

Kyllästepuusta biohiileksi

**Käytöstä poistetun kyllästepuun prosessointi pyrolyysillä
uudeksi materiaaliksi**

Tiivistelmä

Tekijä(t) Värne, Eena	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika 2021
	Sivumäärä 27	
Työn nimi Kyllästepuusta biohiileksi Käytöstä poistetun kyllästepuun prosessointi pyrolyysillä uudeksi materiaaliksi		
Tutkinto Insinööri (AMK)		
Toimeksiantajan nimi, titteli ja organisaatio RAPUPUU-hanke, LUT-korkeakoulu, LAB-ammattikoekeakoulu		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tässä opinnäytetyössä on tutkittu terveydelle haitallisella kromattuja kupari-arseeeneja sisältävällä CCA-kyllästeaineella käsitellyn painekyllästetyn puun käyttöpotentiaalia biohiilenä. Useisiin maankäyttökohteisiin soveltuva biohiili valmistetaan pyrolyysi-nimisellä termokemiallisella prosessilla hapettomissa olosuhteissa. Tutkimus on tehty kirjallisuusselvityksenä osana Ympäristöministeriön rahoittamaa RAPUPUU-hanketta, joka pyrkii kehittämään käytöstä poistetun C- ja D-luokkiin kuuluvan jätteen uudelleenkäyttöä osana kiertotalouden malleja.</p> <p>Puhtaan puun pyrolyysi on prosessina tunnettu, mutta puunkäsittelyssä käytettyjen kyllästeiden sisältämien raskasmetallien vaikutusta prosessiin on käsitelty tieteellisissä julkaisussa vähän. Työn tavoitteena oli koota yhteen tätä tietoa. Osoittautui, ettei kyllästepuulle voida esittää yksiselitteistä pyrolyysiehdotusta, sillä useiden raskasmetallien yhteisvaikutusta on vaikea määrittää ilman käytännönkokeita.</p> <p>Arseenia ei tule olemaan mahdollista poistaa biohiilestä täysin. Lisäksi käsiteltyjen puiden pyrolyysissä vapautuu huomattavia määriä haitallisia kaasuja, joiden käsittelyn osalta tulee olla tarkka. Optimaalisen prosessilämpötilan ja prosessin keston löytämiseksi on tehtävä jatkokeitoita.</p>		
Asiasanat Kyllästepuu, kestopuu, pyrolyysi, biohiili, kiertotalous		

Abstract

Author(s) Värne, Eena	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2021
	Number of Pages 27	
Title of Publication Impregnated wood turned to biochar Reprocessing waste wood onto a new material with pyrolysis		
Name of Degree Engineer (UAS)		
Name, title and organization of the client RAPUPUU-project, LUT university, LAB university of applied sciences		
<p>Abstract</p> <p>In this thesis use of potential of CCA-treated impregnated wood as biochar is studied. CCA stands for chromated copper arsenics, and is classified as hazardous waste due to health risks. Work is done as a literature review as a part of RAPUPUU project that is funded by Finnish Ministry of the Environment as aim to develop resource smart uses for construction demolition wood in accordance with models of circular economy.</p> <p>Biochar has many uses in land use and it is processed via pyrolysis, a thermochemical treatment that happens in oxygen-free conditions. Even that pyrolysis is well-known for untreated wood, scientific literature offers fragmented information on how CCA agents effect the process. It's impossible to determine combined effects of several chemical compounds only based on theoretical texts.</p> <p>Arsenics are not possible to be removed completely from the char, and extensive amounts of harmful gases are produced during process and will need to be taken care of with special attention. Further empirical studies are needed to find optimal temperature and residence time.</p>		
<p>Keywords</p> <p>Impregnated wood, circular economy, CCA, pyrolysis, biochar</p>		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
2	Painekyllästetty puu.....	3
2.1	Yleistä painekyllästetystä puusta	3
2.2	Painekyllästetyn puun luokittelu.....	4
2.2.1	Puun kyllästäminen.....	5
2.2.2	Puunkyllästysaineiden vaikutus ihmisiin ja ympäristöön.....	6
3	Kyllästepuu jätteenä	8
4	Biohiili	10
5	Pyrolyysi	12
5.1	Pyrolyysin kuvaus.....	12
5.2	Puun reaktiot pyrolyysissä	12
5.3	CCA-puun pyrolysointi	14
6	Ehdotus kyllästepuun pyrolyysiprosessiksi.....	15
7	Yhteenveto	19
	Lähteet	21

Käytetyt lyhenteet

CCA	kromatut kupariarseenit
EVIRA	Elintarvikevirasto
NTR	Nordiska Träskyddsrådet, Pohjoismainen puunsuojaneuvosto
PAH	polysykliset aromaattiset hiilivedyt
RAPUPUU	Rakennus- ja purkujätteestä tehtyjen tuotteiden tuoteturvallisuus -hanke
TUKES	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
VOC	haihtuvat orgaaniset yhdisteet
VTT	Teknologian tutkimuskeskus Oy

1 Johdanto

Opinnäytetyö on tehty osana Ympäristöministeriön rahoittamaa ja LUT-yliopiston hallinnoimaa Rakennus- ja purkujätteestä tehtyjen tuotteiden tuoteturvallisuus (RAPUPUU) -hanketta, jossa kartoitetaan jätepuun uudelleenkäyttöpotentiaalia osana kiertotaloustavoitteita. Kiertotalous on talousmalli, jonka tavoitteena on kulutuksen, tuotteiden valmistuksen sekä näihin tarvittavien luonnonvarojen käytön sekä valmistukseen ja materiaalienjakautumiseen liittyen sosiaalisten tekijöiden osalta kestävä yhteiskunta (Sitra). Sen mukaan jätteiden määrää tulee vähentää esimerkiksi ohjaamalla niitä uusien tuotteiden valmistusmateriaaliksi näin vähentäen uusien luonnonvarojen käyttöä. Jopa 50 % maailman raaka-aineista kuluu rakentamisessa ja maassamme rakennussektori tuottaa yksittäisenä toimialana suurimman osan jätteistä. Niinpä jätemateriaalin uudelleenallokoinnilla voitaisiin säästää valtavasti luonnonvaroja. Vuosista 2003 ja 2005 (Huhtinen, 2007) saakka valtakunnallisessa jätesuunnitelmassa on ollut tavoitteena nostaa rakennusjätteiden hyödynnysaste 70 %:iin, ja sama tavoite toistui EU:n päätöksen (2008/98/EY) myötä vuodelle 2020. Toistuvasti tavoitteesta jäätiiin jälkeen melkoisesti. Puujätteen osuus työmailla syntyvästä jätteestä arvelaan olevan noin 20–40 % (Häkämies & Lehtonen 2019). Suomessa ei kuitenkaan ole kovinkaan paljoa jätemateriaalia hyödyntäviä kiertotaloutta edistäviä toimijoita, ja yksi syy tähän on kyllin pitkälle suunniteltujen ja toimiviksi testattujen liiketoimintamallien puute.

Painekyllästettyä puuta poistetaan käytöstä esimerkiksi rakennuspurkuoperaatioissa koko ajan enenevissä määrin. Se kuljetetaan ulkomaille energiapolttoon sen sijaan, että se hyödynnettäisiin paikallisesti, jolloin hyötyjinä olisivat niin kotimainen työvoima kuin raaka-aineen arvonn lisäyksestä ja uudesta tuotteesta hyötyvät kuluttajatkin. Puupohjaisesta rakennus- ja purkujätteestä ja nimenomaisesti painekyllästepuusta valmistettaville tuotteille tulee jatkossa olemaan suuri kysyntä, kun niiden tuoteturvallisuus saadaan varmistettua ja valmistusprosessia selkiytettyä.

Nykyään useiden puutuotteiden valmistuksessa on jo otettu huomioon kierrätettävyys varsinaisen käytön loputtua. Markkinoille on myös alkanut ilmestyä valmistusvaiheessa hukkapuuna sivuvirtoina vapautuvaa varsinaista käyttöään odottavaa puuainesta. Kuitenkin jo kertaalleen käytetyn, niin ikään jo olemassa olevan, puun käyttö materiaalina on harvinaista. Tämänkin puuaineksen käyttö voisi olla otettu mukaan osaksi tuotekehittelyä näin edistäen konkreettisesti kiertotaloustavoitteita.

Biohiili on tuotteena ollut jo kauan tunnettu, mutta sen valmistaminen purkupuusta on herättänyt kiinnostusta vasta viime aikoina. Sen valmistaminen painekyllästetystä puusta olisi eräs erittäin houkutteleva tapa saada puumateriaalia uuteen käyttöön, mikäli kyllästeen sisältämistä kemiallisista yhdisteistä ei koituisi ongelmaa valmistusprosessissa. Tämän opinäytetyön tarkoituksena on ollut selvittää valmistusprosessin mahdollisuuksia.

