

Seulonnan vaikutus puupolttoaineen ominaisuuksiin

LAB-ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
2023
Samu Korjala

Tiivistelmä

Tekijä(t) Samu Korjala	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika 2023
	Sivumäärä 29	
Työn nimi Seulonnan vaikutus puupolttoaineen ominaisuuksiin		
Tutkinto ja koulutusala Insinööri (AMK), puutekniikan koulutus		
Toimeksiantajaorganisaatio (jos opinnäytetyöllä on toimeksiantaja) Kymenlaakson Jäte Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön päätavoitteena oli tutkia koneellisen seulonnan vaikutuksia eri polttoainefraktioiden ominaisuuksiin verrattuna seulomattomaan polttoaineeseen. Tutkimus tehtiin Kymenlaakson Jäte Oy:n antamana toimeksiantona. Kymenlaakson Jäte Oy:n omistamassa lämpökeskuksessa pääpolttoaineina käytetään kierrätyspuumursketta ja puistorisumursketta. Tarkoituksena oli parantaa ymmärrystä käytettävien polttoaineiden ominaisuuksista, mikä puolestaan mahdollistaa polttoprosessin tehokkaamman ohjauksen.</p> <p>Lämpökeskuksessa käytettävistä polttoaineista otettiin koe-erät, jotka seulottiin taseoulalla. Seulonnan tuloksena saadut eri fraktioiden massat punnittiin, ja niistä otetut näytteet lähetettiin laboratorioon tarkempaa analysointia varten. Tutkimuksen tulokset paljastivat eroavaisuuksia molempien polttoaineiden osalta. Erityisesti 0-25 fraktioon seulotuissa jakeissa havaittiin enemmän epätoivottuja ominaisuuksia.</p> <p>Opinnäytetyö tarjoaa tietoa siitä, miten koneellinen seulonta vaikuttaa polttoaineiden ominaisuuksiin, mikä voi auttaa optimoimaan lämpökeskuksen polttoprosessia. Tulokset viittaavat siihen, että seulonnalla voidaan vähentää epäpuhtauksia ja parantaa polttoaineille kohdistuvia laatuvaatimuksia.</p>		
Asiasanat Murske, biopolttoaine, lämpöarvo, fraktio		

Abstract

Author(s) Samu Korjala	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2023
	Number of Pages 29	
Title of Publication Effect of screening on wood fuel properties		
Degree, Field of Study Engineer of wood technology		
Organization of the client (if the thesis work is commissioned by another party) Kymenlaakson Jäte Oy		
Abstract <p>The main objective of the thesis was to investigate the effects of mechanical screening on the characteristics of different fuel fractions in comparison to unscreened fuel. The study was conducted as a commissioned project from Kymenlaakson Jäte Oy. In the district heat plant owned by Kymenlaakson Jäte Oy, recycled wood chips and park waste chips are used as the main fuels. The aim was to improve the understanding of the properties of the fuels used which in turn enables more efficient control of the combustion process.</p> <p>Test batches of the fuels used in the district heat plant were taken and they were screened with a scalper screen. The masses of the different fractions obtained after the screening were weighed and samples taken from them were sent to the laboratory for more detailed analysis. The results of the study revealed differences in both fuels. Particularly more undesirable properties were observed in the fractions screened into the 0-25 range.</p> <p>The thesis provides information on how mechanical screening affects the characteristics of fuels which can help optimize the combustion process in the district heat plant. The results suggest that screening can reduce impurities and improve fuel quality requirements.</p>		
Keywords Chips, Biofuel, Calorific value, Fraction		

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Kymenlaakson Jäte Oy	2
2.1	Yritys.....	2
2.2	Keltakankaan lämpökeskus.....	2
3	Puun käyttö ja luokitus Suomessa	4
3.1	Puun käyttö Suomessa.....	4
3.2	Puun ominaisuudet.....	5
3.3	Puupolttoaineiden luokitus.....	6
3.4	Käytöstä poistetun puun luokittelu	6
3.5	Polttoaineen vaikutus polttoprosessille.....	9
4	Analyysit.....	11
4.1	Biopolttoaineiden ominaisuuksia	11
4.2	Kokonaiskosteus ja irtotiheys	11
4.2.1	Kokonaiskosteus	11
4.2.2	Irtotiheys	11
4.3	Tuhkapitoisuus 550 °C ja 815 °C.....	13
4.4	Lämpöarvomääritys	13
4.4.1	Kalorimetrinen lämpöarvo.....	13
4.4.2	Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo	14
4.4.3	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa.....	14
4.4.4	Toimitettu energiamäärä.....	15
4.5	Alkuainemääritys ja alkuainepitoisuudet.....	15
4.6	Tuhkan sulamiskäyttäytyminen	16
4.7	Polttoaineen reaktiivisuus kaasutuksessa	17
5	Seulonta.....	19
6	Analyysitulokset	22
6.1	Puistorisumurskeen analyysitulokset.....	22
6.1.1	Kokonaiskosteus ja irtotiheys	22
6.1.2	Tuhkapitoisuus	22
6.1.3	Lämpöarvo.....	23
6.1.4	Alkuainemääritys	23
6.2	Kierrätyspuumurskeen analyysitulokset	24
6.2.1	Kokonaiskosteus ja irtotiheys	24
6.2.2	Tuhkapitoisuus	24

6.2.3	Lämpöarvo.....	24
6.2.4	Alkuainemääritys	25
6.3	Tuhkan sulamiskäyttämisen tulokset	26
7	Yhteenveto ja pohdinta	27
	Lähteet	28

1 Johdanto

Opinnäytetyön päätavoitteena on tutkia koneellisen seulonnan vaikutuksia eri polttoainefraktioiden ominaisuuksiin verrattuna seulomattomaan polttoaineeseen. Tutkimus toteutetaan Kymenlaakson Jäte Oy:n toimeksiantona. Yhtiön omistamassa lämpökeskuksessa pääpolttoaineina käytetään kierrätyspuumurskettä ja puistorisumurskettä. Tutkimuksen tarkoituksena on parantaa ymmärrystä käytettyjen polttoaineiden ominaisuuksista, mikä puolestaan mahdollistaa polttoprosessin tehokkaamman ohjauksen.

Opinnäytetyö tarjoaa tietoa siitä, miten koneellinen seulonta vaikuttaa polttoaineiden ominaisuuksiin, mikä voi puolestaan auttaa optimoimaan lämpökeskuksen polttoprosessia. Tulokset viittaavat siihen, että seulonnalla voidaan vähentää epäpuhtauksia ja parantaa polttoaineen laatuvaatimuksia.

Opinnäytetyössä käsitellään myös käytöstä poistetun puumateriaalin epäpuhtauksien luokittelua mekaanisiin ja kemiallisiin epäpuhtauksiin, sekä standardien ja ohjeiden merkitystä puupolttoaineiden laatuluokituksessa. Tutkimus tarjoaa tietoa siitä, miten erilaiset epäpuhtaudet voidaan erottaa ja käsitellä polttoaineissa.

Kymenlaakson Jäte Oy:n rooli jätehuollon alalla korostuu, ja yhtiö pyrkii käyttämään kehittyneitä ja ympäristöystävällisiä tekniikoita jätehuollon käsittelyprosesseissaan. Lämpökeskuksen käyttöönotto vuonna 2021 on osa yhtiön pyrkimystä tuottaa kaukolämpöä tehokkaasti ja ympäristöystävällisesti käyttäen pääasiassa kierrätyspuuta ja puistorisumurskettä pääpolttoaineena. Tämä opinnäytetyö tarjoaa tietoa sekä tutkimusalueensa erityispiirteistä että laajemmin jätehuollon ja kaukolämmöntuotannon yhteensovittamisesta. Työn tulokset voivat hyödyttää jätehuoltoalan toimijoita ja muita sidosryhmiä pyrittäessä kehittämään kestävämpää ja tehokkaampaa energiantuotantoa jätehuollon sivutuotteista.

2 Kymenlaakson Jäte Oy

2.1 Yritys

Kymenlaakson Jäte Oy perustettiin vuonna 1997 vastaamaan osakkaidensa jätehuoltoon liittyvistä tehtävistä. Yhtiö on täysin kuntien omistama ja voittoa tavoittelematon organisaatio. Vuodesta 2018 lähtien Kymenlaakson Jäte on eriyttänyt yritysjetten käsittelyn tytäryhtiönsä, Ekokaari Oy:hyn. Yhtiön päätavoitteena on hoitaa jätehuolto tehokkaasti, taloudellisesti ja ympäristöystävällisesti, noudattaen voimassa olevaa lainsäädäntöä ja määräyksiä. (Kymenlaakson Jäte 2023a.)

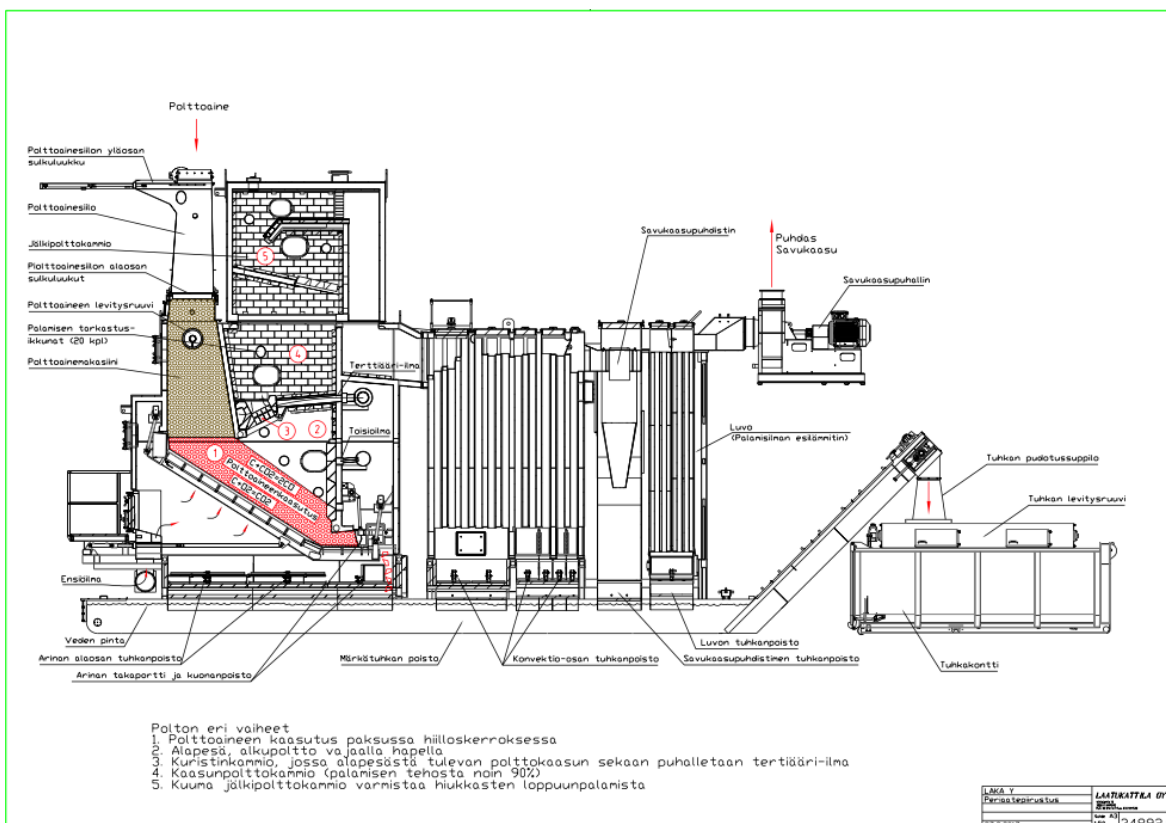
Kymenlaakson Jäte kiinnittää erityistä huomiota jätehuollon käsittelyprosesseihin tavoitteenaan käyttää mahdollisimman kehittyneitä ja ympäristöystävällisiä tekniikoita. Yhtiö pyrkii järjestämään jätehuollon, jätteen käsittelyn ja hyötykäytön teknisesti ja taloudellisesti tehokkaalla tavalla. Yhtiö palvelee alueen asukkaita sekä elinkeinoelämää monipuolisesti ja pyrkii lisäämään tietoisuutta asianmukaisesti hoidetun jätehuollon merkityksestä. (Kymenlaakson Jäte 2023a.)

