja valmisteen tehoaineen pitää olla hyväksytty EU:ssa. Kasvinsuojeluaineiden tehoaineet arvioidaan ja hyväksytään yhteisesti EU:ssa arviointiraporttiluonnosten pohjalta. Euroopan elintarviketurvallisuusviranomainen (EFSA) toimii prosessissa asiantuntijatahona ja tekee raportista johtopäätökset. (82) (83)

Tällä hetkellä pyrolyysinesteen kasvinsuojeluainekäyttö ei ole sallittua Euroopassa eikä Suomessa, sillä tehoaine ei ole käynyt läpi EU:n hyväksymisprosessia. Pyrolyysinesteen rekisteröintiä kasvinsuojeluaineeksi vaikeuttaa edellä kuvattu tehoaineperusteinen rekisteröinti, koska pyrolyysinesteen koostumus vaihtelee liikaa (72).

4.5 Lannoitelainsäädäntö

Biostimulantit kuuluvat EU:ssa ja Suomessa lannoitelainsäädännön alaisuuteen. Biostimulanttina käytettävät valmisteet on täten hyväksyttävä lannoitevalmisteeksi EU:n lannoitevalmisteasetuksen (2019/1009) mukaisena CE-merkittynä tuotteena tai Suomen kansallisen lannoitelain (711/2022) mukaisesti (84). Myös REACH-rekisteröinti on pyrolyysinesteen biostimulanttikäytössä välttämätön, mikäli ainetta valmistetaan tai tuodaan EU-alueelle yli yksi tonni vuodessa (67).

Kasvibiostimulantit muodostavat yhden EU:n lannoiteasetuksen tuoteluokista (tuoteluokka 6). Kasvibiostimulantti määritellään asetuksessa lannoitevalmisteeksi, joka kiihdyttää kasvin ravinteidenottoa riippumatta tuotteen ravinnesisällöstä ja jonka ainoana tarkoituksena on parantaa ravinteiden hyväksikäytön tehokkuutta, abioottisen stressin kestävyyttä, laatuominaisuuksia ja/tai maaperään tai ritsosfääriin eli kasvin juuriston välittömässä vaikutuspiirissä olevaan maaperään sitoutuneiden ravinteiden saatavuutta. (85)

Lannoitevalmisteasetuksessa 2019/1009 on myös määritelty tuoteluokakohtaisesti lannoitevalmisteen sallitut raaka-aineet ja niiden käsittelymenetelmät. Pyrolyysineste sopii kasvibiostimulantti tuoteluokan ainesosaluokkaan 14: Pyrolyysissa ja kaasutuksessa muodostuvat materiaalit (biohiili). Ainesosaluokka sallii pyrolyysin raaka-aineiksi melko laajasti erilaisia kasvi- ja eläinperäisiä biomassoja. Asetus määrittelee sallitut enimmäispitoisuudet seuraaville kasvibiostimulanttien mahdollisesti sisältämille haitallisille aineille: kadmium (Cd), kuudenarvoinen kromi (Cr VI), lyijy (Pb), elohopea (Hg), nikkeli (Ni), arseeni (As), kupari (Cu) ja sinkki (Zn). Lisäksi asetus määrittelee ainesosaluokalle 14 enimmäispitoisuuksia myös PAH, PCDD/F ja ei-dioksiinin kaltaisille PCB-yhdisteille. (85)

Kansallisesta lannoitelaista biostimulantti löytyy myös omana tuoteluokkana ja pyrolyysihili omana ainesosaluokkana. Ruokavirasto ylläpitää luetteloa sallituista ainesosaluokista ja niissä sallituista ainesosista. Uuden ainesosan sisällyttämistä luetteloon haetaan Ruokavirastolta. (86)

Käytännössä pyrolyysinesteen biostimulanttikäyttö edellyttää siis sekä REACH-rekisteröintiä että valmisteen hyväksymistä lannoitevalmisteeiksi joko EU-tasoisesti CE-merkittynä tai kansallisen lainsäädännön mukaisena tuotteena. Mahdolliset hakemukset pyrolyysinesteen lannoitevalmistehyväksynnästä osoitettaisiin Ruokavirastolle, joka käsittelee sekä kansallisen lainsäädännön että EU-lainsäädännön mukaisen hyväksynnän. Biostimulantin valmistajalla on oltava laatujärjestelmä, jonka avulla varmistetaan, että valmiste on lannoitelainsäädännön vaatimusten mukainen. (72)

4.6 CLP-asetus ja laki vaarallisten aineiden kuljetuksesta

CLP-asetus on Euroopan parlamentin asetus kemikaalien luokituksesta, merkinnöistä ja pakkaamisesta. Asetuksen luokitus-, merkintä- ja pakkaamissäännöt koskevat vaaralliseksi luokiteltuja kemikaaleja. (87) Hagnerin ym. (2019) mukaan pyrolyysineste luokitellaan alustavan arvion mukaan vaaralliseksi aineeksi, jolloin sen merkinnöissä, pakkaamisessa ja kuljetuksessa on huomioitava sekä CLP-asetus että EU-direktiivi vaarallisten aineiden kuljetuksesta (ns. VAK-laki, 2008/68). Virallinen CLP-luokitus voidaan tehdä REACH-rekisteröinnin yhteydessä tuotettavalla tiedolla. (7)

5 Pajupohjaisen biohiilen arvoketjut

Arvoketjulla kuvataan vaiheittain tapahtuvaa lisäarvon muodostumista jonkin tuotteen kaikissa tuotantoketjun vaiheissa, raaka-aineen tuotannosta ja jalostuksesta tuotteen lopulliseen käyttöön. Pajupohjaisen biohiilen arvoketjuja tarkastelemalla voidaan tunnistaa pajubiohiilen tuotannon keskeiset prosessit, kustannustekijät ja arvon muodostuminen sekä muodostaa kokonaiskuva siitä, miten raaka-aineen tuotanto, logistiikka, jalostus ja biohiilen loppukäyttö kytkeytyvät toisiinsa ja millaisia edellytyksiä tarvitaan elinkelpoisen tuotannon muodostumiseksi.