2 Paineekyllästetty puu

2.1 Yleistä painekyllästetystä puusta

Paineekyllästäminen on tehokas tapa vähentää sienten ja homeen otollista kasvualttiutta ja siten parantaa puun lahonkestävyyttä sekä ehkäisemään hyönteisten aiheuttamia tuhoja ja parantamaan sen UV-säteilyn kestävyttä. Puunsuojaa käytetään käytännössä aina puun ollessa kosketuksessa maan tai veden kanssa tai kun rakennelman tulee muutoin olla säälle alttiissa kohdassa ilman suojaa, ja puun kosteus ylittää 25 %. Paineekyllästettyä puuta käytetään niin laitureissa, terassi- ja puutarharakennelmissä sekä -kalusteissa kuin rata-pölkkyinä, tienvarsilla puhelin- ja lyhtypylväinä sekä aitoina. Kyllästeainein käsitelty puu on joko vihertävää tai ruskeaa, ja se painaa huomattavasti käsittelemätöntä puuta enemmän. Paineekyllästettyä puuta kutsutaan yleisesti kyllästepuuksi, ja alun perin tuotemerkin kautta tunnetuksi tullut termi kestopuu on myös yleisessä käytössä. (Puuinfo 2020)

Paineekyllästetyn puun pitkä käyttöikä onkin kuluneina vuosikymmeninä mielletty ekologisuudeksi. Kyllästetyn puun tulisi ulkokäytössä säilyä 3–5 kertaa kyllästämätöntä puuta kauemmin, jopa 30 tai 50 vuoden käyttöikään saakka, mikä toki vähentää selvästi korjaustarvetta ja uudella puulla korvaamista. Pitkää käyttöikää tukee se, ettei kyllästyksellä ole vaikutusta puurakenteen mekaanisille ominaisuuksille, kuten esimerkiksi lujuudelle. Paineekyllästetyn puun käyttäminen ei kuitenkaan ole erityisen ympäristöystävällistä, sillä valtaosa maassamme käytössäolevista kyllästepuista luokitellaan ongelmajätteiksi kyllästysprosessissa käytettyjen raskasmetallien vuoksi. Tämän takia käytöstä poistetut kyllästepuut, kuten kuvassa 1 oleva lavallinen, tulee toimittaa niille osoitettuun keräysjakeeseen, eikä tällaista puuta missään tapauksessa saa itse polttaa. (Puuinfo 2020)

Valtaosa käytöstä poistetusta ja purkupuusta päättyy jätteen energiapolttoon ulkomaisiin energianpolttolaitoksiin. Kotimaassa kyllästepuuta polttavat energialaitokset ovat suunniteltuvaiheessa kohdanneet laajaa vastustusta (Martikainen 2012; Yle 2018), minkä vuoksi ne eivät ole saaneet rakennus- tai toimintalupia. Se osa purkupuusta, joka ei ole kyllästepuuta, on usein maalein, liimoin ja lakoin kemiallisesti käsiteltyä ja siten likaantunutta. Menetelmiä käsiteltyjen puuainesten sisältämien haitallisten kemikaalien neutraloimiseksi ei nykyisellään ole. Jotta jo tuotteeksivalmistettu puutavara pystyttäisiin tavoitteellisemmin pitämään kierrossa, on kehitettävä käytänteitä, joilla taataan tuoteterveysmääräysten mukaisia turvallisia tuotteita haitallisia kemikaalipitoisuuksia sisältävistä mutta rakenteellisesti vielä käyttökuntoisista puumateriaaleista.

Suomessa suurin osa painekyllästetystä puusta on kotimaista mäntyä (Puuinfo 2020), ja se on samoin standardein valmistettua, kuin muu Pohjoismainen kyllästepuu, jota purkupuun

joukossa saattaa myös olla (Häkämies & Lehtonen, 2019). Siksi tässä työssä rajataan suureen määrään perustuen Pohjoismaiden ulkopuolella, muilla valmistusmetodeilla ja mahdollisesti erilaisia pitoisuuksia sisältävien painepuiden ominaisuudet sekä käsittely pois. Näiden painepuiden määrät jäteasemilla ovat kuitenkin arvioidusti pieniä.



Kuva 1. Paineekyllästettyä puuta odottamassa jatkokäsittelyä (Inkiläinen 2020)

2.2 Paineekyllästetyn puun luokittelu

Painepuun kyllästysmenetelmät, käytettävät aineet sekä laatuluokittelu perustuvat 1969 asti toiminnassa olleen Pohjoismaisen Puunsuojausneuvoston, NTR Nordiska Träskyddsrådetin, määrittelyyn, ja ovat yhteneväiset Suomessa, Ruotsissa, Norjassa ja Tanskassa. Kaikissa näissä maissa kyllästepuuta valmistetaan yleisimmin A- ja AB-luokkiin, joista A-puussa on kyllästeainetta enemmän. A-kyllästeluokan puu on paksuudeltaan yli 48 mm sahatavaraa, kun taas AB on kooltaan tätä pienempää (Puuinfo 2020). Kummassakin kylläste on oksakohtia ja muita mahdollisia puun luonnollisia muutoksia lukuun ottamatta imeytynyt yhtä syväälle puuhun. Myös vähemmän esiintyvää B-luokan, eli ennen painekäsittelyä muotoonsa työstettyä, kyllästepuuta saattaa tulla työmailla vastaan. B-luokan puussa on kyllästeaineen metalleja usein pienemmät pitoisuudet, joskin sekin luokitellaan haitalliseksi jätteeksi (Puuinfo 2020). Paineekyllästetyn puun luokittelu ilmaistaan kuvassa 2 olevalla leimalla, jossa on NTR-teksti, sekä oikealla olevaan kohtaan painetaan kyseisen erän luokittelu. Tämä leima löytyy jokaisesta puuerästä.



Kuva 2. NTR-merkintä (NTRa)

Jätepuu erotellaan neljään eri laatuluokkaan. A-luokan puu luokitellaan puhtaaksi puuksi, vaikka se saattaakin sisältää pienissä määrin mineraaleja. Tähän jätepuulajiin kuuluvat luonnontilaisen puubiomassan lisäksi kemiallisesti käsittelemättömät puujätteet ja esimerkiksi teollisuuden sivuvirrat. B-luokan puu sisältää kemiallisesti käsiteltyä puutähdettä, kuitutähdettä sekä puulevyjalosteita, jotka kuitenkin ovat pääosin puhtaita. Nämä kaksi puuluokkaa sortataan jäteasemilla usein erittelemättöminä yhteen, sillä niitä voidaan käsitellä samalla tavalla. RAPUUU-hankkeessa käsitellään kahden seuraavan jätepuuluokan käyttöä. C-luokan puu on lakkaamisella, maalaamisella tai muilla vastaavilla tavoilla pintakäsiteltyä. Saattaa sisältää orgaanisia halogeeniyhdisteitä ja PVC:tä. Harvoissa tapauksissa erittäin vähän pintakäsittelyainein käsitelty C-luokan puu saatetaan voida analyysien jälkeen kuitenkin käsitellä B-jäteluokan puuna. D-luokan puu on kyllästettyä puuta ja se luokitellaan vaaralliseksi jätteeksi. Kaikki painekyllästetty puu käyttökohteistaan riippumatta kuuluu luokkaan D. (VTT 2014)

Tekstissä käsittelen ensisijaisesti luokkia C ja D. On kuitenkin huomioitavaa, että usein jätepuun vastaanotossa ei erikseen huomioida A- ja B-luokkia, jolloin nekin käsitellään C-luokan jakeena ilman, että ne tarvitsisivat kaikkia samoja käsittelyjä. On myös huomioitava, että painekyllästettyä puuta saatetaan tuoda muun puun mukana jätelaitoksille, joista sitä olisi seulottava ennen puhtaampien puujakeiden jatkokäsittelyä.

2.2.1 Puun kyllästäminen

Kyllästysaineet imeytetään puuhun kyllästyssylinterissä joko kapillaarisesti, hydrostaattisesti tai diffuusiolla. Pohjoismaissa käytössäoleva menetelmä perustuu eurooppalaisiin standardeihin EN351-1 ja EN599 (NTRb) ja kyllästeaineet saatetaan puuhun veden ja paineen avulla (Puuinfo 2020). Freemanin ym. (2003) mukaan erilaisia painekyllästämismenetelmiä on kehitelty eri puolilla maailmaa jo 1800-luvun lopulla. Raportoidusti ainakin 1940-luvulta lähtien (EPA 2021) painekyllästys on tehty niin kutsutulla CCA-liuoksella, joka koostuu inorgaanisista kromatuista kupari-arseeneista, tarkemmin seoksesta, jossa on kromihappoa, kuparioksidia sekä arseenihappoa vesiohenteisena 0,5–6 massa%:n vahvuksena, kuten jo Saxe ym. (1964) määrittä. Nykyään kyllästysaineina voidaan käyttää kahta eri

tyyppejä, joista C-kylläste sisältää kuparia ja CC-kylläste puolestaan kromin ja kuparin yhdisteitä (TUKES).

Kemialliset kyllästeaineet imeytyvät vain pintapuussa olevan pehmeän solukon syvyyteen, eivätkä tavoita tukin kovaa sydänpuuta. Toisaalta männyn sydänpuussa itsessäänkin on lahoamista estäviä uutteita: tanniinit, ligniinit, flavonoidit ja stilbeenit, jotka tekevät kokonaan käsittelemättömän sydänpuun käyttämisestä kannattavaa. Luonnossa kuitenkin kaikki puut eivät kasva samanlaisiksi, ja satunnaisvaihtelut kuten maaperä ja kasvuolosuhteet voivat vaikuttaa paljon yksittäisen puun sisältämiin pitoisuuksiin. Lisäksi sydänpuuta on saatavilla vain rajoitetun verran. Niinpä mäntyöljyä onkin kehitetty markkinoille useamman yrityksen taholta minkä tahansa lautatavaran käsittelemistä varten. Nämä valmisteet ovatkin joihinkin olosuhteisiin sopiva vaihtoehto painekyllästekäsittelylle, ja ne ovatkin yleistymässä puunsuojauksessa. (Väärä & Boren 2012)

Vanhat painekyllästepuut sisältävät niin kutsuttuja suolayhdisteitä eli ympäristölle ja terveydelle haitallista kromia, arseenia ja kreosootia. Näiden aineiden käyttöä kyllästämässä on lakkautettu vaiheittain 2000-luvun alussa (TUKES) ja lopullisesti kielletty 2007 EU:n direktiivin (2006/139/EY) nojalla. Esimerkiksi USA:ssa kyseessä olevien kemikaalien käytöstä kuitenkin luovuttiin jo 2003 (EPA 2021). Nykyään kreosootin käyttö on sallittua vain teollisuudessa ja ammattikäytössä, eikä arseenia käytetä lainkaan. Vanhalla valmistustavalla tuotettua painekyllästettyä puuta ei kielletty myymästä uuden valmistustavan alettua, joten kaikki vanhat jo tuotetut varastot on myyty niin ikään kuluttajamarkkinoilla. On arvioitu, että vuonna 2005 CCA-käsiteltyä puuta olisi maailmanlaajuisesti n. 20 miljoonaa tonnia, joka on noin kaksi kolmasosaa kaikesta teollisesti käsitellystä puusta; kaikkineen puunkäsittelyyn oli tuolloin laskettu käytetyn noin 500 000 tonnia kyllästeaineita (Helsen & Van den Bulck 2005, 301). Arvioiden mukaan maailmassa vuosittain myytävästä 15 miljonnasta kuutiometristä CCA olisi yhä eniten käytetty kyllästeaine monissa maailmankolkissa, sillä se ei ole kaikkialla kielletty (Dos Santos ym. 2017, 1300).

