

BIOPELLETIN SOVELTUVUUS KUO- REN KAASUTUKSEN SEOSPOLTTO- AINEEKSI

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Aleksi Kuivakangas	
Työn nimi Biopelletin soveltuvuus kuoren kaasutuksen seospolttoaineeksi	
Päiväys 26.1.2024	Sivumäärä/Liitteet 42/0
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Metsä Fibre Oy	
Tiivistelmä Äänekosken biotuotetehtaan talteenottolinjalla sijaistee kuoren kaasutin, jonka tarkoituksena on polttaa havu-/koivukuoriseosta muodostaen kaasuttimen avulla tuotekaasua meesauunille. Lisäksi kaasuttimen tarkoitus on korvata uunilla käytettävä pikiöljy. Talteenottolinjan alaisuudessa sijaitsee biokaasulaitos, minkä tarkoituksena on käsitellä Äänekosken tehdasalueen jätevesilietteet ja valmistaa niistä lopputuotteiksi biopellettiä sekä bio-kaasua. Biopelletin polttoainekäytössä on tunnistettu haastavia ominaisuuksia ja sen takia loppusijoituskoh-teita biopelleteille on hyvinkin rajallinen määrä. Tämän Opinnäytetyön tarkoituksena oli laatia esiselvitys, pys-tyisikö biopellettiä käyttämään kuoren kaasutusjärjestelmässä seospolttoaineena. Lisäksi työssä otetaan kan-taa, miten biopelletin käyttö vaikuttaisi biotuotetehtaan kalkki- ja lipeäkiertoon. Opinnäytetyö alkoi perehtymällä biopelletin ominaisuuksiin sekä aikaisempiin materiaaliin, mitä biopelletin käytöstä seospolttoaineena oli laadittu. Tämän jälkeen tarkasteltiin tasenäkökulmasta biopelletin poltosta syn-tyvien vierasaineiden määriä sekä vaikutuksia biotuotetehtaan kalkki- ja lipeäkierron. Esiselvityksen aikana ei toteutettu mitään konkreettisia koeajokasjoja. Esiselvityksen saatujen tulosten perusteella, biopellettien käsittelyä kuoren kaasuttimella ei kannattaisi toteut-taa biopelletin seospoltosta syntyvien kadmium- (Cd) ja alumiinipitoisuuksien (Al) takia. Biopelletit pystyttäi-siin käsittelemään sekä polttamaan kaasuttimessa, mutta siitä aiheutuisi esiselvityksen perusteella raja-arvo-jen ylityksiä ja mahdollisia prosessiongelmia.	
Avainsanat Biopelletti, Tuotekaasu, Vierasaine (NPE)	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering	
Author(s) Aleksi Kuivakangas	
Title of Thesis The Suitability of Biopellets as a Blend Fuel for Bark Gasifier	
Date 26 January 2024	Pages/Appendices 42/0
Client Organisation /Partners Metsä Fibre Oy	
Abstract The recovery line of Äänekoski's bioproduct mill houses a bark gasifier, whose purpose is to burn a mixture of spruce and birch bark, forming process gas for the black liquor recovery boiler. Additionally, the gasifier aims to replace the pitch oil used in the boiler. Under the recovery line, there is a biogas plant, the purpose of which is to treat wastewater sludge from the Äänekoski factory area and produce biopellets and biogas as end products. The use of biopellets as a fuel has been identified with challenging characteristics, and therefore, the disposal options for biopellets are quite limited. The aim of this thesis was to conduct a feasibility study on whether biopellets could be used in the bark gasification system as a co-firing fuel. Additionally, the thesis addresses how the use of biopellets would affect the lime and caustic soda loop of the bioproduct mill. The thesis was begun by familiarizing itself with the characteristics of biopellets and reviewing previous literature on the use of biopellets as a co-firing fuel. Subsequently, the amounts of impurities generated from the combustion of biopellets and their effects on the lime and caustic soda loop of the bioproduct mill were examined from a balance perspective. No concrete trial runs were conducted during the feasibility study. Based on the results obtained from the feasibility study, handling biopellets in the bark gasifier would not be advisable due to the cadmium (Cd) and aluminum (Al) concentrations resulting from the co-firing of biopellets. Biopellets could be processed and burned in the gasifier, but, according to the feasibility study, this would lead to exceedance of limit values and potential process problems.	
Keywords Biopellets, Product gas, NPE (Non-process elements)	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
1.1	Opinnäytetyön tausta ja tavoitteet	6
1.2	Toimeksiantajan esittely	6
2	LIETEJAKEIDEN KÄSITTELY	7
2.1	Biopelletit ja niiden valmistus.....	7
3	KAASUTUS JA REAKTIOT	9
3.1	Kaasutus yleisesti.....	9
3.2	Kuori polttoaineena	9
3.3	Kuoren kuivausjärjestelmä.....	10
3.3.1	Kuoren kuivaus.....	10
3.3.2	Polttoaineen syöttöjärjestelmä.....	11
3.3.3	Kiertopetikaasutus ja toimintakuvaus	11
3.4	Tuotekaasun muodostuminen	12
4	SELLUTEHTAAN KALKKI-, JA LIPEÄKIERTO.....	14
4.1	Kemikaalikierto	15
4.1.2	Haihduuttamo	15
4.1.3	Soodakattila	16
4.2	Kalkkikierto.....	16
4.2.1	Kaustisointi	16
4.2.2	Meesan poltto	17
4.3	Kemikaalitaseet ja vierasaineet	18
4.3.1	Rikki-natriumtase.....	18
4.3.2	Vierasaineet	19
4.3.3	Vierasaineiden aiheuttamat haitat.....	19
4.3.4	Vierasaineiden hallinta	20
5	TYÖN TOTEUTUS	21
5.1	Biopelletin ominaisuuksia ja vertailua	21
5.2	Vaikutukset kuoren kaasutusjärjestelmään	24
5.3	Soveltuvuus palamisprosessiin	25
5.4	Vierasaineiden vaikutukset	26
5.5	Biopellettitaseen rakentaminen	27