Pajupohjaisen biohiilen arvoketju kuvaa lisäarvon muodostumista pajubiomassan tuotannon, biohiilen valmistuksen ja käytön vaiheissa. Pajubiomassan tuotanto tuottaa lisäarvoa, kun maapohjalla kasvatetaan jalostuskelpoista biomassaa. Biomassan lisäksi pajun viljely tuottaa myös muita lisäarvoja: kasvava paju sitoo hiiltä, vähentää ravinnehuuhtoumia ja tarjoaa elinympäristöjä monille lajeille.

Pajun korjuu, kuivaus ja haketus tuottavat pajubiomassalle uutta lisäarvoa, kun raaka-aine muokataan jalostajalle sopivaan muotoon, helposti siirrettäväksi ja tasalaatuisiksi materiaaliksi. Biomassan käyttökelpoisuus ja markkina-arvo kasvavat. Samalla syntyy paikallinen toimitusketju, joka voi olla biohiilen valmistajalle merkittävä etu: raaka-aineen saatavuus on varmaa ja sen ominaisuudet tunnetaan.

Kun hakettu paju muuttuu pyrolyysiprosessissa biohiileksi, on se huomattavasti arvokkaampi ja monikäyttöisempi materiaali kuin alkuperäinen biomassa. Biohiilen huokoisuus, suuri pinta-ala ja pysyvyys tekevät siitä monikäyttöisen materiaalin. Tässä vaiheessa syntyy usein arvoketjun näkyvin lisäarvo: biohiilituotteella on useita mahdollisia käyttötarkoituksia, ja sen kysyntä ja arvo vaihtelevat laadun ja käyttökohteen mukaan. Biohiiltä jatkojalostamalla voidaan pyrkiä kasvattamaan tuotteen arvoa ja/tai kysyntää.

Biohiilen arvoketjut ovatkin hyvin monimuotoisia, koska biohiilellä on niin monia eri sovellusalueita, jotka tuottavat erilaisia hyötyjä. Biohiilen arvoketjujen tärkeä, monissa käyttösovelluksissa muodostuva lisäarvo on biohiilen tuottama ilmastohyöty joko biohiileen pitkäaikaisesti sitoutuvan hiilen kautta tai fossiilisten polttoaineiden korvaamisen kautta.

Pyrolyysiprosessissa biohiilen sivutuotteena syntyvä pyrolyysikaasu voidaan hyödyntää lämmöntuotannossa tai prosessin omassa energiataloudessa. Pyrolyysikaasut voidaan myös jalostaa pääasiassa vedystä ja hiilimonoksidista koostuvaksi synteetikaasuksi. Synteetikaasun käyttöä biokaasulaitoksen biometanointiprosessin tehostamisessa on tutkittu Wood2Biogas-hankkeessa (88). Energiapitoiselle synteetikaasulle on muitakin mahdollisia käyttökohteita mm. biopolttoaineiden tuotannossa tai teollisten prosessien polttoaineena (89).

Sivutuotteena muodostuva pyrolyysineste voidaan ottaa prosessista talteen. Nesteestä voidaan erottaa tervamainen jae sekä vesiliukoinen puuetikka. Näiden jakeiden käyttömahdollisuuksia on kuvattu luvussa 4. Laajojen kaupallisten käyttömahdollisuuksien puuttuessa kaikki pyrolyysilaitteistot eivät ota talteen pyrolyysinesteitä, vaan ne hyödynnetään samassa energiantuotantoprosessissa kuin pyrolyysikaasut.

6 Biohiilen markkina ja pajupohjainen biohiili liiketoiminnassa

Yleisesti ottaen biohiilituotanto Euroopassa on kasvanut viimeisen kymmenen vuoden aikana ja jatkaa ennusteiden mukaan kasvuaan. Kehityksen vahvana ajurina nähdään biohiilen tuottamat ilmastohyödyt ja hiilikrediittikauppa. Toinen biohiilituotantoa kasvattava trendi on bioperäisen hiilen käyttö fossiilisen hiilen korvaajana metallurgiassa. Vuonna 2023 biohiilen maailmanlaajuinen tuotanto oli arviolta 352 000 tonnia, josta Euroopan osuus oli noin 75 000 tonnia ja Pohjoismaiden 21 000 tonnia. Euroopan tuotantokapasiteetiksi vuonna 2024 on arvioitu 115 000 tonnia. Pohjoismaista Ruotsi, Tanska ja Suomi ovat biohiilituotannon aktiivisimpia maita. (90)

Pohjoismaisen biohiilimarkkinan nähdään kuitenkin edelleen olevan kehityksensä alkuvaiheessa. Useimmat biohiilen tuottajat ovat pieniä yrityksiä, joille biohiilen tuotanto on sivubisnestä. Salon ym. (2024) mukaan pohjoismaiset yritykset ovat kiinnostuneita uusien tuotantolaitosten perustamisesta. (91) Salo ym. (2024) tutkimuksessa tunnistettiin viisi Pohjoismaissa erityisen tärkeää nykyistä ja tulevaa biohiilen sovellusalueita. Näitä olivat hiilensidonta, vesien suodatus ja hallinta, maaperän kunnostus, maisemointi ja kompostointi. Erittäin lupaavina biohiilimarkkinan kasvualueina nähdään myös metallurgia, sähkökemiallinen teollisuus, rakennusmateriaalit ja jätevedenkäsittely. Erityisesti metallurgia suurivolyymisena alana voi olla merkittävässä roolissa biohiilen tuotannon laajentumisessa. On arvioitu, että Suomessa biohiilen käyttöpotentiaali metallurgiassa olisi n. 150 000–250 000 t/v. (11) (24) (91)

Pajubiohiiltä voidaan hyödyntää hyvin monissa edellä mainituissa biohiilisovelluksissa. Huolimatta pajun soveltavuudesta biohiilen valmistukseen, pajua biohiilen raaka-aineena käyttäviä biohiilituottajia ei Euroopasta tai Euroopan ulkopuoleltakaan juurikaan tunnu löytyvän. Karelian Paju Oy Joensuussa vaikuttaa tällä hetkellä olevan ainoa pajupohjaista biohiiltä valmistava toimija. Suomalainen Carbons Finland Oy (entinen Pajupojat Oy) pyrki käynnistämään pajubiohiilen tuotantoa 2020-luvun taitteessa.