2.2.2 Puunkyllästysaineiden vaikutus ihmisiin ja ympäristöön

Arseenin epäorgaaniset yhdisteet ilmassa, esimerkiksi puupölyssä, voivat aiheuttaa syöpää. Arseeni yhdisteineen luokitellaan syöpää aiheuttavaksi aineeksi hengitettynä tai nieltynä. Kyllästeaineessa esiintyvät kuusiarvoiset kromiyhdisteet (VI) luokitellaan syöpäsairautta aiheuttavaksi. Puuhun saatettuna kolmiarvoiseksi pelkistyneen kromin ei tiedetä aiheuttavan vaaraa. Kaikki kuusiarvoinen kromi ei kuitenkaan pelkisty puussa, vaan vanhasakin kyllästepuussa esiintyy kromi(VI):ttä. Kupari(II)oksidi on ihmiselle vain silmiä ja limakalvoja ärsyttävä, mutta sekin on haitallinen vesieliöille. (TTL 2017a)

Kreosootti on puusta, kivihiilestä sekä kreosoottipensaan pihkasta valmistettu käsittelyaine, joka sisältää lukuisia PAH-yhdisteitä, fenoleita sekä kresoleita. Se aiheuttaa iho-oireita sekä ärsyttää silmiä. Kreosootti aiheuttaa ärsytystä hengitysteille ja on vaarallista nieltynä ja saattaa aiheuttaa syöpää sekä heikentää hedelmällisyyttä, ja sen on todettu vaurioittavan sikiöitä. Se myös kerääntyy vesiympäristöön ja on vaarallista vesieliöille. (TTL 2017b)

Vanha arseenipitoinen kyllästepuu ei saisi joutua kosketuksiin elintarvikkeiden kanssa suoraan, eikä myöskään olla esimerkiksi hyllymateriaalina käytössä. Kyllästepuun käyttö sisätiloissa on aina kiellettyä. Esimerkiksi puutarhassa on suositeltua käyttää suojaa CCA-käsiteltujen kalusteiden kanssa, ja kädet suositellaan pestäviksi, mikäli kyllästepuuhun on koskenut. Suojakäsineitä ja -laseja sekä hengityssuojaa tulisi käyttää sitä työstäessä, ja puun hiomista hengitysteihin kulkeutuvan pölyn syntymisen vuoksi tulisi välttää. Sahaus- ja hiontapöly tulisi kerätä erilleen muusta puusta ongelmajätteelle sortattavaksi. Paineekyllästettyä puuta ei tule missään oloissa polttaa, ja kiello koskee yhtä lailla avotulta, suljettuja tiloja, kuten saunaa ja elintarvikkeiden läheisyyttä, kuten grillikäyttöä. (TUKES)

Arseeniyhdisteillä käsiteltyä puuta on jätetty myös virallisten tahojen tutkimusten ulkopuolelle. Esimerkiksi VTT:n (Asikainen 2015) tutkimuksessa, jonka tarkoituksena oli tutkia jättepuiden hyötykäyttöä teollisuudessa kuituna, päädyttiin ostamaan kuparikyllästettyä puuta uutena kaupasta, sillä purkupuun mahdollisesti sisältämästä arseenista ja kromista ei voitu olla varmoja. Hankittu puu myös kuidutettiin vain kemiallisesti muissa kuidutusprosesseissa todennäköisesti ilmaan vapautuvien raskasmetallisten puupölyjen välttämiseksi.

Ihokosketus kyllästepuun kanssa on oltava minimaalista niissä ammattimaiseen ja teollisuuskäyttöön suunnatuissa kohteissa, joissa puun rakenteellisen kestävyysvuoksi sitä on käytettävä tai joissa sillä on korvattava käsittelemätöntä puuta esimerkiksi rakennekohteen sijainnin aiheuttaman hankalan korjattavuuden vuoksi. Ihmisravinnoksi päätyvä karja tulisi suojata samoin periaattein kosketukselta.

Nykyisin puu kyllästetään tarkkojen yhteisten laatuvaatimusten ja standardien mukaisesti Suomen Ympäristökeskuksen hyväksymillä aineilla TUKESin valvomana. Kuitenkaan purkutilanteissa puun kyllästystapaa ja siten sen sisältämiä aineita ei voi silmämääräisesti puutavaran värin tai muiden ominaisuuksien perusteella päätellä. (Puuinfo 2020)

3 Kyllästepuu jätteenä

Kemiallisesti kyllästetyn puun kustannukset kasaantuvat yleensä käytöstäpoistovaiheeseen juuri jätteenkäsittely- ja logistiikkakustannusten sekä tavanomaista puutavaraa tarkemman käsittelyn ja sitä myöden lisääntyneiden työtuntien muodossa.

Jätepuun vastaanottomenetelmät sekä -tariffit vaihtelevat paljon eri alueiden jätelaitoksilla. Kaupallisessa purkutoiminnassa kerättävän käytöstä poistetun puun määrän arviointia hankaloittaa syntyvien jätevirtojen omistussuhteet rakennusurakoitsijoiden tai rakennuttajien omistamina. Purkajilla tai kuljetusyrityksillä ei ole virallista ilmoitusvelvollisuutta määristä taikka niiden aiotusta tai toteutuneesta käsittelystä, joten jätėjakeita vastaanottavilta laitoksilta saatava data on ainoa varma tieto käytöstä poistetun puun määrästä.

Jätelain 646/2011, 8 § mukainen etusijajärjestys eli jätelihierarkia, joka esitettynä kuvassa 3, velvoittaa kaiken käytöstä poistetun materiaalin erilaisten käyttöjen keskinäisen prioriteetin siten, että materiaalista olisi ensisijaisesti käyttämään uudelleen joko sellaisenaan taikka uudelleenprosessoinnin jälkeen uusiokäytössä. Vasta näiden käyttökohteiden jälkeen huomioidaan energiapoltto, jonka kyllästepuun tapauksessa voi suorittaa ainoastaan luvan saanut polttolaitos.



Kuva 3. Jätelihierarkia (Lakeuden etappi)

Euroopan jätedirektiivissä (2008/98/EY) ja sitä 2012 seuranneessa Suomen jätelaissa on velvoitettu jätesuunnitelmassa asetettu tavoite vuodelle 2020 saada 70 % kaikesta rakennusjätteestä kierrätetyksi, mutta tähän tavoitteeseen ei ylletty, ja useissa työmaakohteissa kierrätysprosentti on usein edelleenkin maksimissaan vain muutamia prosentteja.

(Wallenius 2020). Kuitenkin Åhlström (2020) toteaa, että tätä kierrätysastetta voitaisiin nostaa vain kolmella prosentilla, mikäli rakennusjätepuu kyllästepuuta lukuun ottamatta saataisiin ohjattua kierrätyskäyttöön. Purkupuun uudelleenkäyttö itsessään on siis hyvin pieni osa rakennusteollisuuden materiaalivirtaa. Kuitenkin purkupuun omana ryhmänään tarkasteltuna ovat suuri määrä materiaalia, jolle olisi arvokasta löytää energiapolttota merkittävämpää käyttöä. Myös jätelaissa (646/2011, 8 §) veloitetaan toimijan noudattamaan ensisijaisuusjärjestystä, jonka mukaan materiaalin hyötykäyttö erikseen arvotetuilla tavoilla on loppusijoitusta ja energiapolttota priorisoitavampaa.

Kyllästepuulle on ideoitu joitain uudiskäyttösovelluksia. Vaikka toistaiseksi sitä kehoitetaan välttämään sisätiloissa maalattunakin, olisi kyllästämisen haitta-aineet puuhun sitova maali eräs houkutteleva vaihtoehto uudelleenkäyttömahdollisuuksia lisäämään. Inkiläisen (2020) suorittamien liimauskokeiden perusteella voitaneen myös olettaa painekyllästetyn puun soveltuvan sen liimausominaisuuksien puolesta moniin samoihin sovelluksiin kuin käsittelemätönkin puu. Kuitenkin, vaikka kyllästepuu liimautuu puuteollisuudessa yleisellä PUR-liimalla, ei sillä varmaankaan kovin pian olisi sovellusta esimerkiksi puurakentamisessa monikerroslevyelementtien sisempinä kerroksina, sillä vaaralliseksi luokitellun puun yhdisteet saattaisivat kulkeutua huoneilman kosteuden mukana liimakerroksen läpi hengitettäväksi.

4 Biohiili

Biohiiltä voidaan käyttää monenlaisiin sovelluksiin maaseudulla ja urbaaniympäristössä. Se voi olla pienempää silppua tai koostua suuremmistakin vielä osin puun rakenteen säilyttä-neistä kappaleista, kuten kuvassa 4. Sitä voi käyttää esimerkiksi maanparantimena huleve-sialueilla tai pidättelemään kosteutta maassa (Saarnio & Kettunen 2020) kuivuusriskin alu-eilla, rikastuttamaan maaperää ravinneköyhillä viljelysalueilla (Karhu ym. 2011, 109-113) ja tasapainottamaan maaperän pH:ta tai imeytysaineena pilaantuneiden mai-den (Wang ym. 2021) ja sekä kotitalouksien että teollisuudenkin jätevesien puhdistuk- sessa perustuen hydroksyylien ja karboksyylien esiintymiseen biohiilen pin- nalla (Li ym. 2017) sekä huokoisuutensa ansiosta. Biohiili toimii myös erinomaisesti kom- postin parantimena (Kammann ym. 2017a), sillä se on sopiva alusta vilkkaalle mikrobtoi- minnalle (Heiskanen ym. 2020). Biohiili toimii hiilinieluna, eli se sitoo CO₂:ta käyttökohtee- seessaan maaperään (Kammann ym. 2017b).