5.6	Prosessikierrosta poistettavat jakeet.....	30
6	TULOKSET	32
6.1	Biopelletin annostelu ja käsittely laitteistolla	32
6.2	Biopelletin polttaminen kaasuttimessa	33
6.3	Biopelletin vierasaineiden vaikutukset.....	33
6.3.1	Kaasuttimen pohjatuhka	34
6.3.2	Biopellettien raskasmetallipitoisuudet.....	35
6.3.3	Rikastuminen sähkösuotimen pölyyn.....	36
6.3.4	Rikastuminen Kalkkikiertoon.....	38
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	39
8	LÄHTEET.....	41

1 JOHDANTO

1.1 Opinnäytetyön tausta ja tavoitteet

Moderneissa tehdasintegraateissa tavoitteena on pitää sisäiset kierrot mahdollisimman suljettuina sekä jatkuvasti löytää uusia loppusijoituskohteita lopputuotteille. Lisäksi vuoden 2030 asetetut kestävyystavoitteet asettavat merkittäviä toimenpiteitä ilmastonmuutoksen hillinnän kannalta sekä luonnonvarojen hyödyntämisen osalta. Merkittävimpiä toimenpiteitä prosessin näkökulmasta katsottuna ovat jätteen syntymisen minimoiminen, energiatehokas tuotanto ilman fossiilisia polttoaineita sekä tuotannon tekemisessä käytettävän veden käytön vähentäminen.

Äänekosken Metsä Fibren biotuotetehdas valmistaa päätuotteenaan havu- ja koivusellua kartongin, pehmo- ja painopaperin sekä erikoistuotteiden raaka-aineeksi. Lisäksi tehdas valmistaa erilaisia biotuotteita. Biotuotetehtaan talteenottolinjalla sijaitsee kuoren kaasutin, joka on hyvä esimerkki kustannustehokkaasta ja oivallisesta ratkaisusta hyödyntää materiaali omassa prosessissa. Kaasuttimen tarkoituksena on polttaa havu/kuoriseosta reaktorissa muodostaen tuotekaasua ja korvata piikkiöljyn käyttö meesauunilla. Jätevedenpuhdistamon alueella sijaitsee mädättämö, minkä tarkoituksena on käsitellä tehdasalueelta tulevat jätevesilietteet ja valmistaa niistä lopputuotteeksi biokaasua sekä biopellettejä. (Fibre, 2023)

Mädättämöllä tuotettujen biopelletin polttoainekäytössä on tunnistettu tietynlaisia haasteita. Haastavia ominaisuuksia ovat mm. suuri tuhkapitoisuus sekä korkeat vierasainemäärät. Lisäksi biopelletin loppusijoituskohteita on hyvin rajallinen määrä, joten uudet käsittelyratkaisut olisivat merkittävä etu vähennettäessä tarpeetonta väliaikaisvarastointia.