Vuonna 2022 Joensuussa perustettu Karelian Paju tähtäsi aluksi energiakäyttöön tarkoitettun pajun viljelyyn, mutta toiminta lähti nopeasti kehittymään kohti biohiilen valmistusta. Yritys investoi teollisen

mittakaavan biohiililaitokseen. Tuotantokapasiteetiltaan 4600 t/vuosi oleva biohiililaitos valmistui vuoden 2025 alkupuolella. Raaka-aineena yritys käyttää pajua, koivua sekä kierrätyspuuta. (28) (92) Yrityksen verkkosivujen mukaan valmistettavaa biohiiltä käytetään kasvualustoissa, lietealtaiden katteena, suodatinmateriaalina sekä metallurgiassa (93).

Carbons Finland Oy:n suunnitelmissa on ollut perustaa satojen tai tuhansien hehtaarien pajuviiljelmäkeskittymä, joiden yhteyteen tulisi biohiilen tuotantolaitos. Yritys näki sekä vajaakäyttöiset pellot että entiset turvetuotantoalueet potentiaalisina pajun viljelyalueina. Mahdollisena pajua viljelijänä tahona nähtiin joko maanomistaja tai yhteismetsät. Pajua viljelevä maanomistaja joko myisi biomassan itse tai toimisi sopimustuottajana. Yhteismetsät voisivat vuokrata viljelyalueet ja hoitaa sekä kasvatuksen että biomassan myynnin. (25) (94) (95) (9) (96) Riittävän suuria pajun viljelyn keskittymiä ei toistaiseksi ole syntynyt. Tällä hetkellä Carbons Finland Oy keskittyy jatkojalostamaan muiden toimijoiden valmistamia biohiiliä maaperäkäytön eri sovelluksiin.

7 Pohdinta ja yhteenveto

Tehdyn selvityksen perusteella paju on lupaava biohiilen raaka-aine. Pajubiohiilen erityispiirre on sen suuret, jatkuvat huokokset, jotka tekevät siitä lupaavan erityisesti maanparannuskäytössä, kun tavoitteena on maaperän vesitalousominaisuuksiin vaikuttaminen. Kasvien juuret pystyvät ottamaan vettä pajubiohiille ominaisten makrokokoluokan huokosista. Näille ominaisuuksille voisi olla käyttöä monissa ympäristörakentamisen sovelluksissa, kuten kaivosten ympäristöriskien hallinnassa tai kaupunkien viherrakentamisessa. Pajubiohiilen lataaminen ravinteilla todennäköisesti lisäisi sen agronomisia hyötyjä ja laajentaisi näin käyttömahdollisuuksia maataloudessa. Ravinneladattun biohiilen agronomisista hyödyistä tarvittaisiin kuitenkin vielä lisää tutkimusta ja näyttöjä, jotta kysyntä siellä puolella kasvaisi.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella pajubiohiiltä voidaan käyttää myös ravinnerikkaiden vesien suodattamiseen. Pajubiohiilen aktiivoinnilla voidaan edelleen lisätä biohiilen huokoisuutta ja kasvattaa huokosten pinta-alaa ja näin parantaa hiilen suodatusominaisuuksia. Aktiivihiihi on biohiiltä arvokkaampi tuote, jota käytetään vesien puhdistuksen ja suodatuksen lisäksi kaasujen puhdistuksessa, metallien talteenotossa sekä elintarvike- ja lääketeollisuudessa korkeaa puhtausastetta vaativissa prosesseissa. BioCarbonValue-hankkeessa pajubiohiilestä valmistetun aktiivihiihen todettiin suodattavan raskasmetalleja vesistä tehokkaasti, mutta orgaanisia haitta-aineita se ei suodattanut kaupallisten, turve- ja puupohjaisten aktiivihiihten veroisesti. Mikäli pajusta haluttaisiin valmistaa aktiivihiihtuotteita, jotka ovat kilpailukykyisiä kaupallisiin aktiivihiihiin nähden, edellyttäisi se tuotteen valmistukseen liittyvää tutkimus- ja kehitystyötä, joka tähtäisi mm. suurempaan nanometrikokoluokan huokosten osuuteen aktiivihiihtuotteessa.

Pajun käytöstä biokoksin raaka-aineena ei löytynyt tutkimuksia, mutta paju saattaa skaalautuvan ja runsaan biomassatuotannon takia olla tulevaisuudessa kiinnostava raaka-aine suurilla volyymeilla biokoksia tarvitsevalle metalliteollisuudelle. Biokoksi räätälöidään tehdaskohtaisesti, joten pajuviiljelmät voisivat tarjota jollekin metalliteollisuuden laitokselle riittävän ja tasalaatuisen biokoksin raaka-ainepohjan. Lisäksi pajubiohiilen tuhka- ja rikkipitoisuudet ovat puupohjaisten biohiilien tapaan alhaisia (11). Tämäkin ominaisuus on eduksi biokoksin raaka-aineelle (61).