Kuva 4. Biohiiltä (Hamk 2020)

Biohiiltä on katsottu voitavan valmistaa vain ns. Puhtaista jätepuun jakeista A ja B, ja tällä tuotannolla onkin jo pitkät perinteet. Kuitenkin puumateriaalissa mitattavissaolevat yhdiste- määrät eivät aina suoraan kerro mitään kyseisten kemikaalien biosaatavuudesta, sillä or- gaaniseen ainekseen kerran tarttuneet ja stabiilin molekyylimuodon saavuttaneet kemialli- set yhdisteet eivät välttämättä tule irtoamaan ilman rajuja ympäristöllisiä olosuhteidenmuu- toksia (Parmila & Saroha 2014, 309-310). Mahdollisesti ympäristöön huuhtoutunut kupari ja hiilen elektronegatiivisuus kuitenkin ovat yhä etenkin biohiiliviljelyssä kasveille (Vi- sioli ym. 2016) haitallista. Koko biohiilen toiminta perustuu tutumman aktiivihillen tavoin ad- sorbtioon, kemialliseen reaktioon, joka johtuu siitä, etteivät erittäin huokoisessa

kappaleessa olevat atomit ole kaikilta kohdin vierekkäisissä atomeissa tiiviisti kiinni, jolloin niillä on huomattavasti enemmän tarttumapintaa käytettävissäolevilla kemiallisten veto-voima- ja sitomisominaisuuksillaan. Jätepuusta tehdyssä biohiilessä olevien raskasmetallien liukeneminen ympäristöön on vähäistä neutraalissa (hapan-emäs-asteikon arvo 7) pH:ssa (Sørmo ym. 2020).

Biohiili kuuluu Euroopassa REACH-asetuksen piiriin, ja kaikilla kaupallisilla biohiilenvalmistajilla on tuotteilleen kemikaaliviraston ilmoitusvelvollisuus. Siitä seuraa mahdollisesti rekisteröintiä vaativat testaukset. Testausmenetelmät eivät alenna hiilen toimintakykyä. Testauksen tarkoituksena on selvittää sekä hiilestykseen käytetyssä hiilipohjaisessa biomateriaalissa valmiiksi olevat että termokemikaalisessa hiilestyksessä muodostuneet kemikaalit (EPA 2014). Suomessa Evira valvoo lannoitteeksi päätyvän biohiilen, joka on listanimeltään kasviperäinen kasvualustahiili, laatua (Elo, A.-K. 2020).

Ilman perinpohjaista metallien erotteluprosessia hiilestä eivät kaikki CD-puun sisältämät muut käsittelyaineet häviä, ja tällaisen biohiilen käyttökohteita on rajoitetusti. Sitä ei saa käyttää ravinnontuotantoon tarkoitettussa viljelyssä; muita käyttökohteita ovat maanparannuskäyttö joko kuivalle tai koristekasvatettavalle maalle ja maisemointi tai vesiensuodattaminen kaatopaikoilla tai teiden reunoilla. Kuitenkin, koska on oletettavissa, että suodattimena erityisen tehokkaaseen biohiileen tulee sen käyttöänsä aikana tarttumaan vielä monia erilaisia haitallisia aineita, ja että siinä alun perin sitoutuneiden metallien irrottaminen on suhteellisen tehokasta arseenia lukuunottamatta, ei CCA-pohjaisesta puusta valmistetulla biohiilellä nähdä olevan erityistä vaarapotentiaalia muussa käytössä. (Sørmo ym. 2020)

Lassilantuomi (2020) kuvailee erilaisia biohiilipohjaisia tulevaisuuden rakennusaineita, kuten sovelluksia asfaltin, betonin ja sementin lisäaineena tai eristeenä. Rakennusteollisuuden edustajille nämä ovat vielä vieraita, joskin houkutteleva tapa hyötykäyttää heillä jo olemassaolevaa puumateriaalia, mikäli se ei erityisesti aiheuttaisi lisävaivaa.

Biohiiltä valmistetaan joko osittain tai täydellisesti hapettomassa poltossa. Niinkutsuttu kuivatilaus eli pyrolyysi on yleisin prosessitoimenpide, ja siinä voidaan kerätä biohiilen lisäksi bioöljyä sekä -kaasua. Pyrolyysiä vähemmän tunnettu, mutta tehottomampi, menetelmä on hydroterminen hiilestys HTC. Tutkimuksissa on havaittu, että biohiilen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa jo valmistusvaiheessa esimerkiksi optimaalisen pH:n saavuttamiseksi pyrolyysilämpötilalla (Lehmann ym. 2006; Kloss ym. 2012). Lopputuotteena olevan hiilen fysiokemikaalisia ominaisuuksia voidaan myös parantaa esimerkiksi reagoivaa pintaa säätelemällä emäs-happokäsittelyllä (Senthil Kumar ym. 2011), ja sivutuotteina syntyvien nesteiden ja kaasujen määriin voidaan vaikuttaa lämpötilavalinnoilla.

5 Pyrolyysi

5.1 Pyrolyysin kuvaus

Pyrolyysi on kaikille orgaanisille aineille tehtävissäoleva termokemikaalinen 250–900 °C tapahtuva käsittely. Korkeassa lämpötilassa hapettomissa oloissa aineksen molekyylit erottautuvat toisistaan, kappale siis hajotetaan hallitusti. Puulle se lämpötila, jossa tämä aineksen kemialinen ja fysikaalinen hajoaminen, eli termostabiliteetin pettäminen, tapahtuu, on typpikaaussa noin 105 °C (Madison 1970). Hajoamisesta seuraa aina aineksen molekyylin muuntuminen toiseksi molekyyleiksi, jolloin tuotteella voi olla hyvinkin erilaiset ominaisuudet. Hiilestä pyritään saamaan hyvin imukykyinen, eli huokoinen, kuitenkin säilyttäen puun alkuperäinen selluloosarakenne. Pyrolyysin lopputuotteina on kiinteätä sekä nestettä ja kaasuja. Nämä kaasut voidaan ohjata palamaan prosessin aikana, jolloin energiaa säästy. Pyrolyysi on eksotermisen prosessi, eli sen aikana vapautuu energiaa. Hiilentuotannossa käytetään hitaaksi pyrolyysiksi kutsuttua menetelmää. Muita pyrolyysitapoja ovat nopea pyrolyysi, josta on mahdollista talteenottaa paljon kaasuja, sekä etenkin energiantuottoon käytetty kaasutus. (Elo, A.-K. 2020)

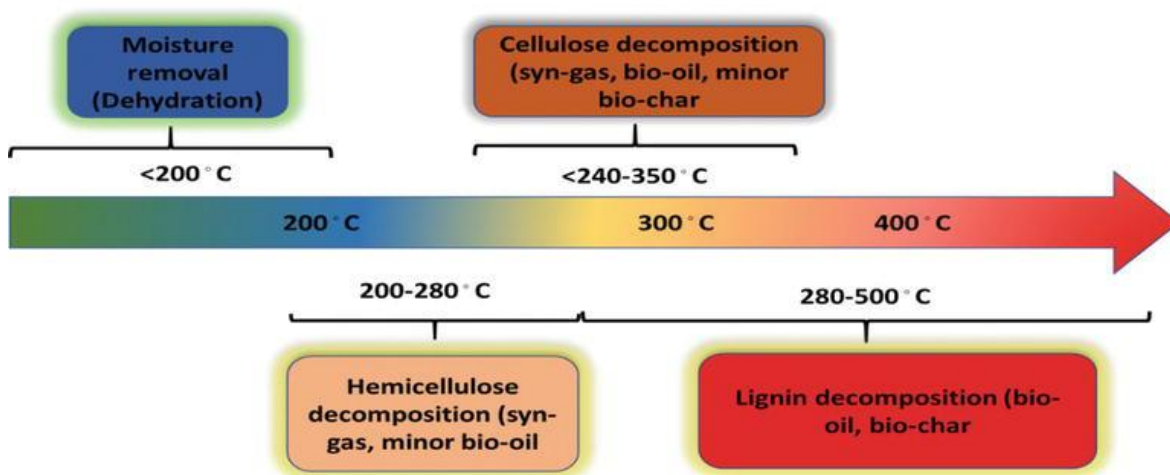
Prosessia ei tule sekoittaa puun lämpökäsittelyyn, jossa puun lujuusominaisuuksia ei juurikaan modifioida, eikä perinteiseen hiiltä ja vettä lopputuotteena tuottavaan hapelliseen polttamiseen tai hapellisissa oloissa tapahtuvaan kaasuttamiseen. Pyrolyysi ei myöskään ole polttamista, jossa palaminen tapahtuu reagoitien hapen kanssa.