Kymenlaakson Jäte Oy hoitaa omistajakuntiensa puolesta lakisääteisiä asumisjätehuollon palvelutehtäviä kunkin kunnan päätöksen mukaisesti. Lisäksi yhtiö vastaa jätehuollon järjestämisestä litissä, Kotkassa, Kouvolassa ja Mäntyharjulla. (Kymenlaakson Jäte 2023a.)

2.2 Keltakankaan lämpökeskus

Kymenlaakson Jäte Oy:n lämpökeskus otettiin käyttöön vuoden 2021 alussa. Lämpökeskus on suunniteltu kaukolämmöntuotantoon ja koostuu kahdesta neljän megawatin lämpökattilasta, polttoaineen syöttöjärjestelmästä sekä tarvittavasta savukaasujen puhdistusjärjestelmästä. Energiaa voidaan tuottaa noin 42 gigawattituntia kaukolämpönä vuosittain. Poltto-prosessissa käytetään arinakattilaa mekaanisella arinalla, ja päästöjen käsittelyyn on otettu käyttöön SNCR, sykloni, kuitusuodatin ja lauhduttava savukaasupesuri. Tankopurkaimilla varustettuihin polttoainevarastoihin mahtuu noin 1080 m³ polttoainetta. Lämpökeskuksessa hyödynnetään pääasiassa AB-luokan kierrätyspuuta ja puistorisumursketta pääpolttoaineena. Lisäksi lämpökeskuksessa on varauduttu käyttämään C-luokan purkupuuta, Kymenlaakson Jäte Oy:n valmistamaa kierrätyspolttoainetta (Solid Recovered Fuel), biolietettä ja muita biopolttoaineita. Kierrätyspuu, purkupuuta ja metsäpolttoaineet murskataan lämpökeskuksen läheisyydessä sijaitsevalla viemäröidyllä ja asfaltoidulla kentällä mobiilimurskaimella. Polttoaineiden käyttötarve vaihtelee eri kausina. (Kymenlaakson Jäte 2023b.)

Polttoprosessissa lämpökeskuksen K1 ja K2 kattiloissa käytetään kaasutuspolttotekniikkaa, jossa arinan hiilloskerros on noin 80 cm paksu. Hiillos on aina paikallaan ja säilyy vakiona, kun taas arina liikkuu vain tuhkan poistamiseksi hiilloksen alta. Arinan liike ei vaikuta palamiseen, sillä palamista säädelään yksinkertaisesti palamisilmojen avulla. Palamisen säätö tapahtuu automaattisesti, joten muuttuvat polttoaineen laatu, palakoko tai kosteus eivät vaikuta siihen. Tuhka ja palamaton materiaali siirretään arinalta pohjatuhkakuljettimelle (märkä kolakuljetin) ja edelleen pohjatuhkalavalle hävitettäväksi. Tuotettu kaukolämpö syötetään Keltakangas-Myllykoski-Inkeroinen -kaukolämpöverkkoon. Kuvassa 1 on esitetty periaatepiirros kattilan toiminnasta. (Kymenlaakson Jäte 2023b.)



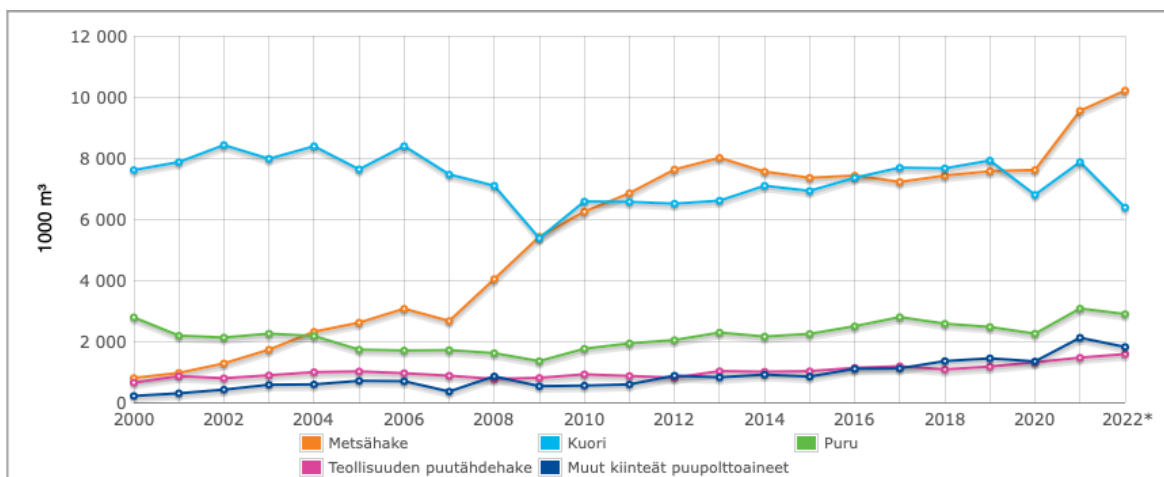
Kuva 1 Periaatepiirros kattilan toiminnasta (Kymenlaakson Jäte 2023b.)

3 Puun käyttö ja luokitus Suomessa

3.1 Puun käyttö Suomessa

Vuonna 2022 Suomessa käytettiin yhteensä 78,7 miljoonaa kuutiometriä raakapuuta, mikä oli 8 % vähemmän kuin vuonna 2021. Metsäteollisuudessa raakapuusta jalostettiin 65,2 miljoonaa kuutiometriä, joista 61,3 miljoonaa kuutiometriä oli kotimaista puuta ja 3,9 miljoonaa kuutiometriä tuontipuuta. Energiantuotannossa käytettiin 13,4 miljoonaa kuutiometriä raakapuuta, ja tästä määrästä 6,5 miljoonaa kuutiometriä poltettiin pientaloissa polttopuuna, kun taas 7,0 miljoonaa kuutiometriä muunnettiin metsähakkeeksi ja käytettiin lämpö- ja voimalaitoksissa. Voima- ja lämpölaitoksissa poltettiin kiinteitä puupolttoaineita yhteensä noin 30 miljoonaa kuutiometriä, joka vastaa energiamääränä 60 terawattituntia. (Luonnonvarakeskus 2023a.)

Voima- ja lämpölaitokset kuluttivat kiinteitä puupolttoaineita yhteensä noin 23 miljoonaa kiintokuutiometriä vuonna 2022. Määrä vastaa energiana noin 44 terawattituntia. Metsähaketta käytettiin noin 10 miljoonaa kuutiometriä, ja määrä kasvoi vuodesta 2021 seitsemän prosenttia. Käytetyn metsähakkeen määrän kasvu johtui yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon lisääntyneestä tuotannosta. CHP-laitokset käyttivät yhteensä noin 6,5 miljoonaa kuutiometriä metsähaketta. Lisäksi metsähakkeesta valmistettiin 6,4 miljoonaa kuutiometriä pienpuusta, hakkuutähteitä käytettiin 2,9 miljoonaa kuutiometriä, runkopuuta 0,6 miljoonaa kuutiometriä ja kantoja 0,3 miljoonaa kuutiometriä. Metsäteollisuuden kiinteitä sivutuotteita käytettiin 11 miljoonaa kuutiometriä, johon kuului kuorta 6,4 miljoonaa kuutiometriä, puutähdehaketta 1,6 miljoonaa kuutiometriä, purua 2,9 miljoonaa kuutiometriä sekä erittelemättömiä teollisuuden puutähteitä 0,2 miljoonaa kuutiometriä. Kierrätyspuuta käytettiin 1,3 miljoonaa kuutiometriä. Puupellettejä sekä brikettejä poltettiin yhteensä noin 450 000 tonnia, joka tarkoittaa noin 0,3 miljoonaa kuutiometriä. (Luonnonvarakeskus 2023b.) Kuvassa 2 on esitetty kiinteiden polttoaineiden käyttö voima- ja lämpölaitoksissa puutuotelajeittain vuosina 2000-2022.



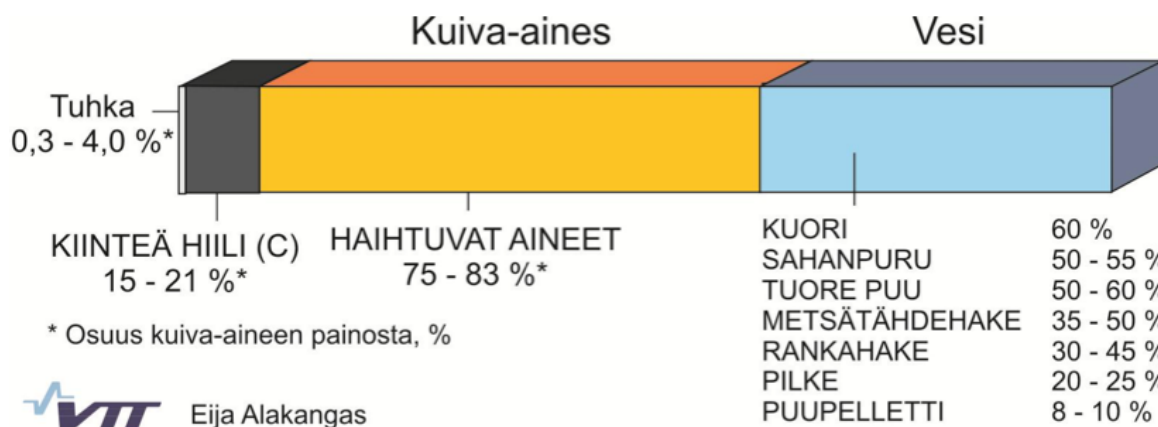
Kuva 2 Kiinteiden polttoaineiden käyttö voima- ja lämpölaitoksissa puutuotelajeittain 2000–2022 (Luonnonvarakeskus 2023b.)