Pajupohjaisella hiilituotteella voi kirjallisuuskatsauksen perusteella olla potentiaalia myös akkumateriaaleissa tarvittavan kovahiilen raaka-aineena, sillä akkusovellukset eivät vaadi hiileltä suuria ominaispinta-aloja. Pajubiohiilen suurten huokosten takia sen huokospinta-ala ei ole merkittävän suuri. Akkumateriaaleissa käytettävää kovahiiltä on viime vuosina aloitettu valmistamaan

metsäteollisuuden sivutuotteena syntyvästä ligniinistä. Pajun soveltuvuuden tarkempi arviointi vaatisi todennäköisesti lisätutkimuksia.

Edellä mainituissa teknisissä sovelluksissa tasalaatuinen biohiili on tärkeää ja viljelypajun on todettu tuottavan huokoskokojakaumaltaan tasalaatuista biohiiltä. (33) Toki on huomioitava, että pajubiohiilen soveltuvuus esimerkiksi aktiivihiihen raaka-aineeksi riippuu hiilen tasalaatuisuuden lisäksi myös mm. siitä, miten hyvin pajubiohiilen huokosrakennetta saadaan muokattua vaaditulle tasolle. Tutkimus- ja kehitystyölle on tältä osin vielä tarvetta.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan todeta, että pajubiohiili soveltuu ominaisuuksiltaan hyvin pitkälti samoihin käyttökohteisiin kuin metsäpohjaisista sivuvirroista valmistettu biohiili. Biohiilellä nähdään kasvavaa markkinapotentiaalia erityisesti ympäristörakentamisessa, vesien suodatuksessa ja teknisissä käyttökohteissa. Viljelypajun etu esimerkiksi yleisesti biohiilen raaka-aineena käytettäviin metsätalouden sivuvirtoihin tai kierrätyspuuhun verrattuna on mahdollisuus tuottaa keskitetysti suuria määriä tasalaatuista biomassaa lähellä biohiilen tuotantolaitosta.

Yleisenä biohiilialan haasteena nähdään edelleen kehittyvässä vaiheessa oleva biohiilimarkkina, joka luo epävarmuutta sekä tuotannon että investointien näkökulmasta. Biohiileltä eri käyttökohteisiin edellytettävien laatuvaatimusten vaihtelevuus ja epävarmuus eri käyttökohteiden kysynnästä aiheuttavat epävarmuutta tuotettavan biohiilen markkinoista ja hinnasta. Biohiilen tulevaa hintakehitystä ei ole helppo ennakoida kehittyvässä markkinassa, jossa tuotantokapasiteetti kasvaa koko ajan ja tuotteen kaupallinen arvo vaihtelee sovelluskohtaisesti. Nämä seikat lisäävät investointeihin liittyvää taloudellista epävarmuutta. Myös pyrolyysinesteen lainsäädännöllinen tilanne on nähty yhtenä haasteena biohiilituotannon kannattavuudelle.

Pajubiohiilen tuotannon keskeisiä kannattavuuteen liittyviä kysymyksiä ovat tuotteen kysynnän, tuotteesta saatavan hinnan ja vaadittavan laadun lisäksi raaka-aineen tuotantokustannukset, tarvittavan viljelyalan mitoitus ja löytyminen. Näihin kysymyksiin Pajuarvoketjuista uutta liiketoimintaa -hanke pyrkii löytämään vastauksia kehittämällä alustavia liiketoimintamalleja, joissa huomioidaan raaka-aineen tuotanto, logistiikka, biohiilituotanto sekä biohiilen markkinakehitys ja sivutuotteiden hyödyntämismahdollisuudet.

8 Lähteet

1. **Viherä-Aarnio, A., Jyske, T. & Beuker, E.** *Pajut biokiertotaloudessa : Materiaaleja, arvoaineita, ympäristöhyötyjä. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 11/2022.* Helsinki : Luonnonvarakeskus, 2022.
2. **Leppäkoski, L., Marttila, M.P., Uusitalo, V., Levänen, J., Halonen, V. & Mikkilä, M.H.** Assessing the Carbon Footprint of Biochar from Willow Grown on Marginal Lands in Finland. *Sustainability.* 2021, Osa/vuosik. 10097, 13(18).
3. **Tan, H., Lee, C.T., Ong, P.Y., Wong, K.Y., Bong, C.P.C., Li, C. & Gao, Y.** A Review On The Comparison Between Slow Pyrolysis And Fast Pyrolysis On The Quality Of Lignocellulosic And Lignin-Based Biochar. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2021, 1051(1), 012075.
4. **Joseph, S. & Taylor, P.** *A farmer's guide to the production, use, and application of biochar.* s.l. : ANZ Biochar Industry Group (ANZBIG), 2024.
5. **Boateng, A.A., Garcia-Perez, M., Masek, O., Brown, R. & del Campo, B.** Biochar production technology. [kirjan tekijä] J Lehmann ja S Joseph. *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation.* s.l. : Taylor & Francis Group., 2015, ss. 63-88.
6. **Basu, P.** *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory.* s.l. : Elsevier Science & Technology, 2013.
7. **Hagner, M., Sarvi, M., Rasa, K. & Keskinen, R.** *Kasviperäiset pyrolyysituotteet lietelannan ravinnearvon turvaajina (PYSTI) – lainsäädäntöselvitys.* s.l. : Luonnonvarakeskus, 2019.
8. **Ruokamo, K. & Puntila, E.** Pajun esikäsitteilymenetelmien testausta. [Online] 26. 11 2024. [Viitattu: 6. 10 2025.] <https://www.labopen.fi/lab-pro/pajun-esikasittelymenetelmien-testausta/>.
9. **Mäntyranta, H.** Pajusta tehdään ilmastopioneeria – biohiiltä maanparannukseen, kompostiin, jopa teolliseen suodatukseen. [Online] Forest News, 9. 3 2017. [Viitattu: 6. 10 2025.] <https://forest.fi/fi/artikkeli/pajusta-tehdään-ilmastopioneeria-biohiilta-maanparannukseen-kompostiin-jopa-teolliseen-suodatukseen/>.
10. **Basu, P.** *Biomass Gasification and Pyrolysis, Practical design and theory.* Oxford : Elsevier, 2010.
11. **Siipola, V., Salo, E., Rintala, V., Rauhala, T., Puntila, E., Martikka, O. & Ghoreishi, M.** *BioCarbonValue – High-value carbons from agricultural biomass Final Report.* VTT Research Report No. VTT-R-00161-25 : VTT Technical Research Centre of Finland, 2025.
12. **Nurmi, J.** The effect of whole-tree storage on the fuelwood properties of short-rotation Salix crops. *Biomass and Bioenergy.* 1995, Osa/vuosik. 8, 4, ss. 245-249.
13. **Pihlaja, A.** *Biohiilen tuotanto hitaalla pyrolyysillä: raaka-aineiden esikäsitteily.* Jyväskylä : Jyväskylän ammattikorkeakoulu, 2025. Opinnäytetyö, ylempi AMK.
14. **Maaseudun sivistysliitto.** Biohiiltä mobiiliretortilla. [Online] 2021. [Viitattu: 7. 10 2025.] <https://msl.fi/ymparisto/kaytannon-ymparistotekoja/biohiiletys/pyrolyysiretortti/>.
15. **Soilcare Oy.** SoilCaren Amacee-biohiililaitoksilla laadukasta biohiiltä. [Online] n.d. [Viitattu: 7. 10 2025.] <https://www.soilcare.fi/amacee-biohiililaitokset>.
16. **Pöyry Finland Oy.** *Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen.* s.l. : Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 56. Suomen Vesilaitosyhdistys ry, 2019.