Pyrolyysin on ajateltu tehostavan myös muovien kierrätystä. Kuitenkin vielä viime aikoina maassamme on ajateltu olevan liian vähän jakeisiin lajiteltua muovia kierrossa, mutta VTT:n WasteBusters-hankkeessa kuitenkin todetaan, että kattava pyrolyysivoimalojen verkosto saattaisi hyvinkin olla kannattava, ja tällä alalla yksittäisiä toimijoita jo onkin. Petrokemianteollisuudessa prosessista käytetään usein muita nimityksiä, kuten hydrotermisen nesteytys. Pyrolyysillä muovien pitkät ja monimutkaiset polymeeriketjut on mahdollista pitkällä kammioajalla pilkkoa hyvin lyhyiksi ketjuiksi, jolloin tuotetta olisi mahdollista jalostaa eteenpäin kemianteollisuudessa esimerkiksi suoraan dieseliksi tai muiksi polttoaineiksi kelpaaviksi jakeiksi. Kuivatistaus ei kuitenkaan ratkaisisi useita muita muovijakeen käsittelyn ongelmallisuuteen liittyviä ongelmia, kuten esilajittelun tehostamisen tarvetta. Toisaalta menetelmällä voidaan käsitellä osittain likaista ja roskaista muovia. (VTT 2019)

5.2 Puun reaktiot pyrolyysissä

Hapettomissa olosuhteissa käytetään usein argon- tai typpiliekkiä, ja puuhake lämmitetään tasaisesti ennalta-annettuun korkeaan lämpötilaan. Mikäli pyrolysoinnissa käytetään vielä

osin kosteata haketta, on sen kuivaamiselle prosessin alussa varattava kylliksi kammioaikaa matalalla, alle 300 °C, lämpötilalla. Biomassan lignoselluloosa pitkät polymeeriketjut, kuten selluloosa, hemiselluloosa, ligniini ja pektiini, alkavat hajoamaan 350–550 °C:n tietämillä, ja tämä lämpöhajoaminen saattaa hapettomissa oloissa jatkua n. 700 °C:hen saakka. Kuvassa 3 on indikoitu lämpötilat, joissa nämä hiilidydraatit irtaantuvat. Puun solurakenteiden pilkkoutuessa pienemmiksi molekyyleiksi vapautuu kaasuja, sekä kondensoitua nestettä (tervaa ja öljyä). Terva muodostuu 350–450 °C:ssa. Hiili saavuttaa olomuotonsa n. 350 °C:n lämpötilassa ja yli 450 °C:ssa puu alkaa dehydratoitua. Mikäli pyrolyysissä lämpötila nousee yli 800 °C:n, alkaa hiilestä kadota materiaalia liiallisen kaasunmuodostumisen vuoksi. Mahdollisimman pitkäkestoinen ja hallitusti alle 450–500 °C:ssa tapahtuvassa pyrolyysissä saadaan eniten hiiltä suhteessa nestemäisiin sivutuotteisiin.



Kuva 5. Puun hiilidydraattien irtaantuminen puusta eri lämpötiloissa (Zaman ym. 2017)

Pyrolyysin sivutuotteena muodostuva pyrolyysikaasu on sekoitus pääosin hiilimonoksidista (CO) ja vetymolekyylistä (H₂). Siinä esiintyy myös pienemmissä määrin hiilidioksidia (CO₂), metaania (CH₄), vettä (H₂O) sekä useita haihtuvia (VOC) yhdisteitä. Itsessään pyrolyysikaasua on kallista varastoida, ja yleisimmin sitä käytetäänkin biohiilientuotannossa voimalan energialähteenä. Bioöljy koostuu hapetettujen hiilivetyjen ja veden monimutkaisesta seoksesta. Sitä ei voi suoraan käyttää pyrolyysilaitoksessa, mutta on talteenotettuna arvokasta teollisuuden moniin erilaisiin käyttöihin myytäväksi.

Pyrolyysissä syntyy pääosin kahdenlaisia myrkyllisiä tuotteita: kuumennusreaktorissa 350 ja 600 °C:n lämmössä muodostuvat polyaromaattiset hiilivedyt (PAH) ja yli 1 000 °C:n kuumuudessa muodostuvat dioksiinit löytyvät usein pitoisuuksina hiilestä sekä öljystä pyrolyysin aikana (Sørmo ym. 2020). Dioksiineja on havaittu muodostuvan poltossa huomattavasti vähemmän silloin, kun reaktiossa on mukana metalleja. Uudempien kuparia sisältävien kestopuiden pyrolysoinnissa olisi siis pienempi huoli näiden päästökaasujen talteenotosta.

Todellisuudessa eri aikakausien kestopuita on kuitenkin vaivalloista, kallista ja todellisuudessa hyödytöntä erotella, kunhan voimalan talteenotto on CCA-puun päästöjen mukaisella tasolla.

5.3 CCA-puun pyrolysointi

Kyllästepuun prosessoiminen biohiileksi ei ole vuosikymmen sitten ollut tutkittu aihe, mutta kiinnostus on lisännyt myös kokeellisia hankkeita. On havaittu, että haitallinen CCA kaa-suuntuu kiinteäksi jäännökseksi (Bosmans ym. 2011, 711), joten se voidaan poistaa. Tätä Thermya-yrityksen teknologiaa ei kuitenkaan yrityskauppojen jälkeen ole hyödynnetty ja kehitetty. Uudessa Seelannissa Canterburyssa on testattu CCA-puun biohiilestystä osana tutkimussarjaa kyllästepuun käsittelyä turvalisemmaksi jätteeksi. Tässä koesarjassa myös liuotettiin kyllästepuuta kemikaaleilla sekä kaasutettiin metaaniksi. Testitulosten jälkeen menetelmiä ei ole kaupallistettu kannattavuuteen vedoten (Timonen, 2017).

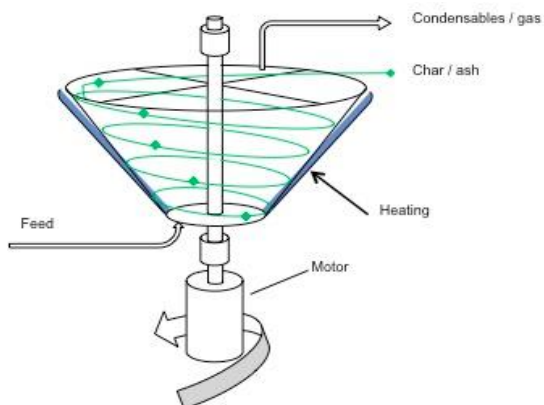
Yksittäisiä kiintoisia tutkimustuloksia, joista varmastikin on hyötyä sopivan prosessin löytämiseksi tulevaisuudessa, on tehty lukuisia. Esimerkiksi Hata ym. (2004) on mitannut arseenin poistuvan kaasuna pyrolyysiprosesista 400 °C:ssa. Tarkemman mittaustuloksen on saanut Cuypers & Helsen (2011), joiden mukaan arseeni ja kromi poistuvat nopeasti lämpötilan noustua yli 390 °C. Cuypers, Helsen on myös mitannut (pp. 116–117), että kromi muuttuu kaasuksi arseenia enemmän 310 °C lämpötilassa. Saman tutkimuksen mukaan etenkin suurempi kammiopaine matalamman lämpötilan kanssa yhdessä suuremman puuhakekoon kanssa säilyttää arseenia ja kromia puussa entisestään. Muiden prosessissa mukanaolevien kemikaalien vaikutus CCA-metallien reagointiin saattaa olla suuri (Kim ym. 2020), kuitenkin näitä ei ole vielä kyetty toistettavasti varmentamaan.

Käsittelyistä CD-jäteluokkien puista vapautuu enemmän haitallisia kaasuja, kuin puhtaasta puusta. Dunsmoor & Garcia-Perèz (2018) on raportoinut mm. Kloorin, typen sekä rikin pitoisuuksia. Stals ym. (2010) on havainnut, että puussa läsnä olevat kyllästeaineen kemikaalit vaikuttavat yleisesti puun rakenteen hajoamiseen termokemiallisessa kuumennuksessa, mikä saattaa vaikuttaa myös hiilen saantoon yleisesti optimaalisiksi tiedetyissä prosessiolosuhteissa.

6 Ehdotus kyllästepuun pyrolyysiprosessiksi

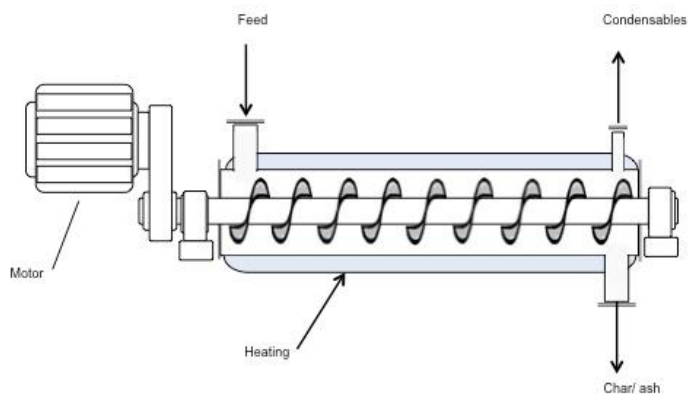
Biohiilentuotanto voidaan toteuttaa hyvinkin pienessä mittakaavassa, tai vaihtoehtoisesti toteuttaa suurissa teollisuusolosuhteissa. Jotta biohiilen tuotanto ei lisäisi kasvihuonekaasuja ja muuten pilaannuttaisi ilmaa, on biohiilivoimalan oltava tuotannossa syntyneet kaasut talteenottava ja joko poltettava ne biomassan poltossa tai varastoitava muuhun käyttöön. Biokaasun voi esimerkiksi myydä polttoaineeksi tai myydä sähköntuotantoon. Pyrolyysivoimaloita onkin mahdollista perustaa erilaisten puumateriaalia käsittelevien yritysten jo olemassaolevan infratraktuurin läheisyyteen, esimerkiksi maatiloille, sahojen tai jätteenkäsittelylaitosten yhteyteen, jolloin myöskään logistiikka ei aiheuttaisi ylimääräisiä kuluja tai päästöjä tuotantoon.