3.2 Puun ominaisuudet

Puunbiomassa muodostuu kasvien yhteyttämisprosessissa, jossa vihreät lehdet valmistavat yksinkertaisia sokereita ilmakehän hiilidioksidista, maaperän vedestä ja auringon energiasta. Kasvien elävät solut muokkaavat näitä sokereita monimutkaisemmiksi yhdisteiksi, joihin kuuluu hiiltä (C), happea (O), vetyä (H), pieniä määriä typpeä (N) ja erilaisia mineraaliaineita. Yhteyttämisprosessissa metsät sitovat hiiltä ilmakehästä ja muuttavat auringon energian kemialliseksi energiaksi. (Alakangas ym. 2016, 54.)

Kun kasvi tai sen osa kuolee, biomassan hajoamisessa vapautuu energiaa hapetusreaktion kautta. Hajoaminen voi tapahtua hitaasti puun lahoamisen kautta tai äkkinäisesti metsäpalossa. Jos palaminen tapahtuu suljetussa tilassa, niin vapautuva energia voidaan hyödyntää lämmön, sähkön tai höyryn tuottamiseksi. (Alakangas ym. 2016, 54.)

Biomassan pääasiallinen rakennusaine on selluloosa, joka on runsain maapallolla esiintyvä orgaaninen yhdiste. Puuvartisten kasvien kuivamassasta selluloosan osuus on 40–50 %, lehtipuilla enemmän kuin havupuilla. Selluloosa koostuu glukoosimolekyyleistä, jotka muodostavat pitkiä ketjumolekyylejä. Lisäksi biomassassa on hemiselluloosia ja ligniiniä, joka antaa puulle mekaanista lujuutta ja sisältää lämpöä tuottavia aineita. Puussa on myös uuteaineita, kuten terpeenejä, rasva-aineita ja fenoleja, joita voidaan uutaa puusta orgaanisilla liuottimilla. Lehtipuilla näiden aineiden määrä on suurempi kuin havupuilla, esimerkiksi puun pihka koostuu näistä aineista. (Alakangas ym. 2016, 54.) Kuvassa 3 esitetty periaatekuvas puun koostumuksesta.



Kuva 3 Puun koostumus (Alakangas ym. 2016, 55.)

3.3 Puupolttoaineiden luokitus

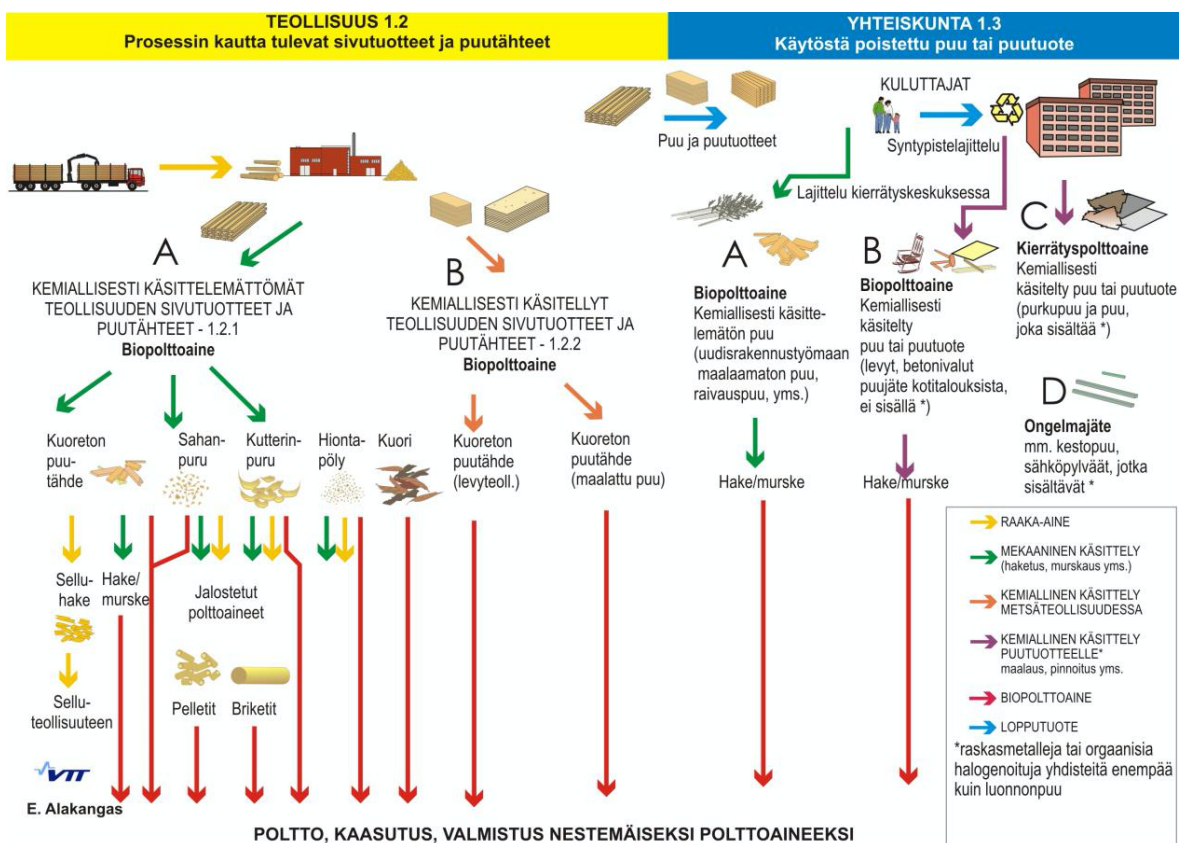
Asikaisen (2018, 386) mukaan puupolttoaineet kattavat kaikki biopolttoaineet, jotka saadaan suoraan tai epäsuorasti puusta. Puuperäiset polttoaineet voidaan ryhmitellä kolmeen pääkategoriaan: primäärisiin, sekundäärisiin ja tertiäärisiin puubiomassasta valmistettuihin polttoaineisiin. Yleensä energiapuu viittaa primääriin puubiomassaan, jota ei aiemmin ole käytetty muihin tarkoituksiin ja joka muunnetaan polttoaineeksi mekaanisten prosessien kautta. Tähän kategoriaan kuuluvat tavallisesti kokopuu, runko, latvusmateriaali sekä kantot ja juuripuu, joista valmistetaan metsähaketta ja murskettä. Sen sijaan klapit, halot ja pilkkeet sekä jalostetut puupolttoaineet, kuten pelletit ja brikitit, eivät kuulu energiapuun piiriin. Kierrätyspolttoaineet ja metsäteollisuuden sivutuotteet eivät myöskään sisälly niihin. Sekundäärinen puubiomassa koostuu puunjalostusteollisuuden sivutuotteista, kuten kuoresta, murskeesta ja mustalipeästä. Kierrätys- ja purkupuut ovat tyypillisesti luokiteltavissa tertiääriseen puubiomassa-kategoriaan, ja niistä valmistetaan kierrätyspolttoaineita.

3.4 Käytöstä poistetun puun luokittelu

Käytöstä poistetut puumateriaalit luokitellaan neljään pääluokkaan: A, B, C ja D, jotta niiden hallinnassa ja käsittelyssä voitaisiin ottaa huomioon niiden ominaisuudet. Kiinteät biopolttoaineet jaetaan kahteen keskeiseen luokkaan, nimeltään A ja B, ja ne noudattavat standardia SFS-EN ISO 17225-1. Tämän ansiosta ne eivät kuulu jätteenpolttoasetuksen soveltamisalaan. Luokkaan C kuuluvat puutähteet, jotka sisältävät orgaanisia halogenoituja yhdisteitä ja raskasmetalleja enemmän kuin luonnonpuu. Tällaiset puumateriaalit luokitellaan kierrätyspolttoaineisiin SFS-EN 15359 -standardin mukaan, ja niihin sovelletaan jätteenpolttoasetuksen normeja. Luokka D kattaa puumateriaalit, jotka on käsitelty puunkyllästysaineilla ja siksi luetaan vaaralliseksi jätteeksi. (Alakangas ym. 2014, 12.)

Puupolttoaineiden laatuohjetta (VTT-M-07608-13) voidaan käyttää A ja B luokan puumateriaalien ominaisuuksien luokitteluun ja alkuperän merkitsemiseen. Tämä ohje sisältää taulukoita hakkeen ja murskeen laatuluokille. Kemiallisesti käsitellylle B-luokan puulle on pakollisena tietona ilmoitettava kloorin (Cl), rikin (S) ja typen (N) pitoisuudet. Ohjeessa on myös taulukoita, joissa määritellään raja-arvot muille kemiallisille ominaisuuksille. (Alakangas ym. 2014, 19.)

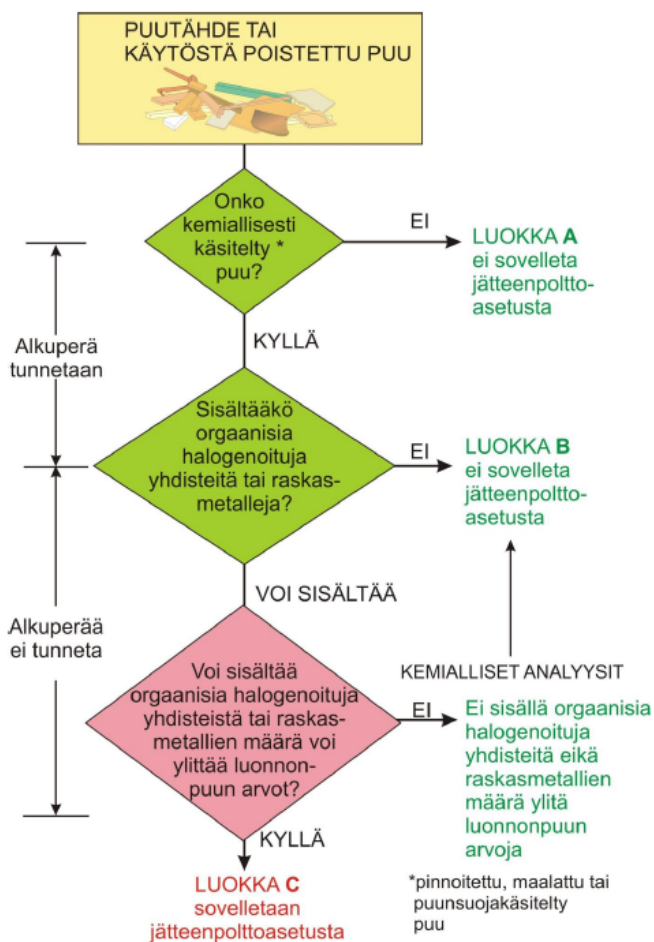
Käytöstä poistetun puumateriaalin epäpuhtaudet voidaan jakaa kahteen ryhmään: mekaanisiin ja kemiallisiin epäpuhtauksiin. Mekaaniset epäpuhtaudet kuten lasi, metalli, kivet ja muovi voidaan erottaa raaka-aineesta lajittelun tai polttoaineen tuotannon avulla. Esimerkiksi käyttämällä magneettia metallien erottamiseen ja seulomalla kivet. Toisaalta kemialliset epäpuhtaudet kuten maalit, pinnoitteet, puunsuoja-aineet ja liimat, ovat lähes aina kiinteä osa puumateriaalia, ja niiden erottaminen ja poistaminen on vaikeampaa. (Alakangas & Wiik. 2008, 42.). Kuvassa 4 on esitetty luokittelu luokille A, B, C ja D.