17. **Suopajärvi, H.** *Biomaterian prosessointitavat: esikäsittelyt, termokemiallinen konversio ja käyttö masuunissa. Bioreducer: Biomateriapohjaisen pelkistysaineen mahdollisuudet.* s.l. : Oulun yliopisto, Prosessimetallurgian laboratorio, 2013.
18. **Carbofex Oy.** Carbofex Oy. *Biomass Pyrolysis Technology // Biochar production equipment.* [Online] n.d. [Viitattu: 28. 10 2025.] <https://carbofex.fi/>.
19. **Puhi Oy.** Batch Reactor for Smaller Scale Projects. [Online] n.d. [Viitattu: 28. 10 2025.] <https://www.puhi.fi/batch-machine>.
20. **Carbo Culture Oy.** Reactors. [Online] 2025. [Viitattu: 28. 10 2025.] <https://carboculture.com/technology/reactors>.
21. **GRK Suomi Oy.** GRK rakentaa nopeassa tahdissa useita biohiililaitoksia kaikkiin toimintamaihinsa. [Online] 10. 11 2022. [Viitattu: 28. 10 2025.] <https://www.grk.fi/grk-rakentaa-nopeassa-tahdissa-useita-biohiililaitoksia-kaikkiin-toimintamaihinsa/>.
22. **Pyreg GmbH.** Premium carbonization technology for a valuable business proposition. [Online] n.d. [Viitattu: 28. 10 2025.] <https://pyreg.com/our-technology/>.
23. **BioMacon GmbH.** Products. [Online] 2020. [Viitattu: 28. 10 2025.] <https://www.biomacon.com/produkte?lang=en>.
24. **Salo, E., Siipola, V., Raitila, J., Björnström, M. & Karlsson, M.** *Biohiili osana suomalaista biotaloutta.* s.l. : Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2025. Asiakasraportti. VTT-CR-00466-25.
25. **Hohteri, H.** Lyökö valtavan kasvuvoimainen paju tällä kertaa läpi? Entinen turvesuo puskee unohdettua puulajia biohiilen raaka-aineeksi. [Online] Maaseudun Tulevaisuus, 26. 9 2021. [Viitattu: 30. 10 2025.] <https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/metsa/4df27363-8d77-5d27-b404-163678dea738>.
26. **Yritysmailma.** Raussin pyrolyysilaitte tekee jätetuusta arvokasta biohiiltä. [Online] 29. 6 2020. [Viitattu: 28. 10 2025.] <https://yritma.fi/uutiset/maa-ja-metsatalous/raussin-pyrolyysilaitte-tekee-jatetuusta-arvokasta-biohiilta>.
27. **GRK Suomi Oy.** Biohiili osana infrarakentamisen kiertotaloutta. *Biohiili osana kestävyysmurrosta - seminaari 25.9.2024.* [Online] 25. 9 2024. [Viitattu: 9. 12 2025.] https://www.bioenergia.fi/wp-content/uploads/2024/09/7_Case_GRK_Sormunen_Biohiiliseminaari_25.9.2024.pdf.
28. **Karelian Paju Oy.** Karelian Paju - High-end biochar on industrial scale. [Online] 2025. [Viitattu: 28. 11 2025.] <https://www.karelianpaju.fi/wp-content/uploads/2025/02/Karelian-Paju-company-presentation.pdf>.
29. **Luoma, H.** PUHI Oy – Purkupuusta biohiiltä. *Puumies-lehti.* 18. 12 2024.
30. **Soilcare Oy.** SoilCaren Amacee-biohiililaitoksilla laadukasta biohiiltä. [Online] n.d. [Viitattu: 4. 12 2025.] <https://www.soilcare.fi/amacee-biohiililaitokset>.
31. **GRK Suomi Oy.** Biohiilen käyttö viherrakentamisessa. [Online] 20. 12 2023. [Viitattu: 5. 12 2025.] https://www.grk.fi/wp-content/uploads/2024/01/biohiilen-kaytto-viherrakentamisessa_grk.pdf.
32. **Carbons Finland Oy.** Biohiilien laatukriteerit. [Online] 2023. [Viitattu: 5. 12 2025.] <https://carbons.fi/wp-content/uploads/2023/12/Carbons-tuotekortti-biohiilien-laatukriteerit-2024.pdf>.