Työn tarkoituksena oli selvittää, pystyisikö mädättämöllä tuotettua biopellettiä käsittelemään kuoren kaasutusjärjestelmässä ja miten se vaikuttaisi tehtaan muihin osa-alueisiin. Opinnäytetyö toteutettiin esiselvitystyönä ja työssä tutkittiin biopelletin ominaisuuksia. Lisäksi opinnäytetyössä selvitettiin taselaskennan avulla, rikastuuko pelletin sisältämät vierasaineet kiertoon ja tuleeko raja-arvoylityksiä.

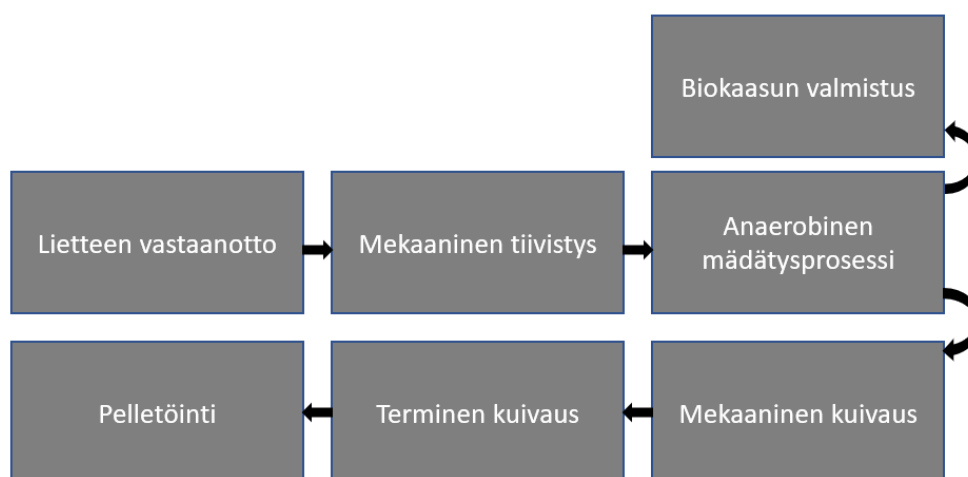
1.2 Toimeksiantajan esittely

Opinnäytetyö tehtiin Metsä Group metsäteollisuus konserniin kuuluvalla Metsä Fibren Äänekosken biotuotetehtaalte, joka on pohjoisen pallonpuoliskon toiseksi suurin havu- ja koivusellua valmistava tehdas. Vuotuinen kapasiteetti tuotannolle on 1,3 miljoona tonnia sellua vuodessa ja päätavoitteena on valmistaa sellua kartongin, pehmo- ja painopaperin sekä erikoistuotteiden raaka-aineeksi. Aikaisempi sellutehdas nimitys on korvattu biotuotetehdas nimityksellä siksi, koska tehdas valmistaa päätuotteen ohella paljon erilaisia biotuotteita, tuottaa biopohjaista sähköenergiaa eikä käytä ollenkaan fossiilisia polttoaineita. Käytettävä puuraaka-aine hyödynnetään sataprosenttisesti ja tuotannon sivuvirrat mahdollisimman tarkasti. Biotuotetehtaalte työskentelee noin 240 ammattilaista ja se on Äänekosken alueen yksi merkittävimmistä työnantajista. (Fibre, 2023)

2 LIETEJAKEIDEN KÄSITTELY

Sellun valmistuksesta muodostuu lietejakeita, joiden laadulliset ominaisuudet vaihtelevat tehdaskoh-
teisesti. Kuitenkin yksi yhteinen tekijä on jätevesilietteilte tunnistettu ja se on massiiviset vesimäärät,
jotka tekevät käsittelystä haastavaa ja kuluttavat sitä kautta runsaasti energiaa. Pääsääntöisesti
metsäteollisuudessa lietteitä voidaan hyödyntää energialähteenä esimerkiksi polttamalla voimakatti-
loissa tai maanrakennus ja lannoituskäytössä. (Knowpulp, 2023)

Tässä luvussa käydään lävitse Äänekosken Metsä Fibren lietteenkäsittelylaitosta, joka paikallisesti
tunnetaan nimellä Biokaasulaitos.