Kuva 4. Luokittelu A, B, C ja D luokan puille (Alakangas ym. 2014, 13.)

Fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien tutkiminen ei ole välttämätöntä, kunhan eriteltävät ominaisuudet ovat hyvin tiedossa. Tarvittava tieto voi liittyä esimerkiksi polttoaineen alkuperään, polttoaineen käsittelyyn, laatujärjestelmään tai valmistusmenetelmään. Purkupuu luokitellaan luokkaan C, ellei voida laatujärjestelmän tai ominaisuustietojen perusteella

osoittaa, että kyseessä on kemiallisesti käsittelemätön puu (kuten talon runkorakenteet tai hirret). (Alakangas ym. 2014, 19.) Kuvassa 5 on esitetty päättelyketju, joka ohjaa toimintaa puujätteen luokittelussa.



Kuva 5 Kaavio puujätteen luokan todentamiseksi (Alakangas ym. 2014, 15.)

Metsäteollisuuden kemiallisesti käsiteltyjen sivutuotteiden tai -tähteiden sekä käytöstä poistettujen puiden tai puutuotteiden kemiallisten epäpuhtauksien pitoisuuksien ei tulisi huomattavasti ylittää luonnon puun vastaavia arvoja. Merkittäväksi ylitykseksi katsotaan tilanne, jossa kokoomanäytteen analyysin tulos ylittää raja-arvon 20 prosentilla. Jos toimittaja pystyy luotettavasti osoittamaan, että 12 kuukauden keskiarvot raja-arvojen osalta ovat alle luonnonpuun raja-arvojen, voidaan raja-arvojen määrittelyssä soveltaa 12 kuukauden keskiarvotietoja ja sallia yksittäisten kuukausien raja-arvojen ylitykset (Alakangas ym. 2014, 21.) Arvot on esitetty taulukukossa 1.

	Ominaisuus		Raja-arvo ¹ , kuiva- aineesta	Luonnon puu, johon raja-arvo perustuu	Luokka A		Luokka B		Luokka C
					Velvoittavat	Opastavat	Velvoittavat	Opastavat	Rajat uudelleen- luokituk- selle luokkaan B
	Rikki	S	≤ 0,2 p-%	kuori, lehtipuu		X	X		X
	Typpi	N	≤ 0,9 p-%	kuori, lehtipuu		X	X		X
	Kalium	K	≤ 5 000 mg/kg	kuori, lehtipuu				X	
	Natrium	Na	≤ 2 000 mg/kg	kuori, havupuu				X	
	Kloori	Cl	≤ 0,1 p-%	²		X	X		X
"Raskasmetallit"	ΣArseeni + Kromi + Kupari	As+ Cr+ Cu	≤ 70 mg/kg ³	kuori, havupuu Σ 74 mg/kg			X		X
	Kadmium	Cd	≤ 1 mg/kg	kuori, havupuu			X		X
	Elohopea	Hg	≤ 0,1 mg/kg	kuori, havupuu			X		X
	Lyijy	Pb	≤ 50 mg/kg	kuori, havupuu			X		X
	Sinkki	Zn	≤ 200 mg/kg	kuori, havupuu			X		X

¹ Raja-arvoja sovelletaan vain kloorille, typelle, rikille ja raskasmetalleille. Kaliumin ja natriumin arvot ovat suositusarvoja (opastavia).

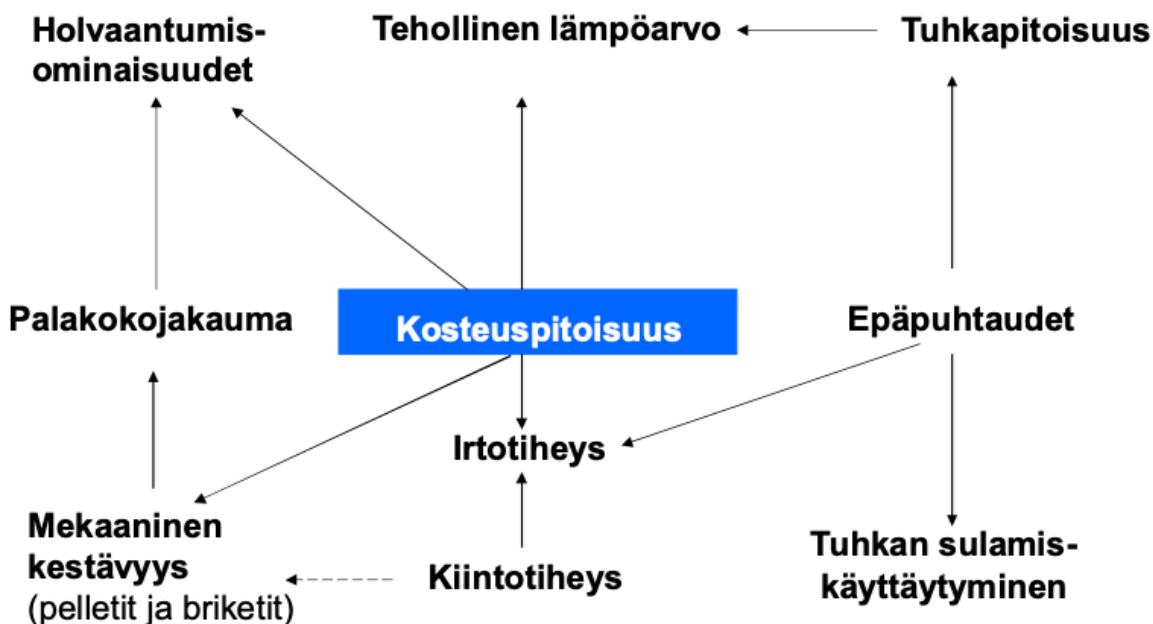
² Puun kuoren klooripitoisuus <0,05 p-% kuiva-aineesta

³ Arseenin arvo ei saa ylittää luokan B puulla 10 mg/kg huomioiden mittaustarkkuus ± 30 %.

Taulukko 1 Luonnonpuun ominaisuuksien arvoja (Alakangas ym. 2014, 22.)

3.5 Polttoaineen vaikutus polttoprosessille

Alakankaan ym. (2016) mukaan tehollinen lämpöarvo heijastaa kuivan polttoaineen palamisen vapauttamaa energiaa, ottaen huomioon vesihöyryn latenttilämmön talteenoton. Kosteus alentaa lämpöarvoa ja heikentää kattilan hyötysuhdetta. Energiatiheys vaikuttaa polttoaineen varastointiin ja kuljetuskustannuksiin. Polttoaineen palakoko vaihtelee polttotekniikan mukaan, mikä vaikuttaa palamisprosessiin ja laitteistojen toimintaan, erityisesti holvaantumiskäyttämiseen. Hakkeen palakoko on homogeenisempi kuin murskeen, mikä vaikuttaa käsiteltävyyteen. Kuvassa 6 on esitetty polttoaineiden ominaisuuksien vaikutus toisiinsa.



Kuva 6 Ominaisuuksien vaikutus (Alakangas ym. 2016, 197.)

Hiili ja vety ovat palamisessa vapautuvan energian kannalta keskeiset alkuaineet. Vaikka suurin osa polttoaineen sisältämästä typestä muuntuu alkuainetypeksi, merkittävä osa voi silti muodostaa haitallisia typenoksidipäästöjä, erityisesti typpimonoksidia (NO). Typpimonoksidi hapettuu nopeasti ilmakehässä typpidioksidiksi, joka reagoi vedellä muodostaen happamia yhdisteitä, kuten typpihappoa ja typpihapoketta, jotka happamoittavat sadevettä. (Alakangas ym. 2016, 196 – 198.)

Rikkipitoisuus on oleellinen sekä päästöjen (SO₂) että tuhkakemian kannalta kuumakorroosion estämisessä. Rikki voi muodostaa rikkihappoa, mikä saattaa aiheuttaa kastepistekorroosiota savukaasukanavissa, jos lämmönsiirtopintojen lämpötilat ovat liian alhaiset. Rikkihapon kastepistekorrosio voi olla merkittävä ongelma myös kanavistossa ja laitteissa, kuten sähkösuotimessa, erityisesti kylmäsilloissa. Kloori on tärkein tekijä tulistimien kuumakorroosiossa. (Alakangas ym. 2016, 196 – 198.)

4 Analyysit

4.1 Biopolttoaineiden ominaisuuksia

Tärkeimpiä tunnusmerkkejä, jotka yleisesti ottaen liitetään polttoaineisiin, käsittävät teknisen analyysin, alkuperäisen aineen koostumuksen, kosteuden, lämpöarvon ja tuhkan sulamiskäyttäytymisen. Tietoa tarvitaan polttoaineen tiheydestä, palamisen koosta ja muista käsittelyyn liittyvistä ominaisuuksista. Poltto- tai ympäristöteknisistä syistä on myös olennaista arvioida eri epämetallien tai metallien pitoisuuksia joko polttoaineessa tai sen tuhassa. (Alakangas ym. 2016, 23.) Alla on listattu tähän työhön liittyvät tärkeimmät analyysimenetelmät ja niihin liittyvät standardit.

4.2 Kokonaiskosteus ja irtotiheys

4.2.1 Kokonaiskosteus

SFS-EN ISO 18134-2:2017 standardi määrittelee menetelmän kiinteiden biopolttoaineiden kokonaiskosteuspitoisuuden määrittämiseksi uunikuivauksella. Menetelmää käytetään pääasiassa rutiininomaisessa laaduntarkkailussa, kun suurta tarkkuutta ei vaadita. Testinäytteestä osa kuivataan 105 °C:n lämpötilassa ja sen kosteusprosentti lasketaan massan menetyksen perusteella. Standardissa määritellyssä menetelmässä ei oteta huomioon noston vaikutusta, ja siihen sisältyy vain yksi määrittäminen. Osanäytteiden käsittely ja kuivausaika riippuvat materiaalin ominaisuuksista. Tulos ilmoitetaan massaprosentteina yhden desimaalin tarkkuudella. (SFS-EN ISO 18134-2:2017.) Biopolttoaineen kokonaiskosteuden määrä saadaan kaavasta 1

$$M_{ar} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} * 100 \quad (1)$$

jossa

M_{ar} = näytteen kokonaiskosteus saapumistilassa (p-%)

m_1 = astian paino (g)

m_2 = astian ja näytteen massa (g)

m_3 = astian ja näytteen massa kuivauksen jälkeen (g) (SFS-EN ISO 18134-2:2017.)