Kaupallisen biohiilen valmistus on tuotteen tasalaatuisuuden vuoksi haastavaa tasaisen lämmönjakuman sekä prosessia mahdollisesti häiritsevien nesteiden hallinnan vaikeuden vuoksi. Prosessi voidaan toteuttaa yhtä lailla jatkuvana tai kertatoimisena. Jatkuvakäyttöisen reaktorin hyötyihin voidaan lukea niin lopputuotteiden kuin sivutuotteidenkin talteenoton optimointi, vaikka prosessilinjaston alkukustannukset ovatkin suuret. Kaupallisia toimijoita Suomessa on toistaiseksi vain muutamia (Elo, 2020). Pyrolyysikammioita on lukuisia erilaisia, joista kaksi havainnollistettu seuraavissa kuvissa. Ensimmäinen, kuvassa 6, on kartiopyrolysaattori, joka kartion pyöriessä mahdollistaa syötetyn puuhakkeen tasaisen lämpiämisen tämän liikkumisen vuoksi. Hakkeen syöttö tapahtuu alhaalta, ja sivutuotteet poistuvat ylhäältä joko kaasuna tai tuhkana, joka kevyenä kohoaa ylös keskipakoisvoiman vuoksi.



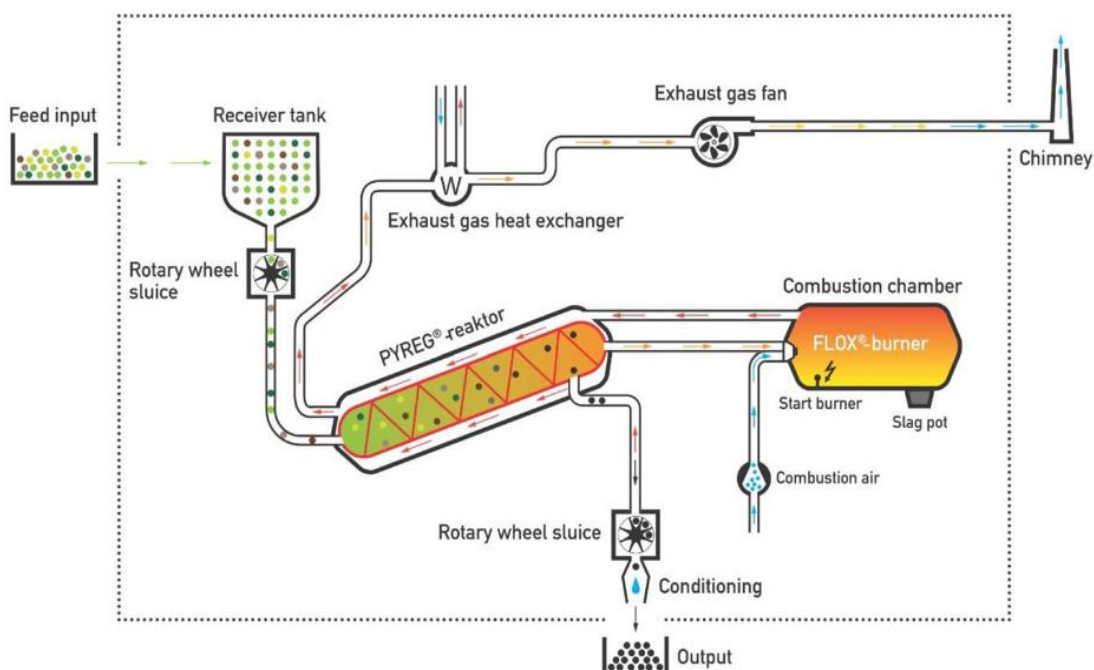
Kuva 6. Pyörivä kartiopyrolysaattori (Burgess Clifford)

Sylinterimallinen pyrolyysireaktori Auger on kuvassa 7. Biomassa syötetään siinä ruuvijohdattimella pyrolyysikammioon, jonka loppupuolelta kaasut ja kiinteät tähteet poistuvat omia kanaviaan pitkin. Auger on helppokäyttöisyydessään yleinen malli, jota on helppo valmistaa eri kokoisina saatavillaolevan materiaalin tai muiden valmistuskapasiteettien mukaan.



Kuva 7. Auger-pyrolysaattori (Burgess Clifford)

Sørmon ym. ehdottama pyrolyysikammio perustuu ns. Fluid bed -malliin, se on esitettyä kuvassa 8. Tässä mallissa pyrolyysi tapahtuu sylinteripolttimossa (Pyreg), ja tuotetut kaasut käsitellään liekittömästi erillisessä kammiossa (Flox).



Kuva 8. Mahdollinen pyrolyysikammio kyllästepuulle (Sørmon 2020)

Kyllästepuuta ei tarvitse erikseen kyllästeen osalta käsitellä ennen pyrolyysiä, sillä haitta-aineet voidaan kerätä talteen prosessin sivuvirroista. Toisaalta happoliuoksella tehtävää esiliuotusta, jossa arseenia sekä mahdollisen C-luokan puiden sisältämiä muita metalleja irtaota puusta, suositellaan (Ayiania & Garcia-Pèrez 2018, 98).

Aluksi puu haketetaan ja seulotaan. Murskaamisen ja hakettamisen seurauksena on pienempää puupalaa, johon prosessin aikainen lämpö tasaisemmin kulkeutuu. Murskaimen

käyttö saattaa olla leikkaamista parempi vaihtoehto jakeen pienimisessä, sillä sopivassa työstövälineessä liian suureksi jäävät osat voidaan kierrättää laitteessa uudestaan, ja mahdolliset mekaaniset liat irtoavat samalla helposti. Mikäli puu leikataan, on seulominen semmentille, betonille, hiekalle ja kiville tehokkain poistotapa, mutta nauloja sekä muuta metallia voidaan erotella myös magneetein.

Mikäli jätepuu kerätään vasta pyrolyysilaitoksella tai syntypaikkalajittelu muutoin ei ole ollut tehokasta, saattaa kyllästepuun mukana puuerässä olla aivan puhdasta puuta, tai mekaanisia epäpuhtauksia, pintakäsittelyaineita tai osa voi olla bioloisesti hajonnutta. Hakkeen tulisi olla kuivahkoa, kosteuden kannattaa olla maksimissaan 20 % (Elo, A.-K. 2020), tarkemmin on ehdotettu 10 % (Bridgewater ym. 1999). Kosteasta puusta erottuva vesihöyry saattaa häiritä prosessia, mutta ennen kaikkea kuivaa puuta prosessoimalla energiaa ei kulu yhtä paljoa. Hakkeen olisi oltava mahdollisimman tasakokoista, sekä pienehköä. Pyrolyysireaktio ei etene halkaisijaltaan yli 10 cm kokoisten hakepalojen sisäosiin, ja pienemmästä puusta pintajännite ei pidättelee VOC-kaasuja irtoamasta (Cuypers & Helsen 2011), jolloin prosessissa ei tarvita liian suurta lämpötilaa. Suositeltava koko olisi pituudeltaan 20–100 mm ja paksuudeltaan 10–70 mm. Puuhake syötetään pyrolyysikammioon, jossa puu lämmitetään tyypikaasulla normaalia termolyysiä selkeästi alemmalla lämpötilalla eli reilusti alle 100 °C (Yaashikaa ym. 2020).

Siinä osassa kammiota, jossa puuhake on, tulisi olla lämpötilansäädin, joka ei anna kuumuuden nousta yli 400 °C. Sopiva lämpötila on 380–400 °C, sillä näissä lämpötiloissa puun alkuperäinen rakenne hajoaa tehokkaimmin ilman, että menetetään hiilestystuotteen massaa, mutta arseeni vapautuu puun solukoista. CCA-puun pyrolyysille sopivaa kammioaikaa suhteessa puhtaan puun sopivalle käsittelyajalle ei toistaiseksi voinut päätellä kirjallisuudesta.

Koska haitallisten VOC-yhdisteiden syntyminen alkaa jo alemmassa lämpötilassa (Hata ym. 2004, 505; Greenberg ym. 2005, 85-87), kuin jossa hiiltä syntyy optimaalisesti (Yaashikaa ym. 2020), täytyy pyrolyysilaitoksessa aina pitää huolta toimivasta kaasujen lauhduttamisesta. On myös havaittu, että VOC-yhdisteitä muodostuu huomattavasti vähemmän, mitä enemmän lämpötila nousee yli 400 °C (Jindo ym. 2014, 6617) ligniinien aikaisen irtaantumisen vuoksi, joten on mahdollista, että CCA-puulle sopivin pyrolyysiprosessi olisi hyvin erilainen kompromissi, kuin puhtaan puun sallima. Tällöin suositeltava lämpötila eroaisi merkittävästi kirjallisuudessa puhtaalle puulle kuvaillusta.

Pyrolyysilaitoksessa tulee myös olla lauhdutin. Poistokanavasta nousevat kaasuvuot tulee välittömästi käyttää lauhduttimen (wet scrubber) kautta, jossa ne imeytyvät kostutettuun villa-puuvillasuodattimeen tai perinteiseen kalkkikivikalvoon, ja suodattunut puhdas ilma

pääsee läpi. Tällaisen poistomenetelmän lopputuloksena suodattimissa on hiilen ja lauhdutusnesteeseen seassa olevien pyrolyysikaasujen lisäksi kaikki haitallinen aine imeytyneenä tekstiiliin tai kalkkikiveen.

Kaikki kyllästepuussa olleet metallit ovat prosessin lopussa hiilijäännöksessä, joka olisi jatkokäsiteltävä jätteenä. Sitä on kuitenkin määrällisesti vähän, joten loppukäsittely tulee olemaan helppoa. On ehdotettu (Helsen 1998), että hiilestä voisi erotella haitta-aineet, jotka ovat kiinnittyneet hiilen onttoihin seinämäosioihin, asettamalla hiilet sentrifugiin, jonka jälkeen ne siivilöidään pneumaattisesti. Eritiheyksiset hiilenpalat ja metallit eroavat toisistaan metallien keräätyessä keräimen reunoille ja hiilen jäädessä keskiön keräimeen. Kromin on raportoitu olevan jäännöksessä kiinni jopa tiukemmin, kuin alkuperäisessä jätepuussa (Cuypers & Helsen 2011, 120).