33. **Rasa, K., Viherä-Aarnio, A., Rytönen, P., Hyväluoma, J., Suhonen, H., & Jyske, T.** Quantitative analysis of feedstock structural properties can help to produce willow biochar with homogenous pore system. *Industrial Crops and Products*. 8 2021, 166.
34. **Wang, C., Wang, T., Li, W., Yan, J., Li, Z., Ahmad, R., Herath, S. & Zhu, N.** Adsorption of deoxyribonucleic acid (DNA) by willow wood biochars produced at different pyrolysis temperatures. *Biology and Fertility of Soils*. 2014, Osa/vuosik. 2014, 50.
35. **Rasa, K., Heikkinen, J., Hannula, M., Arstila, K., Kulju, S. & Hyväluoma, J.** How and why does willow biochar increase a clay soil water retention capacity? *Biomass and Bioenergy*. 2018, Osa/vuosik. 2018, 119.
36. **Välinen, N. & Tuohiniitty, H.** Suositukset biohiillelle maaperäkäytössä. [Online] Bioenergia ry, 2024. [Viitattu: 27. 11 2025.] https://www.bioenergia.fi/wp-content/uploads/2024/12/Suosituksset_biohiillelle_maaperakaytossa_29.11.2024.pdf.
37. **Riikonen, A.** *Biohiili ja sen käyttömahdollisuudet viherrakentamisessa*. Kaupunkiympäristön julkaisuja 2019:19 . s.l. : Helsingin kaupunki / Kaupunkiympäristön toimiala, 2019.
38. **Laird, D. & Rogovska, N.** Biochar effects on nutrient leaching. [kirjan tekijä] J. Lehmann & S. Joseph (toim.). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. s.l. : Taylor & Francis Group, 2015.
39. **Thomsen, T.P.** *Introduction to Production and Use of Biochar 2022: working towards a more circular and bio-based Danish economy*. s.l. : Roskilde Universitet, 2022.
40. **Mattila, T., Suonperä, E. & Heinola, H.** Biohiili osana biokaasun tuotannon arvoketjua. [Online] Oulun ammattikorkeakoulu, 1. 12 2025. [Viitattu: 5. 12 2025.] <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe20251201113081>.
41. **Hyväluoma, J.** *Biohiili maanparannusaineena pohjoismaisissa olosuhteissa*. 2025. Diaesitys.
42. **Heikari, J.** *Biohiilen käytön mahdollisuudet maataloudessa*. s.l. : Savonia-ammattikorkeakoulu, 2025.
43. **Qomariyah, N., Ella, A., Ahmad, S. N., Yusriani, Y., Miftakhus, M. S., Prihambodo, R., Retnani, Y., Jayanegara, A., Wina, E. & Permana, I. G.** Dietary biochar as a feed additive for increasing livestock performance: A meta-analysis of in vitro and in vivo experiment. *Czech Journal of Animal Science*. 2023, Osa/vuosik. 2023, 68(2).
44. **Gerlach, H. & Schmidt, H-P.** Biochar in poultry farming. [Online] Biochar Journal, 1. 8 2014. [Viitattu: 28. 11 2025.] <https://www.biochar-journal.org/en/ct/10>. ISSN 2297-1114.
45. **Ruokavirasto.** Vaatimukset rehualan toimijoille. [Online] Ruokavirasto, 2024. [Viitattu: 21. 1 2026.] <https://www.ruokavirasto.fi/elaimet/rehut/vaatimukset-rehualan-toimijoille/>.
46. **EBC.** 'European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar.' *Carbon Standards International (CSI)*. Frick, Swizerland : s.n., 2012-2025. Version 10.5E from 14th August 2025.
47. **Peltola, R., Rasa, K., Heiskanen, J., Ruhanen, H., Uotila, K., Vikki, K., Leinonen, I., Ranta, K., Hietanen, J., Tornivaara, A., Pietilä, R., Lahtinen, T., Kuva, J., Heikkilä, P. & Liwata-Kenttälä, P.** *Biokiertotaloudesta uusia ratkaisuja kaivosten jälkihoitoon - Kierroksia biopeittoon -hankkeen*

loppuraportti (Biopeitto 2). Helsinki : Luonnonvarakeskus (Luke), 2023. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus. 86/2023.

48. **Rytkönen, E.** Kaivosjätteen peittämiseen löytyi uusi keino – Suomen kaikesta jätteestä 75 prosenttia tulee kaivoksista. [Online] YLE, 12. 9 2023. [Viitattu: 27. 11 2025.] <https://yle.fi/a/74-20049560>.

49. **Siipola, V., Romar, H. & Lassi, U.** Microplastic removal from water and wastewater by carbon-supported materials. *Sustainable Biochar for Water and Wastewater Treatment*. 2022.

50. **Siipola, V., Pflugmacher, S., Romar, H., Wendling, L. & Koukkari, P.** Low-Cost Biochar Adsorbents for Water Purification Including Microplastics Removal. *Applied Sciences*. 2020, Osa/vuosik. 10(3), 788.

51. **Gong, H., Tan, Z., Zhang, L. & Huang, Q.** Preparation of biochar with high absorbability and its nutrient adsorption–desorption behaviour. *Science of The Total Environment*. 12 2019, Osa/vuosik. 2019, Volume 694.

52. **Perez-Mercado, L., Lalander, C., Berger, C. & Dalahmeh, S.** Potential of Biochar Filters for Onsite Wastewater Treatment: Effects of Biochar Type, Physical Properties and Operating Conditions. *Water*. 2018, Osa/vuosik. 2018, 10(12).

53. **Knuuti, S., Markkanen, T. & Regårdh, E.** Kaupungin infra - biohiili viherrakentamisessa Helsingissä. [Online] Helsingin kaupunki, 25. 9 2024. [Viitattu: 11. 28 2025.] https://www.bioenergia.fi/wp-content/uploads/2024/09/3_Knuuti_Helsingin_kaupunki_Biohiili-viherrakentamisessa_Biohiiliseminaari_25.9.2024.pdf.