4.2.2 Irtotiheys

Standardi SFS-EN ISO 17828:2015 määrittelee menetelmän kiinteiden biopolttoaineiden irtotiheyden mittaamiseksi käyttämällä standardimittausastiaa. Standardin soveltamisala

kattaa kaikki kiinteät biopolttoaineelle, jonka suurin nimellispalakoko on 100 mm. Irtotiheys ei ole absoluuttinen arvo, joten sen määrittelyolosuhteiden on oltava standardoituja vertailukelpoisten tulosten saavuttamiseksi. On tärkeää huomioida, että kiinteiden biopolttoaineiden irtotiheyteen vaikuttavat monet tekijät kuten värinä, isku, paine, biohajoaminen, kuivuminen ja kastuminen, ja mitattu irtotiheys voi vaihdella käytännön olosuhteissa kuljetuksen, varastoinnin tai siirron aikana (SFS-EN ISO 17828:2015.)

Tämän standardin mukaan tarvitaan tiettyjä viiteasiakirjoja sen soveltamiseksi, mukaan lukien ISO 14780, joka käsittelee näytteen valmistelua, ja ISO 16559, joka määrittelee termit ja määritelmät. Standardissa esitetään myös laitevaatimukset, kuten mittausastioiden ominaisuudet sekä vaakojen tarkkuusvaatimukset, jotka vaihtelevat astian koon mukaan. (SFS-EN ISO 17828:2015.)

Käytännön menetelmä standardin noudattamiseksi sisältää astian täyttämisen tietyn kokoisella näyteannoksella, tiivistämisen iskukokeella ja punnitsemisen. Irtotiheys lasketaan tämän jälkeen nettopainon ja standarditilavuuden perusteella ja ilmoitetaan mitattua kosteuspitoisuutta kohti. Lisäksi standardi määrittelee erilaisia astiakokoja ja niihin liittyviä vaatimuksia. (SFS-EN ISO 17828:2015.)

Lyhyesti sanottuna, tämä standardi määrittelee menetelmän kiinteiden biopolttoaineiden irtotiheyden mittaamiseksi tarkasti standardoituja menettelyjä noudattaen. Se tarjoaa tärkeitä ohjeita ja vaatimuksia näytteiden valmistelusta ja mittauksista, jotka ovat olennaisia biopolttoaineiden laadun ja ominaisuuksien arvioinnissa. (SFS-EN ISO 17828:2015.) Irtotiheys saapumistilassa saadaan kaavalla 2 ja irtotiheys kuiva-aineessa kaavalla 3.

$$BD_{ar} = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \quad (2)$$

$$BD_d = BD_{ar} \frac{(100 - M_{ar})}{100} \quad (3)$$

jossa

BD_{ar} = irtotiheys saapumistilassa (kg/m^3)

BD_d = irtotiheys kuiva-aineessa (kg/m^3)

m_1 = tyhjän astian massa (kg)

m_2 = täytetyn astian massa (kg)

V = mittausastian nettotilavuus (m^3) (SFS-EN ISO 17828:2015.)

4.3 Tuhkapitoisuus 550 °C ja 815 °C

SFS-EN ISO 18122:2022 ja ISO 1171 standardit määrittelevät menetelmät kiinteiden biopolttoaineiden tuhkapitoisuuksien määrittämiseksi. Tuhkapitoisuus määritetään laskemalla jäännöksen massa sen jälkeen, kun näyte kuumennetaan tarkasti valvotuissa olosuhteissa tietyn ajan valvotussa loppulämpötilassa. Standardilämpötila on 550 ± 10 °C, mutta muitakin lämpötiloja voidaan käyttää. Vaihtoehtoisia lopullisia lämpötiloja ovat esimerkiksi 710 °C ja 815 °C. Korkeampi lämpötila, kuten 815 °C, voi poistaa karbonaatit tuhkasta ja johtaa matalampiin tuhkapitoisuuksiin. (SFS-EN ISO 18122:2022.) Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa saadaan kaavalla 4.

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100 * \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (4)$$

jossa

A_d = Näytteen tuhkapitoisuus kuiva-aineessa (%)

m_1 = tyhjän astian massa (g)

m_2 = täytetyn astian massa (g)

m_3 = astian ja tuhkan massa (g)

M_{ad} = näytteen kosteusprosentti (p-%) (SFS-EN ISO 18122:2022.)

4.4 Lämpöarvomääritys

Polttoaineiden lämpöarvot määritellään standardeja noudattaen SFS-EN ISO 18125:2017 ja SFS-EN 14918. Lämpöarvot voivat olla kalorimetrinen lämpöarvo, tehollinen lämpöarvo toimituskosteudessa ja tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa. Lämpöarvot ilmoitetaan yleensä megajouleina polttoainekiloa kohti (MJ/kg). (Alakangas ym. 2016, 28.)

4.4.1 Kalorimetrinen lämpöarvo

Kalorimetrinen lämpöarvo, tunnetaan myös ylempänä lämpöarvona, kuvastaa lämpöenergian määrää, joka vapautuu poltettavan aineen massayksikköä kohti, kun aine palaa täydellisesti ja palamistuotteet jäähdytetään 25 °C:een lämpötilaan. Kalorimetrinen lämpöarvo olettaa, että sekä palamistuotteena syntyvä vesi että aineen sisältämä kosteus muuttuvat nesteeksi palamisen jälkeen. (SFS-EN ISO 18125:2017.) Kalorimetrinen lämpöarvo voidaan laskea kaavalla 5.

$$q_{V,gr,d} = q_{V,gr} * \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (5)$$

jossa

$q_{V,gr,d}$ = kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo vakiotilavuudessa (kJ/kg)

M_{ad} = näytteen kosteusprosentti (p-%)

$q_{V,gr}$ = biopolttoaineen bruttolämpöarvo vakiotilavuudessa (kJ/kg) (SFS-EN ISO 18125:2017.)

4.4.2 Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo

Polttoaineilla yleisesti käytetty lämpöarvo on kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, joka lasketaan kalorimetrisestä lämpöarvosta käyttäen muunnoskaavaa 6. Tehollinen lämpöarvo huomioi myös höyrystyvän veden höyrystymisenergian palamisen yhteydessä. Tulokset ilmoitetaan MJ/kg. (SFS-EN ISO 18125:2017.)

$$q_{p,net,d} = q_{V,gr,d} - 212,2 * w(H)_d - 0,8 * [w(O)_d + w(N)_d] \quad (6)$$

jossa

$q_{p,net,d}$ = kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo vakioaineessa (kJ/kg)

$q_{V,gr,d}$ = kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo vakiotilavuudessa (kJ/kg)

$W(H)_d$ = vetyprosentti kuivassa biopolttoaineessa (p-%)

$W(O)_d$ = happipitoisuus kuivassa polttoaineessa (p-%)

$W(N)_d$ = typpiä sisältävien aineiden prosentti kuivassa polttoaineessa (p-%) (SFS-EN ISO 18125:2017.)

4.4.3 Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa

Tehollinen lämpöarvo toimituskosteudessa eli saapumistilassa. Tämä lämpöarvo on pieni, koska se ottaa huomioon energiamäärän, joka tarvitaan polttoaineen luontaisesti sisältämän veden haihuttamiseen. Yleinen tapa ilmoittaa lämpöarvo on megajouleina polttoainekiloa kohti (MJ/kg, 1 MJ = 0,2778 kWh). (SFS-EN ISO 18125:2017.) Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa saadaan kaavalla 7.

$$q_{p,net,ar} = q_{p,net,d} * \left(\frac{100 - M_{ar}}{100} \right) - 0,02443 * M_{ar} \quad (7)$$

jossa

$q_{p,net,ar}$ = tehollinen lämpöarvo saapumistilassa (MJ/kg)

$q_{p,net,d}$ = tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa (MJ/kg)

M_{ar} = kosteus saapumistilassa (p-%)

0,02243 = höyrystymisentalpian korjauskerroin vedelle (MJ/kg per 1 p-% kosteutta)

(SFS-EN ISO 18125:2017.)

4.4.4 Toimitettu energiamäärä

Toimitettu energiamäärä (W) lasketaan polttoaineen tehollisen lämpöarvon ja toimitetun massan perusteella. Pienissä laitoksissa voidaan käyttää muita menetelmiä, kuten energian tuotannon ja kattilan hyötysuhteen laskemista. (Alakangas E & Impola R. 2013, 24.)

$$W = \frac{Q}{3,6} * m \quad (8)$$

jossa

$\frac{Q}{3,6}$ = saapumistilaisen tehollisen lämpöarvon (MJ/kg) muunto MWh/t

m = toimitetun biopolttoaineen massa (tonnia) (Alakangas E & Impola R. 2013, 24.)

4.5 Alkuainemääritys ja alkuainepitoisuudet

Biopolttoaineiden alkuainemäärityksen menetelmät kuvataan SFS-EN ISO 16994:2016 standardissa, jossa määritellään kaksi polttoaineen hajotusmenetelmää ja erilaisia analyttisiä tekniikoita alkuaineiden määritykseen hajotusratkaisuissa. Yleisiä alkuaineina, joita voidaan mitata biopolttoaineista, ovat hiili (C), rikki (S), vety (H), typpi (N), kloori (CL), fluori (F) ja bromi (Br). Hajotusmenetelmä valitaan sen mukaan, mitä alkuainetta halutaan tutkia. Esimerkiksi happipommihajotus-menetelmän avulla tutkitaan fluorin, bromin ja kloori pitoisuuksia, joita myös kutsutaan halogeneiksi. (SFS-EN ISO 16994:2016.)

Biopolttoaineista ja niiden tuhkasta voidaan myös mitata pääalkuaineet (major elements) ja vähäisinä määrinä esiintyvät alkuaineet (minor elements). SFS-EN 15410:2011 standardin mukaan pääalkuaineisiin kuuluvat natrium (Na), kalium (K), alumiini (Al), pii (Si), kalium (K), natrium (Na), kalsium (Ca), magnesium (Mg), rauta (Fe), fosfori (P) ja titaani (Ti). (Alakangas ym. 2014, 25.)