7 Yhteenveto

Biohiilen tuottaminen vaikuttaa lupaavalta tavalta päästä turvallisesti eroon painekyllästetyn puun sisältämistä haitallisista kemikaaleista. Arseeni on kerättävissä hiilestyksessä muodostuneesta tuhkasta ja haitalliset kaasupäästöt voidaan kerätä poistoilman suodattimesta. Toisin sanoen pyrolyysi prosessina toimii jätteenkäsittelymenetelmänä erittäin tehokkaasti, ja koska se on mahdollista toteuttaa paikallisesti ilman pitkälistä logistiikkaa, sekä koska jätepuun uudelleenkäyttö on jätehierarkian mukaisesti tavoitteellisempaa kuin energiapoltto, on menetelmällä kaupallista potentiaalia. Kuitenkin, sillä arseenin irtoamiseen puusta tarvitaan erilaista lämpötilaa, kuin joka on suositeltu tavallisen puun hiilestykseseen, on prosessin yksityiskohdat vielä saatava selville. Pyrolysoinnin lopputuotteen ominaisuuksiin on mahdollista vaikuttaa prosessin aikaisten olosuhteiden ja keston vaihtelun kautta. Tällä hetkellä ei ole vielä täysin tiedossa, tuleeko painekyllästetystä puusta valmistettu biohiili olemaan käyttöominaisuuksiltaan puhtaasta puusta valmistetun hiilen kaltainen, ja sen käyttöä esimerkiksi jätevesien suodatuksessa ja hulevesien hallinnassa olisikin hyvä testata erilaisissa olosuhteissa.

Pyrolyysin käytön yleistymisestä tulee seuraamaan tarve kaupallisten menetelmien kehittämiseksi ja tehostamiseksi, ja se saattaa myös tarjota täysin uusien materiaalien nousun biohiilen raaka-aineeksi joko suuren materiaalitarjonnan tai erityiskysymykseksi nousseen käyttötarpeen vuoksi. Uusiutuvana monialaisena hyödykkeenä biohiili vastaa kiertotaloustavoitteisiin, joiden mukaan luonnonvaroja ei käytetä vain yhtä kertaa, vaan niille keksitään soveltuvien ehtojen mahdollisimman merkittävää jatkokäyttöä. Pyrolyysi prosessina on oiva keino lisätä arvoa käytöstä poistetulle puulle, joka uudelleenkäsittelyn jälkeen ei ole määritelmän mukaan enää jäte, vaan kaupallisesti arvokas materiaali.

Vaikka biohiiltä on käytetty maanparantimena ja suodattimena sekä lannoitustarkoituksissa jo hyvin kauan, ei monia sen toimintaan liittyviä yksityiskohtia vielä osata selittää, ja tutkimukset esimerkiksi mikrobipopulaatioiden vuorovaikutuksesta hiilen kanssa niin kompostoidessa kuin vesienpuhdistuksenkin yhteydessä tai reagoinnista kasvihuonekaasujen kanssa tulevat varmasti lisääntymään jatkossa. Myös hiilen sisältämien haitallisten kemiallisten yhdisteiden todellinen ympäristöön siirtyminen on selvittämättä. Nykyisin saatavilla olevan tiedon valossa biohiilen käyttö tuntuu perustellulta, sillä vaikka kaikkia haittavaikutuksia ei vielä tunneta, on siitä paljon ympäristöllistä hyötyä useissa sovelluksissa. Biohiilelle olisi kuitenkin suotavaa suorittaa elinkaariarviointia, kuten muillekin uusille markkinoilletuleville tuotteille. Näin voidaan myös varmistua menetelmän kannattavuudesta. Ongelmien ilmentyessä tuotantoteknisillä ratkaisuilla saattaa olla mahdollista kiertää ongelmat ja saada edelleen tavoiteltuun käyttöön soveltuva lopputuote. Uusien biohiilipohjaisten tuotteiden

markkinoinnissa on kuitenkin oltava maltillinen esimerkiksi niiden mahdollisesti aiheuttaman lisävaivan vuoksi.

Lähteet

Ayiania, M. & Garcia-Pérez, M. 2018. Quantification of Heavy Metals and Soluble Organic Pollutants in Biochar from Pyrolysis of Urban Wood Residuals and Compost Over. Advancing Organics Management in Washington State: The Waste to fuels. Technology Partnership 2015–2017 Biennium, 95-112. Viitattu 13.4.

Saatavissa <https://fortress.wa.gov/ecy/publications/SummaryPages/1807010.html>

Bosmans, A., Vanden Auweele, M., Govaerts, J. & Helsen, L. 2011. Exergy analysis of the Chartherm process for energy valorization and material recuperation of chromated copper arsenate (CCA) treated wood waste. Waste Managment, Volume 31:4, 705-713. Viitattu 13.4.2021. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.12.001>

Bridgwater, A. V., Meier, D. & Radlein, D. 1999. An overview of fast pyrolysis of biomass. Organic Geochemistry, Volume 30:12, 1479-1493. Viitattu 5.5.2021.

Saatavissa [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(99\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(99)00120-5)

Burges Clifford, C. e-education: 5.1 Biomass Pyrolysis. Viitattu 5.5.2021.

Saatavissa <https://www.e-education.psu.edu/egee439/node/537>

Cuyppers, F. & Helsen, L. 2011. Pyrolysis of chromated copper arsenate (CCA) treated wood waste at elevated pressure: Influence of particle size, heating rate, residence time, temperature and pressure. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Volume 92, Issue 1, 111-122 Viitattu 20.4.2021. Saaavissa <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.05.002>

Dunsmoor, A. & Garcia-Perèz, M. 2018. Identification of Volatile Compounds from Pyrolysis of Urban Wood Residuals and Compost Overs. Advancing Organics Management in Washington State: The Waste to fuels Technology Partnership 2015–2017. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <https://scholar.google.com/scholar?oi=bibs&cluster=17915858015144014063&btnI=1&hl=en>

Elo, A.-K. 2020. Biohiili osa 2 Kiertotalous AMK cc lisenssit. Hämeen amk. Viitattu 13.4.2021.

Saatavissa <https://kaltura.hamk.fi/media/Biohiili+osa+2+Kiertotalous+AMK+cc+lissenssit/02qbarsji>

EPA 2014. Method 8270D Semivolatile Organic Compounds By Gas Chromatography/Mass Spectrometry. Viitattu 13.4.2021. Saatavissa

<https://archive.epa.gov/epa/sites/production/files/2015-12/documents/8270d.pdf>

EPA 2021. United States Environmental Protection Agency. Overview of Wood Preservative Chemicals. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/overview-wood-preservative-chemicals>

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi jätteistä ja tiettyjen direktiivien kumoamisesta. 2008/98/EY. Viitattu 13.4.2021. Saatavissa <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=FI>

Euroopan Komission Direktiivi 2007/139/EY Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0139&qid=1623603098004&from=EN>

Freeman, M. H, Shupe, T. F., Vlosky, R & Barnes H. M. 2003. Past, Present, and Future of the Wood Preservation Industry. Forest Products Journal, Vol 53:10. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <http://fwrc.msstate.edu/pubs/preservation.pdf>

Greenberg, J.P., Friedli, H., Guenther, A. B., Hanson, D., Harley, P. & Karl, T. 2005. Volatile organic emissions from the distillation and pyrolysis of vegetation. Atmos. Chem. Phys. 6, 81-91 Viitattu 13.4.2021. Saatavissa www.atmos-chem-phys.org/acpd/5/9097/SRef-ID:1680-7375/acpd/2005-5-9097

Hata, T., Bronsveld, P., Kakitani, T., Meier, D., Kajimoto, T. & Imamura, Y. 2004. Capturing the arsenic fraction of CCA treated waste wood in the solid instead of in the gas phase during pyrolysis. Management of Environmental Quality. 502-508. Viitattu: 5.5.2021. Saatavissa <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/14777830410553942/full/html>

Hamk 2020 Biohiilestä bisnestä Hämeeseen. Viitattu: 27.5.2021. Saatavissa <https://www.hamk.fi/projektit/biohiili-biohiilesta-bisnesta-hameeseen/>

Heiskanen, J., Hagner, M., Ruhanen, H. & Mäkitalo, K. (2020). Addition of recyclable biochar, compost and fibre clay to the growth medium layer for the cover system of mine tailings: a bioassay in a greenhouse. Environmental Earth Sciences, 79(18), 1-16. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09154-5>

Helsen, L. & Van den Bulck, E. 2005. Review of disposal technologies for chromated copper arsenate (CCA) treated wood waste, with detailed analysis of thermochemical conversion processes, Environ, Pollut. 124 301–314. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.07.025>

Huhtinen, K., Lilja, R., Sokka, L., Salmenperä, H. & Runsten, S. 2007. Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2016. Suomen Ympäristö 2007:16. Edita Prima OY, Helsinki. Viitattu 13.4.2021.

Saatavissa https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38407/SY_16_2007.pdf

Häkämies, S. & Lehtonen, K. 2019. Puupohjaisen rakennus- ja purkujätteen määrä ja laatu, jakautuminen eri alajätejakeisiin sekä syntypaikat.