54. **Carbons Finland Oy.** CARBONS FILTER -biosuodatusratkaisuja. [Online] 2021. [Viitattu: 28. 11 2025.] <https://carbons.fi/wp-content/uploads/2021/06/Carbons-Filter-kiinteisto-TUOTEKORTTI.pdf>.

55. **Kim, J., Han, S.-D., Koo, B., Lee, S.-H. & Yang, J.** Structure Dependent Electrochemical Behaviors of Hard Carbon Anode Materials Derived from Natural Polymer for Next-Generation Sodium Ion Battery. *Polymers*. 2023, 15, 4373.

56. **Stora Enso.** Lignode®: Puiden teho hyötykäyttöön. [Online] n.d. [Viitattu: 15. 12 2025.] <https://www.storaenso.com/fi-fi/products/lignin/lignode>.

57. **Hakala, J., Kangas, P., Penttilä, K., Alarotu, M., Björnström, M. & Koukkari, P.** *Replacing Coal Used in Steelmaking with Biocarbon from Forest Industry Side Streams*. s.l. : Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2019. VTT Technology 351.

58. **Björk, A.** Replacing fossil coke with biocoke in Outokumpu. [Online] Outokumpu Oyj, 2025. [Viitattu: 28. 11 2025.] https://cc.oulu.fi/~kamahei/m/477423S/2025/NSD2025_ArvoBjork.pdf.

59. **Outokumpu Oyj.** Outokumpu rakentaa Tornioon biokoksin briketöintilaitoksen nopeuttaakseen suorien päästöjen vähentämistä. [Online] 18. 12 2023. [Viitattu: 28. 11 2025.] <https://www.outokumpu.com/fi-fi/news/2023/outokumpu-rakentaa-tornioon-biokoksin-briketointilaitoksen-nopeuttaakseen-suorien-paastojen-vahentamista-3375120>.

60. —. Outokumpu investoi biohiilitehtaaseen Saksassa vähentääkseen entisestään suorien päästöjään. [Online] 4. 12 2024. [Viitattu: 28. 11 2025.] <https://www.outokumpu.com/fi-fi/news/2024/outokumpu-investoi-biohiilitehtaaseen-saksassa-vahentaakseen-entisestaan-suoria-paastojaan-3524652>.

61. **Sweco Finland Oy.** Digipolis Biohiilen teknologiaselvitys. [Online] 2024. [Viitattu: 15. 12 2025.] https://static1.squarespace.com/static/62bd38319e995a0965dc9306/t/664f1d5c0613582d00746a45/1716460926625/Biohiilen+teknologiaselvitys+-+Loppuraportti_Lopullinen.pdf.
62. **Dunderfelt, A., Sourander, M. & Lämsä, A.** Biohiilen vaikutus betonin hiilijalanjälkeen. [kirjan tekijä] A. & Sourander, M. (toim.) Dunderfelt. *Biohiilen mahdollisuudet ja haasteet betonin raaka-aineena*. Mikkeli : Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, 2023.
63. **Puro.earth.** Puro Registry for durable carbon. *Retirements*. [Online] 2025. [Viitattu: 27. 11 2025.] <https://registry.puro.earth/retirements>.
64. **Juva, Katri.** Hiilensidonnasta kannustimia pajun viljelyyn? [Online] Satafood Kehittämisyhdistys ry, 8. 9 2025. [Viitattu: 27. 11 2025.] <https://www.satafood.net/ajankohtaista/hiilensidonnasta-kannustimia-pajun-viljelyyn/>.
65. **Euroopan Komissio.** Carbon Removals and Carbon Farming. [Online] 2025. [Viitattu: 27. 11 2025.] https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-removals-and-carbon-farming_en.
66. **Puro.earth.** Biochar Methodology. *Edition 2022 V3*. [Online] 1. 2 2024. [Viitattu: 27. 11 2025.] <https://7518557.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/7518557/Supplier%20Documents/Puro.earth%20Biochar%20Methodology.pdf>.
67. **Ruuttunen, P.** *Selvitys pyrolyysitiseiden käyttöön lietteen hapotuksessa ja biostimulanttina liittyvistä viranomaisvaatimuksista ja hyväksyttämispoluista*. Jokioinen : Luonnonvarakeskus, 2024.
68. **Siipola, V., Koukkari, P., Hakala, J., Seppälä, O., Björnström, M. & Karlsson, M.** *Metsäteollisuuden sivuvirroista valmistetun biohiilen käyttö jätevesien puhdistukseen-PurCar*. Espoo : Teknillinen Tutkimuskeskus VTT Oy, 2021. VTT-R-293-21.
69. **Kemianteollisuus ry.** Terva rekisteröitiin ajoissa. [Online] 30. 5 2018. [Viitattu: 12. 11 2025.] <https://www.kemianteollisuus.fi/terva-rekisteroitiiin-ajoissa/>.
70. **ECHA.** ECHA Chemicals database. *Tar, pine*. [Online] n.d. [Viitattu: 12. 11 2025.] <https://chem.echa.europa.eu/100.029.429/overview?searchText=8011-48-1>.
71. **Hagner, M., Tiilikkala, K., Lindqvist, I., Niemelä, K., Wikberg, H., Källi, A. & Rasa, K.** Performance of Liquids from Slow Pyrolysis and Hydrothermal Carbonization in Plant Protection. *Waste Biomass Valor.* 2020, Osa/vuosik. 2020, 11, ss. 1005-1016.
72. **Ruuttunen, P.** Pyrolyysinesteiden hyödyntäminen maa- ja puutarhataloudessa ja siihen liittyvä EU-regulaatio. [Online] Luonnonvarakeskus, 19. 3 2025. [Viitattu: 12. 11 2025.] https://kaustisenseutu.fi/site/assets/files/13140/hiilekas_pyrolyysitise_luke2.pdf.
73. **Luonnonvarakeskus.** Liiketoimintamahdollisuudet. *Nestemäinen ja biohajoava puutarhakate rikkakasvien hallintaan*. [Online] n.d. [Viitattu: 12. 11 2025.] <https://www.luke.fi/fi/palvelut/nestemainen-ja-biohajoava-puutarhakate-rikkakasvien-hallintaan>.
74. **Yrjölä, K. & Peltonen, S.** Lietteiden happokäsittelyllä typpi paremmin talteen. [Online] 2019. [Viitattu: 11. 12 2025.] https://varsinais-suomi.mtk.fi/documents/197812/258504/Tuorla060619_Lietteiden_happokasittely_Yrjola_Karoliina.pdf/1016bdab-98bb-4821-74d7-762ac24857e0?t=1560333184986.