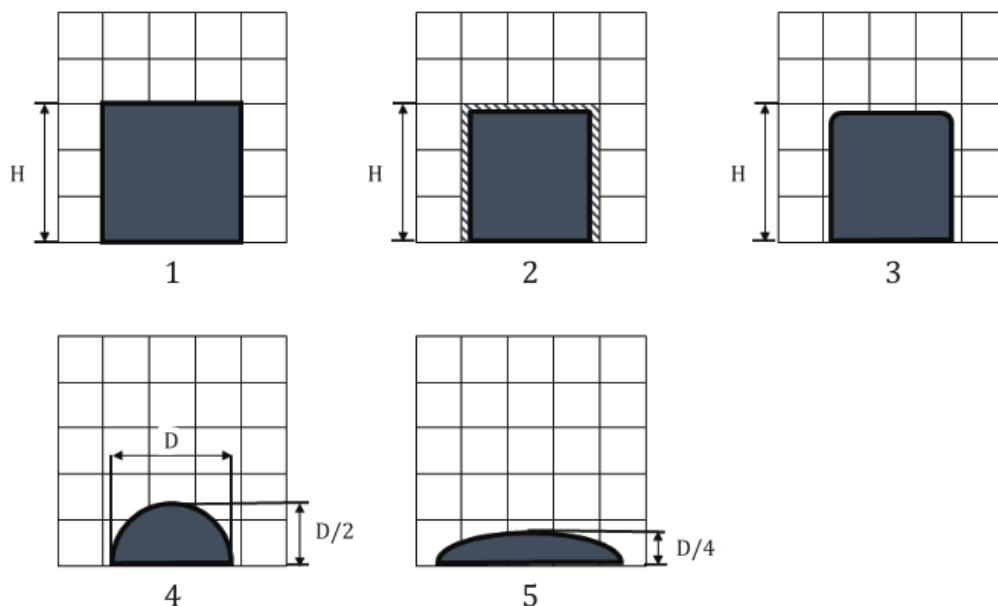
SFS-15411:2011 standardissa on kuvattu menetelmä vähäisinä määrinä esiintyvät alkuaineiden selvittämiseen. Vähäisinä määrinä esiintyviin alkuaineisiin kuuluu arseeni (As), barium (Ba), beryllium (Be), kadmium (Cd), koboltti (Co), kromi (Cr), kupari (Cu), elohopea (Hg), molybdeeni (Mo), mangaani (Mn), nikkeli (Ni), lyijy (Pb), seleeni (Se), telluuri (Te), vanadiini (V) ja sinkki (Zn). (Alakangas ym. 2014, 25.)

4.6 Tuhkan sulamiskäyttäytyminen

Tuhkan sulamiskäyttäytymistä säätelee tuhkan koostumus, joka vaihtelee eri polttoaineiden mukaan. Polttoaineen palamisprosessissa tuhka sulaa, mikä voi johtaa moniin ei-toivottuihin ilmiöihin, kuten lämpöpintojen kuonaantumiseen ja likaantumiseen. (Alakangas ym. 2016, 37.)

SFS-EN ISO 21404 -standardissa kuvattu testimenetelmä tarjoaa tietoa kiinteiden biopolttoaineiden tuhkan epäorgaanisten osien sulamiskäyttäytymisestä korkeissa lämpötiloissa. Tuhkan sulaminen on monimutkainen prosessi, joka saattaa sisältää sintrausta, kutistumista, laajenemista tai turpoamista. Testimenetelmä on empiirinen. Testissä käytetty tuhka on homogeeninen aine, joka on valmistettu biopolttoaineesta tuhkanpoistolla 550 °C:ssa. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää tuhkanpoistolämpötiloja 710 °C tai 815 °C. (SFS-EN ISO 21404:2020.)

Standardin mukaan tuhkan sulamiskäyttäytyminen jaetaan viiteen vaiheeseen, jotka kuvaavat muutoksia näytekappaleessa tietyssä lämpötilassa. Ensimmäisessä vaiheessa koekappale altistetaan alkuperäisessä pinta-alassaan tuhkautettuna 550 °C asteen lämpötilassa. Toisessa vaiheessa tapahtuu näytteen kutistuminen, joka on kutistumislämpötila (SST shrinkage starting temperature). Kutistumislämpötila määritellään hetkenä, jolloin koekappaleen pinta-ala laskee alle 95 % alkuperäisestä pinta-alastaan. Kolmannessa vaiheessa on muodonmuutoslämpötila (DT deformation temperature), jossa ensimmäiset sulamisen merkit ilmenevät. Muodonmuutoslämpötila voi ilmetä reunan pyöristymisenä, pinnan tasoittumisena, sylinterin laajenemisena tai yleisenä muutoksena sylinterin muodossa. Neljännessä vaiheessa on pallonmuodostumislämpötila (HT hemisphere temperature), jossa koekappale muodostaa suunnilleen pallon eli kun korkeus on puolet pohjan halkaisijasta. Viimeisessä vaiheessa on sulalämpötila (FT flow temperature), jossa tuhka levittyy tukilaatalle kerrokseksi, jonka korkeus on puolet koekappaleen korkeudesta pallonmuotoistumislämpötilassa. (SFS-EN ISO 21404:2020.) Kuvassa 7 on esitetty sulamiskäyttäytymisen vaiheet.



Kuva 7 Tuhkan sulamiskäyttäytymisen vaiheet (SFS-EN ISO 21404:2020.)

4.7 Polttoaineen reaktiivisuus kaasutuksessa

Tavanomaisten polttoaineominaisuuksien, kuten kemiallisen koostumuksen, lisäksi tarvitaan tietoa polttoaineen soveltuvista kaasutusolosuhteista. Arvioitaessa näitä olosuhteita on olennaista ottaa huomioon myös polttoaineen reaktiivisuus sekä tuhkan sintraantumisen ja sulamiskäyttäytyminen. (Alakangas ym. 2016, 37.)

Reaktiivisuus viittaa hiilen kaasuuntumiseen pyrolysoitumisvaiheen jälkeen. Se kuvaa, kuinka nopeasti polttoaine muuttuu kaasuksi ja saavuttaa lopullisen konversion. Reaktiivisuus ilmaistaan prosentteina minuutissa, mikä kertoo hetkellisen reaktionopeuden tuhkatoman polttoaineen konversion suhteen. Useat tekijät, kuten polttoaineen ominaisuudet, kemiallinen koostumus, lämpötila, paine ja kaasukehä, vaikuttavat reaktiivisuuteen. (Alakangas ym. 2016, 37.)

Reaktiivisuus määritetään polttoainenäytteen painon mittaamisella ajan suhteen paineistetussa termovaa`assa. Tämä menetelmä on suunniteltu simuloidakseen todellisia kaasutusolosuhteita, erityisesti leijukerroskaasutusta. Näyte siirretään nopeasti kuumaan reaktoriin, jossa vallitsevat vakiintuneet olosuhteet, kuten lämpötila, paine ja kaasukehä. (Alakangas ym. 2016, 38.)

Moilasen (2006, 51) mukaan reaktiivisuusmittauksen jälkeen jäljelle jäänyt tuhka tarkastetaan mikroskoopilla mahdollisen tuhkapartikkelien sintraantumisen tai sulamisen havaitsemiseksi. Sulanut tuhka näkyy selkeinä kiiltävinä tai lasimaisina palloina, jotka olivat myös

kooltaan suurempia kuin jauhemaiset tuhkapartikkelit. Luokittelussa käytetään seuraavia kriteerejä:

- Ei sintraantunut tuhka: tuhkarakenne muistuttaa alkuperäisiä polttoaineen hiukkasia, murenee helposti koskettaessa: merkataan kirjaimella "o".
- Osittain sintraantunut tuhka (eri asteita tässä ryhmässä): partikkelit sisältävät selvästi sulautunutta tuhkaa; merkitään yhdellä (*) tai kahdella (**) tähdellä.
- Täysin sintraantunut tuhka: jäännös on täysin sulautunut suuremmiksi lohkoiksi; merkitään kolmella (***) tähdellä. (Moilanen 2006, 51.) Kuvassa 8 on esitetty tuhkapartikkelien sintraantumisen- ja sulamisenasteet.



Kuva 8 Tuhkapartikkelien sintraantumisen- ja sulamisenasteet (Moilanen 2006, 51.)

Polttoaineen reaktiivisuudesta ja tuhkan käyttäytymisestä voidaan tehdä seuraavia päätelmiä:

- Polttoaine on helposti kaasutettavissa, jos biomassassa on reaktiivinen ja tuhka ei sulaa (tuhkalla korkea sulamispiste).
- Kaasutuslämpötila on alempi, jos sekä biomassassa että tuhka ovat reaktiivisia ja tuhka sulaa (tuhkalla alhainen sulamispiste).
- Polttoaine on haastava kaasuttaa, jos biomassassa ei ole kovin reaktiivinen ja tuhkassa ei ole sulamisen merkkejä. (Alakangas ym. 2016, 38.)

5 Seulonta

Kymenlaakson Jäte Oy vastaanottaa kattilassa käytettävän polttoaineen raaka-aineeksi puujätettä, risuja ja oksia. Puujäte on jaettu kahteen eri laatuluokkaan. Laatuluokka I käsittää puhtaan puujätteen, joka ei sisällä pinnoitettua tai käsiteltyä puuta. Esimerkiksi kuormalavat kuuluvat luokkaan I. Laatuluokka II käsittää käsitellyt puutuotteet, lastulevyt ja puukui-levy. Risut ja oksat sisältää oksat, havut, risut ja puuvartistet pensaat. Jätteen vastaanoton yhteydessä kuormat tarkastetaan, jotta voidaan varmistua laadusta.

Polttoaineiden seulonta toteutettiin Kymenlaakson Jäte Oy:n jätteenkäsittelykeskuksessa Keltakankaalla Kouvolassa. Seulontaan valittiin valmiiksi murskattu kierrätyspuuta (KIPU) ja puistorisua (PURI), joita käytetään pääpolttoaineena lämpökeskuksella. Seulonta suoritettiin Keestrack K6 -tasoseulalla. Seulaa syötettiin Volvo L120H pyöräkuormaajalla, jolla myös erät punnittiin. Koe-eräksi valittiin noin 20 tonnia puistorisumurskettä sekä noin 20 tonnia kierrätyspuumurskettä. Tasoseulan alaverkkona toimi 25 mm seulaverkko ja yläta-solla 100 mm seulaverkko. Seulonnan lopputuotteiksi saatiin 0–25 fraktio, 25–100 fraktio ja yli 100 mm fraktio. Yli 100 mm fraktiota ei otettu huomioon tähän kokeeseen, koska kyseistä ylitettä seuloontui massaltaan vähän. Kuvassa 9 näkyy kierrätyspuumurskeen seulonta.



Kuva 9 Kierrätyspuumurskeen seulonta tasoseulalla

Ennen seulontaa seulomattomasta polttoaineesta otettiin näyte 10 litran vetoiseen sakkoon. Kun koe-erät oli seulottu, seulotut jakeet punnittiin ja siirrettiin omiin kasoihin. Seulotuista jakeista otettiin näytteet ja ne lähetettiin laboratorioon analysointiin. Erot fraktioiden välillä oli selvästi havaittavissa visuaalisesti ja fyysisesti näytteitä tutkiessa. Kuvissa 10 ja 11 on kuvattu puistorisumurskeen ja kierrätyspuumurskeen seulonnan fraktiot.