Puu rakentamisen kiertotaloudessa - seminaari. Viitattu 13.4.2021 Saatavissa <https://www.ym.fi/download/noname/%7BBF7F07A2-BFA9-4DDF-974E-6194B6A29AF4%7D/150868>

Inkiläinen, N. 2020 Kierrätetyn puun liimausominaisuudet. LAB-ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Viitattu:

23.3.2021. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2020111322777>

Jindo, K., Mizumoto, H., Sawada, Y., Sanchez-Monedero, M. A. & Sonoki, T. 2014. Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues, Biogeosciences, Volume 11:23, 6613–

6621. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <https://doi.org/10.5194/bg-11-6613-2014>

Jätelaki 646/2011, 8 §. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa

<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110646>

Kammann, C., Schmidt, H-P., Messerschmidt, N., Linsel, S., Steffens, D., Müller, C., Koyro, H-W., Conte, P. & Joseph, S. 2015a. Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar Scientific Reports, vol 5, Article number: 11080. Viitattu 20.4.2021. Saatavissa <https://doi.org/10.1038/srep11080>

Kammann, C., Ippolito, J., Hagemann, N., Borchard, N., Cayuela, M.L., Estavillo, J.M., Fuertes-Mendizabal, T., Jeffery, S., Kern, J., Novak, J., Rasse, D., Saarnio, S., Schmidt, H.-P., Spokas, K. & Wrage-Mönnig, N. 2017b. Biochar as a tool to reduce the agricultural greenhouse-gas burden—knowns, unknowns and future research needs. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 25, 114-139. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa https://www.researchgate.net/publication/318012798_Biochar_as_a_tool_to_reduce_the_agricultural_greenhouse-gas_burden_-_knowns_unknowns_and_future_research_needs

Kloss, S., Zehetner, F., Dellantonio, A., Hamid, R., Ottner, F., Liedtke, V., Schwanninger, M., Gerzabek, M. H. & Soja, G. 2012. Characterization of Slow Pyrolysis Biochars: Effects of Feedstocks and Pyrolysis Temperature on Biochar Properties. Journal of Environmental quality, Volume 41:4, 990-

1000. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0070>

Kim, J-Y., Oh, S., Park, Y-K. 2020. Overview of biochar production from preservative-treated wood with detailed analysis of biochar characteristics, heavy metals behaviors, and their ecotoxicity. Journal of Hazardous Materials, Volume

384. Viitattu 20.4.2021. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121356>

Karhu, K., Mattila, T., Bergström, I., & Regina, K. (2011). Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity—Results from a short-term pilot field study. Agriculture, Ecosystems & Environment, 140 (1), 309–

313. Viitattu 20.4.2021. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.12.005>

Lakeuden etappi. Jätehuolto osana arjen kiertotaloutta. Viitattu 13.4.2021. Saatavissa: <https://www.etappi.com/jateneuvonta/jatehierarkia-ohjaa-toimintaa/>

Lassilantuomi, S-S. 2020. Rakennusjätetä bioiilen raaka-aineena ja bioiilen käyttösovellukset rakennusalalla, Opinnäytetyö Hämeen amk. Viitattu 20.4.2021. Saatavissa <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2020110222081>

Lehmann, J., Gaunt, J. & Rondon, M. 2006. Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, Volume 11, 403–427. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5>

Li, H., Dong, X., da Silva, E.B., de Oliveira, L.M., Chen, Y. & Ma, L.Q. 2017. Mechanisms of metal sorption by biochars: biochar characteristics and modifications. Chemosphere, 178, pp. 466-478. Viitattu: 13.4.2021.

Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.072>

Madison, W. 1970. Thermal degradation of wood components: a review of the literature.

U.S.D.A. Forest Service, U.S. Department of Agriculture, Forest Products

Laboratory. Viitattu 13.4.2021. Saatavissa <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrp/fplrp130.pdf>

Martikainen, M. 2012. Arseenipeikko Parkanossa – Kestopuuta polttavan lämpövoimalaitoksen suunnitteluprosessi paikallislehti Ylä-Satakunnassa. Pro-Gradu -tutkielma. Tampereen yliopisto. Viitattu 5.5.2021.

Saatavissa <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/83238/gradu05655.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

NTRa Nordiska TräskyddsRådet. What is NTR.

Viitattu 13.4.2021. Saatavissa <https://www.ntr-nwpc.com/index.php/what-is-ntr/>

NTRb Nordiska TräskyddsRådet Nordic wood processing with quality to be proud of. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <https://www.nwpc.eu/index.php/nordic-wood-processing-with-quality-to-be-proud-of/>

TTL 2017a. Ova-ohje: Arseenipitoiset suolakyllästeet. Viitattu 20.4.2021. Saatavissa <https://www.ttl.fi/ova/ccakyll.html>

TTL 2017b. Ova-ohje: Kreosootti. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <http://www.ttl.fi/ova/kreosootti.html>

TUKES. Paineekyllästetyn puun käyttö ja hävittäminen. Viitattu 13.4.2021. Saatavissa <https://tukes.fi/kemikaalit/biosidit/biosidien-turvallinen-ja-kestava-kaytto/kyllastetty-puun-kayton-rajoitukset>

Parmila, D. & Saroha, A. K. 2014. Risk analysis of pyrolyzed biochar made from paper mill effluent treatment plant sludge for bioavailability and eco-toxicity of heavy metals. Bioresource Technology, Volume 162, 308-315. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.093>

Puuinfo 2020. Paineekyllästetty sahatavara. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <https://puuinfo.fi/puutieto/sahatavara-ja-sen-jalosteet/paineekyllastetty-sahatavara/>

Saarnio, S., & Kettunen, R. 2020. Biochar addition affected nutrient leaching and litter decomposition rates in boreal sandy soils. Agricultural and Food Science, 29:4, 287-296. Viitattu 20.4.2021. Saatavissa <https://journal.fi/afs/article/view/89559>

dos Santos, H. S., Suzana F. Ferrarini, Francine Q. Flores, Marçal J. R. Pires, Carla M. N. Azevedo, Lucie Coudert & Jean-François Blais. 2018. Removal of toxic elements from wastewater generated in the decontamination of CCA-treated Eucalyptus sp. and Pinus canadense wood. The Journal of Material Cycles and Waste Management, Vol. 20:2, 1299-1309. Viitattu 20.4.2021. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0694-1>

Saxe, J. K., Bowers, T. S. & Reynolds Reid, K. 1964. 13 – Arsenic. Environmental Forensic, Contaminant Specific Guide. 279-292. Viitattu 20.4.2021. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/B978-012507751-4/50035-5>

Sitra. Suomen itsenäisyyden juhlarahasto. Kiertotalous. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <https://www.sitra.fi/aiheet/kiertotalous/#mista-on-kyse>

Senthil Kumar, P., Ramalingam, S., Abhinaya, R.V., Thiruvengadaravi, K.V., Baskaralingam, P. & Sivanesan S. 2011. Lead(II) adsorption onto sulphuric acid treated

cashew nut shell. Sep. Sci. Technol., 46, 2436-2449. Viitattu 20.4.2021.

Saatavissa <https://doi.org/10.1080/01496395.2011.590174>

Stals, M., Thijssen, E., Vangronsveld, J., Carleer, R., Schreurs, S. & Yperman, J. 2010. Flash pyrolysis of heavy metal contaminated biomass from phytoremediation: influence of temperature, entrained flow and wood/leaves blended pyrolysis on the behaviour of heavy metals. Jour. Anal. Appl. Pyrolysis, 87, 1-7. Viitattu 13.4.2021.

Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.09.003>

Sørmo, E., Silvan, L., Thune, G., Gerber, H., Schmidt, H. P., Smeby, A. B. & Cornelissen, G. 2020. Waste timber pyrolysis in a medium-scale unit: Emission budgets and biochar quality. Science of the Total Environment, Volume 718. Viitattu 5.5.2021.

Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137335>

Timonen, V. 2017. Käytöstä poistettujen CCA-kyllästettyjen sähköpölväiden käsittelymahdollisuudet ja jälkimarkkinat. Lappeenranta teknillinen yliopisto. Diplomityö. Viitattu 16.11.2020. Saatavissa <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201801021012>

Visioli, G., Conti, F. D., Menta, C., Bandiera, M., Malcevski, A., Jones, D. L. & Vamerali, T. 2016. Assessing biochar ecotoxicology for soil amendment by root phytotoxicity bioassays. Environmental Monitoring and Assessment, Volume 188, Art 166. Viitattu 13.4.2021. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5173-y>

VTT: Käytöstä Poistetun Puun Luokittelun Soveltaminen Käytäntöön. 2014. VTT-M-01931-14. Viitattu 13.4.2021. Saatavissa https://www.bioenergia.fi/wp-content/uploads/2020/03/Kaytosta_poistetun_puun-soveltamisohje_Lokakuu2014.pdf

VTT: Huonolaatuinenkin muovijäte saadaan takaisin kiertoon termokemiallisella käsittelyllä. 11.6.2019. Viitattu 5.5.2021.

Saatavissa <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/vtt-huonolaatuinenkin-muovijate-saadaan-takaisin-kiertoon-termokemiallisella>

Väärä, T & Boren, H. 2012. Puun modifiointiklusteri: Loppuraportti. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, Tutkimuksia ja Raportteja Nr 84. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <http://urn.fi/URN:ISBN:1797-5972>

Wallenius, J. 2020. Purku- ja rakennusjätteen hyödyntäminen ja kierrätysaste korjausrakentamisessa. Opinnäytetyö Metropolia Ammattikorkeakoulu. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2020051912375>

Wang, J., Shi, L., Zhai, L., Zhang, H., Wang, S., Zoud, J., Shena, Z., Lian, C. & Chen, Y. 2021. Analysis of the long-term effectiveness of biochar immobilization remediation on

heavy metal contaminated soil and the potential environmental factors weakening the remediation effect: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 207.

Viitattu 13.4.2021. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111261>

Yaashikaa, P. R., Senthil Kumar, P., Varjani, S. & Saravanan, A. 2020. A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, Volume 28. Viitattu 13.4.2021.

Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>

Yle 2018. Kestopuuta ei polteta lämmöksi Hämeenlinnan Karanojalla – lähiseudun asukkaat iloitsevat. 19.11.2018 Viitattu 5.5.2021. Saatavissa <https://yle.fi/uutiset/3-10514655>

Zaman, C. D., Pal, K., Yehye, W. A., Sagadevan, S., Shah, S. T., Adebisi, G. A., Marliana, E., Rafique, R. F. & Johan, R. B. 2017. Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste. *InTech Open*. Viitattu 20.4.2021.

Saatavissa <https://www.intechopen.com/predownload/56034>

Åhlström, S. 2020. Biohiilen valmistaminen rakennusjätepuun käsittelyratkaisuna.

Opinnäytetyö Hämeen amk. Viitattu 20.4.2021. Saatavissa <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2020092920789>