75. **Keskinen, R., Hyväluoma, J., Wikberg, H., Källi, A., Salo, T. & Rasa, K.** Possibilities of Using Liquids from Slow Pyrolysis and Hydrothermal Carbonization in Acidification of Animal Slurry. *Waste and Biomass Valorization*. 2018, Osa/vuosik. 2018, 9.
76. **Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes).** REACH - Rekisteröinti, luvat ja rajoitukset. [Online] n.d. [Viitattu: 13. 11 2025.] <https://tukes.fi/kemikaalit/reach#2181073c>.
77. —. Aineen tunnistaminen. [Online] n.d. [Viitattu: 13. 11 2025.] <https://tukes.fi/reach/rekisterointi/aineen-tunnistaminen>.
78. —. REACH-rekisteröinti. [Online] n.d. [Viitattu: 13. 11 2025.] <https://tukes.fi/kemikaalit/reach/rekisterointi>.
79. **European Chemicals Agency (ECHA).** REACH-asetus tutuksi. [Online] n.d. [Viitattu: 14. 11 2025.] <https://echa.europa.eu/fi/regulations/reach/understanding-reach>.
80. **Prévention du Risque Chimique.** Rekisteröintivelvollisuus. [Online] n.d. [Viitattu: 14. 11 2025.] https://www.prc.cnrs.fr/reach/fi/registration_obligation.html.
81. **European Chemical Agency (ECHA).** Q&A 1514: What is the status of pre-registrations? [Online] 18. 12 2019. [Viitattu: 14. 11 2025.] <https://qnapublic.echa.europa.eu/QnA/QnA?id=5812>.
82. **Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes).** Kasvinsuojeluaineet. [Online] n.d. [Viitattu: 14. 11 2025.] <https://tukes.fi/kemikaalit/kasvinsuojeluaineet#ffc0b875>.
83. —. Tehoaineiden riskinarviointi ja hyväksyminen. [Online] n.d. [Viitattu: 14. 11 2025.] <https://tukes.fi/kemikaalit/kasvinsuojeluaineet/tehoaineiden-riskinarviointi-ja-hyvaksuminen>.
84. **Ruokavirasto.** EU:n uusi lannoitevalmisteasetus (2019/1009). [Online] n.d. [Viitattu: 14. 11 2025.] <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/eun-uusi-lannoiteasetus/>.
85. **Euroopan parlamentti ja neuvosto.** Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2019/1009. [Online] 5. 6 2019. [Viitattu: 14. 11 2025.] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX%3A02019R1009-20220716>.
86. **Ruokavirasto.** Tuoteluokat ja ainesosaluokat. [Online] n.d. [Viitattu: 14. 11 2025.] <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/tuoteluokat-ja-ainesosaluokat/>.
87. **Turvallisuus- ja kemikaalivirasto.** CLP - Luokitus, merkinnät ja pakkaaminen. [Online] n.d. [Viitattu: 14. 11 2025.] <https://tukes.fi/kemikaalit/clp-luokitus-merkinnat-ja-pakkaaminen#2181073c>.
88. **Hämeen ammattikorkeakoulu Oy (HAMK).** *Wood2Biogas-hankkeen koetoiminnan tuloskooste*. 2024.
89. **Xylo Gas Oy . Solutions.** [Online] n.d. [Viitattu: 18. 11 2025.] <https://xylogas.net/#sec-a666>.
90. **European Biochar Industry EBI.** *European Biochar Market Report 2023 | 2024*. 2024.
91. **Salo, E., Weber, K., Hagner, M. & Näyhä, A.** Nordic perspectives on the emerging biochar business. *Journal of Cleaner Production*. 2024, Volume 475.
92. **Joensuun Uutiset.** Yrittäjyys ja kestävä kehitys yhdistyvät biohiilessä. *Joensuun Uutiset, Joensuun kaupungin verkkolehti*. 14. 11 2024.
93. **Karelian Paju Oy.** Karelian Paju. [Online] 2025. [Viitattu: 28. 11 2025.] <https://www.karelianpaju.fi/>.

94. **Hollmén, I.** Pajusta biohiiltä. *Bioenergialehti*. 12 2021.

95. **Tillaeus, J.** Huoltoasemien pöydissä ex-kukkarhurin ideaa pidettiin hulluna – kaavailee isoja pajupeltoja eri puolille maata: "Tanskan kollega sanoi, että puhelin soi koko ajan". [Online] YLE, 9. 3 2022. [Viitattu: 28. 11 2025.] <https://yle.fi/a/3-12350079>.

96. **Mansikkamäki, E.** Pajupojat aloittaa biohiilituotannon. *Maaseudun Tulevaisuus*. 19. 3 2016.

PAULI -
Pajuarvoketjuista
uutta liiketoimintaa

Satafood Kehittämisyhdistys ry

<https://www.satafood.net/hankkeet/pajuarvoketjusta-uutta-liiketoimintaa/>



Euroopan unionin
osarahoittama