Kuva 10 Puistorisumurskeen seulonnan fraktiot vasemmalla 0–25 oikealla 25–100



Kuva 11 Kierrätyspuumurskeen seulonnan fraktiot vasemmalla 0-25 oikealla 25-100

Polttoaineiden jakaumat fraktioiden välillä poikkeavat suuresti toisistaan polttoainelajien välillä. Puistorisumurskeen painojakauma oli 0–25 fraktiossa 51,86 % ja 25–100 fraktiossa 48,1 %, kun taas kierrätyspuumurskeen osalta 0-25 fraktiota oli 27 % ja 25-100 fraktiota 73 %. Jakeiden jakauma massaltaan on esitetty taulukossa 1.

Fraktio	PURI (tonnia)	KIPU (tonnia)
0–25	10,45	5,5
25–100	9,7	14,9
Yhteensä	20,15	20,4

Fraktio	PURI (%)	KIPU (%)
0–25	51,86 %	26,96 %
25–100	48,14 %	73,04 %
Yhteensä	100,00 %	100,00 %

Taulukko 1 Fraktiojakauma massaperusteisesti

6 Analyysitulokset

6.1 Puistorisumurskeen analyysitulokset

6.1.1 Kokonaiskosteus ja irtotiheys

Kokonaiskosteus vaihtelee eri fraktioiden välillä. Seulomattomassa puistorisumurskeessa kosteuspuitoisuus oli 17,5 %, kun taas puistorisumurskeen 25–100 fraktiossa se oli korkeampi, 25,1 %. Puistorisumurske 0–25 fraktiossa kosteuspuitoisuus oli 22 %. Tämä osoittaa, että fraktion pienentyessä kosteuspuitoisuus näyttää vähenevän. Irtotiheys, eli materiaalin massa tilavuutta kohti, vaihtelee myös eri fraktioiden välillä. Seulomattoman puistorisumurskeen irtotiheys oli 186 kg/m³, kun taas puistorisumurskeen 25–100 fraktiossa se laskee 138 kg/m³:iin. Puistorisumurskeen 0–25 fraktiossa irtotiheys oli suurin 200 kg/m³. Tämä indikoi, että pienemmät fraktiot voivat olla tiheämpiä. Tulokset on esitetty taulukossa 2.

Analyysi	Menetelmä	Yksikkö	PURI (seulomaton)	PURI 25 - 100	PURI 0 - 25
Kokonaiskosteus	SFS-EN ISO 18134-2	%	17,5	25,1	22
Irtotiheys	SFS-EN ISO 17828	kg/m ³	186	138	200

Taulukko 2 Puistorisumurskeen kokonaiskosteus ja irtotiheys

6.1.2 Tuhkapitoisuus

Gravimetriset tuhkapitoisuudet näyttävät vaihtelevan merkittävästi eri fraktioiden välillä. Seulomattoman puistorisumurskeen tuhkapitoisuus oli 13,0 %, mutta puistorisumurskeen 25–100 fraktiossa se laskee huomattavasti 2,0 %:iin. Puistorisumurskeen 0–25 fraktiossa tuhkapitoisuus oli 15,8 %. Tämä viittaa siihen, että fraktion koko vaikuttaa huomattavasti tuhkapitoisuuteen. Tuhkapitoisuuden tulokset on esitetty taulukossa 3.

Analyysi	Menetelmä	Yksikkö	PURI (seulomaton)	PURI 25 - 100	PURI 0 - 25
Tuhka (550), kuiva näyte	SFS- EN ISO 18122	%	13,0	2,0	15,8
Tuhka (815), kuiva näyte	ISO 1171	%	12,4	1,6	14,9

Taulukko 3 Puistorisumurskeen tuhkapitoisuus

6.1.3 Lämpöarvo

Lämpöarvoissa vaihtelu eri fraktioiden välillä oli hyvin pientä. Tehollinen lämpöarvo (qp) saapumistilassa oli puistorisumurskeen 25–100 fraktiossa 3,667 MWh/tonni, seulomattomassa lämpöarvo oli 3,793 MWh/tonni ja 0–25 fraktiossa lämpöarvo oli 3,537 MWh/tonni. Puistorisumurskeen lämpöarvot ovat esitetty taulukossa 4.

Analyysi	Menetelmä	Yksikkö	PURI (seuloma- ton)	PURI 25 - 100	PURI 0 - 25
Kalorimetrinen lämpöarvo (qV) kuiva näyte	SFS-EN ISO 18125	MJ/kg	18,20	19,69	18,1
Tehollinen lämpöarvo (qp), kuiva näyte	SFS-EN ISO 18125	MJ/kg	17,07	18,45	17,01
Tehollinen lämpöarvo (qp), kuiva näyte	SFS-EN ISO 18125	MWh/tonni	4,741	5,124	4,725
Tehollinen lämpöarvo (qp), saapumistila	SFS-EN ISO 18125	MJ/kg	13,65	13,2	12,73
Tehollinen lämpöarvo (qp), saapumistila	SFS-EN ISO 18125	MWh/tonni	3,793	3,667	3,537

Taulukko 4 Puistorisumurskeen lämpöarvot

6.1.4 Alkuainemääritys

Alkuainemäärityksessä ei havaittu suuria eroavaisuuksia fraktioiden välillä. Tulokset ovat hyvin samanlaiset, kuin luonnonpuussa tyypillisesti esiintyvät arvot. Tulokset on esitetty taulukossa 5.

Analyysi	Menetelmä	Yksikkö	PURI (seulo- maton)	PURI 25 - 100	PURI 0 - 25
Rikki (S), kuiva näyte	SFS-EN ISO 16994	%	0,06	0,03	0,09
Hiili (C), kuiva näyte	SFS-EN ISO 16994	%	46,9	49,7	45,7
Vety (H), kuiva näyte	SFS-EN ISO 16994	%	5,2	5,7	5
Typpi (N), kuiva näyte	SFS-EN ISO 16994	%	0,71	0,51	1,01
Kloori (Cl), kuiva näyte	SFS-EN ISO 16994 mod.	%	0,015	0,012	0,019
Fluori (F), kuiva näyte	SFS-EN ISO 16994 mod.	%	0,007	<0,001	0,007
Bromi (Br), kuiva näyte	SFS-EN ISO 16994 mod.	%	<0,001	<0,001	<0,001

Taulukko 5 Puistorisumurskeen alkuainemäärityksen tulokset

6.2 Kierrätyspuumurskeen analyysitulokset

6.2.1 Kokonaiskosteus ja irtotiheys

Kokonaiskosteuden osalta havaitaan, että kierrätyspuumurskeen 25–100 fraktio olevan vähän kosteampaa 16,4 % verrattuna seulomattomaan 12,2 % ja 0–25 fraktioon 14,9 %. Irtotiheyden osalta kaikki ovat suunnilleen samalla tasolla. Kierrätyspuumurskeen 25–100 fraktion irtotiheys oli 175 kg/m³, seulomattoman 160 kg/m³ ja 0–25 fraktion 164 kg/m³. Tulokset on esitetty taulukossa 6.

Analyysi	Menetelmä	Yksikkö	KIPU (seulomaton)	KIPU 25 - 100	KIPU 0 - 25
Kokonaiskosteus	SFS-EN ISO 18134-2	%	12,2	16,4	14,9
Irtotiheys	SFS-EN ISO 17828	kg/m ³	160	175	164

Taulukko 6 Kierrätyspuumurskeen kokonaiskosteus ja irtotiheys

6.2.2 Tuhkapitoisuus

Gravimetriset tuhkapitoisuudet eivät vaihtele merkittävästi eri fraktioiden välillä. Kierrätyspuumurskeen seulomattomassa ja 25–100 fraktiossa tulokset olivat samat 815 °C asteen tuhkautuksessa 0,9 %. Kierrätyspuumurskeen 0–25 fraktiossa tuhkapitoisuudet olivat hie-man korkeammat 815 °C asteessa 1,7 % ja 550 °C asteessa 1,9 %. Tuhkapitoisuudet on esitetty taulukossa 7.

Analyysi	Menetelmä	Yksikkö	KIPU (seulomaton)	KIPU 25 - 100	KIPU 0 - 25
Tuhka (550), kuiva näyte	SFS-EN ISO 18122	%	1,1	1,2	1,9
Tuhka (815), kuiva näyte	ISO 1171	%	0,9	0,9	1,7

Taulukko 7 Kierrätyspuumurskeen tuhkapitoisuudet

6.2.3 Lämpöarvo

Lämpöarvojen perusteella kaikki ovat lähellä toisiaan. Seulomattomalla kierrätyspuumurskeella oli korkein tehollinen lämpöarvo (qp) saapumistilassa 4,530 MWh/tonni. Kierrätyspuumurskeen 25–100 fraktiolla lämpöarvo oli 4,304 MWh/tonni ja 0–25 fraktiolla 4,323 MWh/tonni. Lämpöarvojen tulokset on esitetty taulukossa 8.

Analyysi	Menetelmä	Yksikkö	KIPU (seulomaton)	KIPU 25 - 100	KIPU 0 - 25
Kalorimetrinen lämpöarvo (qV) kuiva näyte	SFS-EN ISO 18125	MJ/kg	20,18	20,28	20,00
Tehollinen lämpöarvo (qp), kuiva näyte	SFS-EN ISO 18125	MJ/kg	18,92	19,02	18,71
Tehollinen lämpöarvo (qp), kuiva näyte	SFS-EN ISO 18125	MWh/tonni	5,254	5,282	5,198
Tehollinen lämpöarvo (qp), saapumistila	SFS-EN ISO 18125	MJ/kg	16,31	15,50	15,56
Tehollinen lämpöarvo (qp), saapumistila	SFS-EN ISO 18125	MWh/tonni	4,530	4,304	4,323

Taulukko 8 Kierrätyspuumurskeen lämpöarvot

6.2.4 Alkuainemääritys

Alkuainemäärityksessä alkuainepitoisuudet ovat pääosin alhaisia. Tämä on hyvä asia, sillä korkeat alkuainepitoisuudet voivat aiheuttaa ongelmia polttouunin toiminnassa. Esimerkiksi korkea rikkipitoisuus voi aiheuttaa happamuutta lämpölaitoksen polttouuniin. Hivenaineiden osalta pitoisuudet vaihtelevat suuresti fraktioiden ja seulomattoman välillä. Tuloksista käy ilmi, että 0–25 fraktiossa on suurimmat hivenaineiden pitoisuudet. 0–25 fraktiossa arseenin, kromin ja kuparin pitoisuudet ylittävät B-luokan raja-arvot, joten fraktio luokiteltaisiin C-luokan kierrätyspoltoaineeksi. Kierrätyspuumurskeen alkuaineiden ja hivenaineiden analyysitulokset on esitetty taulukossa 9.

Analyysi	Menetelmä	Yksikkö	KIPU (seulomaton)	KIPU 25 - 100	KIPU 0 - 25
Alkuainemääritykset					
Rikki (S), kuiva näyte	SFS-EN ISO 16994	%	0,03	0,02	0,04
Hiili (C), kuiva näyte	SFS-EN ISO 16994	%	50,7	50,5	50,3
Vety (H), kuiva näyte	SFS-EN ISO 16994	%	5,8	5,8	5,9
Typpi (N), kuiva näyte	SFS-EN ISO 16994	%	0,41	0,5	0,61
Kloori (Cl), kuiva näyte	SFS-EN ISO 16994 mod.	%	0,023	0,023	0,026
Fluori (F), kuiva näyte	SFS-EN ISO 16994 mod.	%	0,002	<0,001	0,001
Bromi (Br), kuiva näyte	SFS-EN ISO 16994 mod.	%	<0,001	<0,001	<0,001
Hivenaineet					
Natrium (NA)	SFS-EN ISO 16967:2015 mod.	mg/kg ka	580	860	790
Kalium (K)	SFS-EN ISO 16967:2015 mod.	mg/kg ka	550	700	600
Arseeni (As)	SFS-EN ISO 16967:2015 mod.	mg/kg ka	9,1	1,5	38
Elohopea (Hg)	SFS-EN ISO 16967:2015 mod.	mg/kg ka	<0,08	<0,08	<0,08
Kadmium (Cd)	SFS-EN ISO 16967:2015 mod.	mg/kg ka	0,14	0,12	0,21

Kromi (Cr)	SFS-EN ISO 16967:2015 mod.	mg/kg ka	24	3,0	51
Kupari (Cu)	SFS-EN ISO 16967:2015 mod.	mg/kg ka	18	2,6	39
Lyijy (Pb)	SFS-EN ISO 16967:2015 mod.	mg/kg ka	17	7,8	97
Nikkeli (Ni)	SFS-EN ISO 16967:2015 mod.	mg/kg ka	1,4	<1	2,7
Sinkki (Zn)	SFS-EN ISO 16967:2015 mod.	mg/kg ka	110	82	220
Liukoiset alkuaineet					
Alumiini (AL), metallinen	CENT/TS 15412	% ka	<0,01	<0,01	<0,01

Taulukko 9 Kierrätyspuumurskeen alkuaineet ja hivenaineet

6.3 Tuhkan sulamiskäyttäytymisen tulokset

Puistorisumurskeen ja kierrätyspuumurskeen tuhkan sulamiskäyttäytymisessä havaitaan joitakin eroja. Kierrätyspuumurskeen tuhka sulaa korkeammassa lämpötilassa. Suurin eroavaisuus ilmenee 0–25 ja 25–100 fraktioiden välillä, missä puistorisumurske (HT) 1210 °C (FT) 1290 °C ja kierrätyspuumurske sulaa (HT) 1390 °C (FT) 1440 °C. Muilta osin merkittäviä eroja polttoaineiden välillä ei havaittu. Tuhkan sulamiskäyttäytymisen tulokset on esitetty taulukossa 10.

Tuhkan sulamiskäyttäytyminen	Menetelmä	PURI (seulomaton) (°C)	PURI 25 - 100 (°C)	PURI 0 - 25 (°C)
Tuhkautus tehty	SFS-EN ISO 21404	550	550	550
Kutistumislämpötila (SST)	SFS-EN ISO 21404	1150	1160	1150
Muodonmuutoslämpötila (DT)	SFS-EN ISO 21404	1180	1250	1180
Puolipallolämpötila (HT)	SFS-EN ISO 21404	1260	1290	1210
Sulamislämpötila (FT)	SFS-EN ISO 21404	1310	1320	1290
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen	Menetelmä	KIPU (seulomaton) (°C)	KIPU 25 - 100 (°C)	KIPU 0 - 25 (°C)
Tuhkautus tehty	SFS-EN ISO 21404	550	550	550
Kutistumislämpötila (SST)	SFS-EN ISO 21404	1100	1050	1050
Muodonmuutoslämpötila (DT)	SFS-EN ISO 21404	1190	1210	1210
Puolipallolämpötila (HT)	SFS-EN ISO 21404	1280	1390	1390
Sulamislämpötila (FT)	SFS-EN ISO 21404	1300	1440	1440

Taulukko 10 Tuhkan sulamiskäyttäytymisen tulokset kierrätyspuu- ja puistorisumurskeen osalta

7 Yhteenveto ja pohdinta

Opinnäytetyön päätavoitteena oli tutkia koneellisen seulonnan vaikutuksia eri polttoainefraktioiden ominaisuuksiin verrattuna seulomattomaan polttoaineeseen. Lisäksi pyrittiin selvittämään, voiko seulonnan avulla parantaa polttoaineen laatua poistamalla ei-toivotut ominaisuudet. Tasoseula osoittautui toimivaksi ratkaisuksi molemmille mursketyypeille. Polttoaineen ominaisuuksien ymmärtäminen on keskeistä polttoprosessin ohjauksen parantamiseksi. Kokonaisuudessaan eroavaisuudet fraktioiden välillä ja suhteessa seulomattomaan lähtöraaka-aineeseen olivat pienet lukuun ottamatta kahta poikkeusta.

Tutkimustulokset osoittivat, että seulomattoman puistorisumurskeen tuhkapitoisuus siirtyy lähes kokonaan 0–25 fraktioon. Seulomattomassa puistorisumurskeessa tuhkapitoisuus oli 550 °C:ssa 13 %. Vastaavasti 25–100 fraktiossa tuhkapitoisuus oli 550 °C:ssa 2,0 %. Vaikka 0–25 fraktiossa tuhkapitoisuus oli 550 °C:ssa korkea 15,8 %, se ei kuitenkaan vähentänyt fraktion lämpöarvoa merkittävästi. Tämän perusteella seulonta kyseiseen fraktioon ei ole perusteltua, koska fraktion lämpöarvo pysyi korkeana.

Kierrätyspuumurskeen osalta havaittiin, että 0–25 fraktioon kertyy huomattavasti enemmän ei-toivottuja alkuaineita. Seulomaton kierrätyspuumurske luokiteltiin B-luokan biopolttoaineeksi, kun taas 0–25 fraktio luokiteltiin C-luokan kierrätyspolttoaineeksi.

Jatkotutkimuksessa olisi suositeltavaa tarkastella tarkemmin puistorisumurskeen osalta sitä, olisiko olemassa fraktio, jossa lämpöarvo pienenesi merkittävästi samalla kun tuhkapitoisuus pysyisi korkeana. Myös sellaisten lisäaineiden syöttämistä polttoaineen sekaan, jotka nostaisivat tuhkan muodonmuutos- ja sulamislämpötilaa ja näin vähentäisivät tuhkan sintraantumista arinalla ja tulipesässä voitaisiin selvittää ja tutkia. Kierrätyspuumurskeen osalta olisi hyödyllistä selvittää, mistä korkeat alkuainepitoisuudet johtuvat. Käsitelty puujäte on hyvin heterogeeninen aine, josta on vaikeaa visuaalisesti erottaa, onko kyseessä B-luokan vai C-luokan polttoaine.

Lähteet

- Alakangas E, & Impola R. 2013. Puupolttoaineiden laatuohje VTT-M-07608-13. Viitattu 10.11.2023. Saatavissa: <https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2013/VTT-M-07608-13.pdf>
- Alakangas E, & Wiik C. 2008. Käytöstä poistetun puun luokittelu ja hyvien käytäntöjen kuvaus. VTT-R-04989-08. Viitattu 10.11.2023. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2008/VTT-R-04989-08.pdf>
- Alakangas E, Hurskainen M, Laatikainen-Luntama J & Korhonen J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT technology 258. Viitattu 16.11.2023. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf>
- Alakangas E, Kurkisuo K, Tikka T & Fredriksson T. 2014. Käytöstä poistetun puun luokittelun soveltaminen käytäntöön – VTT- M-01931-14. Bioenergia ry, Energiategollisuus ry, Metsäteollisuus ry. Viitattu 13.11.2023. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2014/VTT-M-01931-14.pdf>
- Asikainen A, 2018. TAPION taskukirja. E-kirja. Teoksen toimittanut Rantala, S. Helsinki: Metsäkustannus.
- Kymenlaakson Jäte. 2023. Yrityksen esittely. Toimintajärjestelmä. Viitattu 19.11.2023. Saatavissa rajoitetusti.
- Kymenlaakson Jäte. 2023. Lämpökeskus. Toimintajärjestelmä. Viitattu 19.11.2023. Saatavissa rajoitetusti.
- Luonnonvarakeskus. 2023. Puun energiakäyttö 2022 (ennakko). Viitattu 11.11.2023. Saatavissa: <https://www.luke.fi/fi/tilastot/puun-kaytto/puun-energiakaytto-2022-ennakko>
- Luonnonvarakeskus. 2023. Puun käyttö 2022 (ennakko). Viitattu 11.11.2023. Saatavissa: <https://www.luke.fi/fi/tilastot/puun-kaytto/puun-kaytto-2022-ennakko>
- Moilanen A. 2006. Thermogravimetric characterisations of biomass and waste for gasification processes. VTT publications 607. Viitattu 17.11.2023. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/2006/P607.pdf>
- SFS-EN ISO 16948. 2015. Solid biofuels. Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen (ISO 16948:2015). Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 13.11.2023. Saatavissa rajoitetusti: <https://online.sfs.fi>
- SFS-EN ISO 16967. 2015. Solid biofuels. Determination of major elements. AL, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na AND Ti (ISO 16947:2015). Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 13.11.2023. Saatavissa rajoitetusti: <https://online.sfs.fi>
- SFS-EN ISO 16994. 2016. Solid biofuels. Determination of total content of sulfur and chlorine (ISO 16994:2016). Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 13.11.2023. Saatavissa rajoitetusti: <https://online.sfs.fi>

SFS-EN ISO 17225-1. 2021. Kiinteät biopolttoaineet. Laatuvaatimukset ja luokat. Osa 1: Yleiset laatuvaatimukset (ISO 17225-1:2021). Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 13.11.2023. Saatavissa rajoitetusti: <https://online.sfs.fi>

SFS-EN ISO 17828. 2015. Kiinteät polttoaineet. Irtotiheyden määrittäminen (ISO 17828:2015). Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 14.11.2023. Saatavissa rajoitetusti: <https://online.sfs.fi>

SFS-EN ISO 18122. 2022. Solid biofuels. Determination of ash content (ISO 18122:2022). Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 13.11.2023. Saatavissa rajoitetusti: <https://online.sfs.fi>

SFS-EN ISO 18125. 2017. Solid biofuels. Determination of calorific value (ISO 18125:2017). Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 14.11.2023. Saatavissa rajoitetusti: <https://online.sfs.fi>

SFS-EN ISO 18134-2. 2017. Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittäminen. Uunikuivatusmenetelmä. Osa 2: Kokonaiskosteus. Yksinkertaistettu menetelmä (ISO 18134-2:2017). Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 13.11.2023. Saatavissa rajoitetusti: <https://online.sfs.fi>

SFS-EN ISO 21404. 2020. Solid biofuels. Determination of ash melting behaviour (ISO 21404:2020). Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 14.11.2023. Saatavissa rajoitetusti: <https://online.sfs.fi>