Kuva 1. Biokaasulaitoksen prosessikaavio. (Kuivakangas, 2023)

Kuvassa 1 on esitetty Äänekosken biokaasulaitoksen prosessikaavio. Osaston tarkoituksena on pois-
taa lietejakeesta nestettä, kasvattaa kuiva-ainepitoisuutta ja muodostaa lopputuotteeksi biopellettiä.
Lisäksi biokaasulaitoksen anaerobisessa prosessivaiheessa lietteestä erottuu metaania, hiilidioksidia
ja muita yhdisteitä. Muodostunut raakakaasuseos ohjataan kaasulaitteistolle, mistä lopputuotteeksi
saadaan polttoaineeksi soveltuvaa metaania.

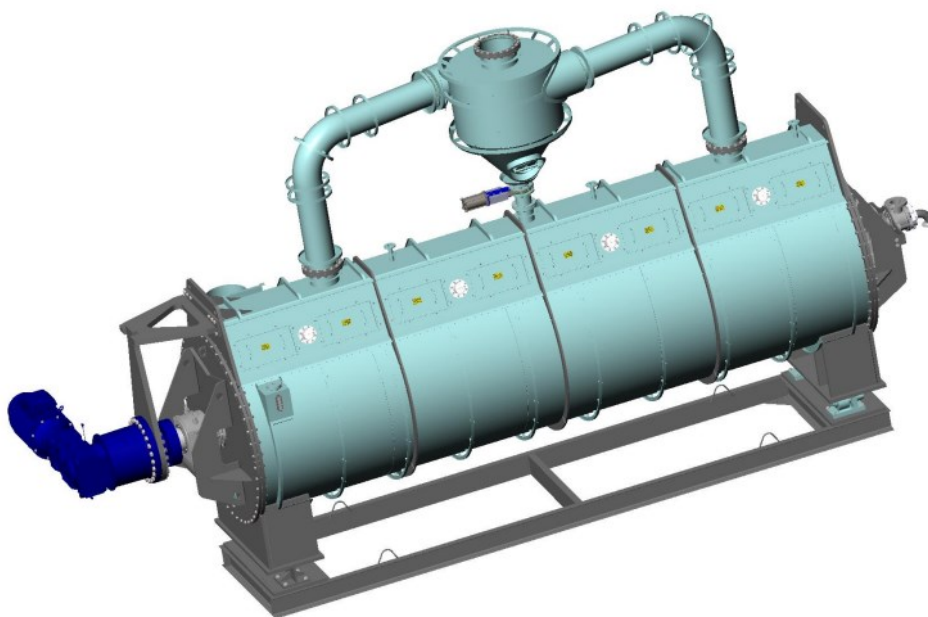
2.1 Biopelletit ja niiden valmistus

Biopelletit vastaavat puupellettiä ja pelleteillä voidaan korvata esimerkiksi kivihiiltä voimalaitoksilla
tai fossiilipohjaisia polttoaineita teollisuudessa. Biopellettien pääraaka-aineena ovat metsäteollisuus-
den eri lietejakeet ja pellettien toimivuus voimakattiloissa perustuu puubiomassan sisältämän lignii-
nin korkeaan energiasisältöön. Mädättämällä lietteet käsitellään termisesti, joten ne ovat myös mik-
robivapaita. (Kettunen, 2019)

Biotuotetehtaan jätevedenpuhdistamolla muodostuu kolmea erilaista lietejätettä (primääri-, ylijäämä- sekä tertiääriliete), jotka pumpataan mädättämöprosessin ensimmäiseen vaiheeseen, mitä kutsutaan mekaaniseksi tiivistykseksi. Tarkoituksena on erottaa lietteen sisältämä neste ja kiintoaine toisistaan sekä nostaa lietteen kuiva-ainepitoisuutta. Tyypillisimpiä erotuslaitteistoja ovat suotonauhapuristimet tai linkokuivaus. Erotettu nestejäte, jota kutsutaan rejektivedeksi kulkeutuu painovoimaisesti säiliöön ja palautetaan pumppaamalla takaisin jätevedenpuhdistamolle.

Tiivistyksen jälkeen nesteestä erotettu lietejäte pumpataan mädätysreaktoreihin, missä mesofiilissä olosuhteissa orgaaninen aine erottuu lietejätteestä ja lopputuotteeksi syntyy metaania sekä hiilidioksidia. Määdätejäännöksen viipymäaika bioreaktorissa on tyypillisesti noin 20-32 vuorokautta ja viipymäaikaan vaikuttaa lietteen syöttö- ja vajautusmäärät.

Anaerobisesta prosessista vajautettava määdätejäännös kuivataan mekaanisesti dekantterilingolla, joka perustuu keskipakovoimaiseen erotustapaan. Jotta haluttu kuiva-ainepitoisuus saavutetaan lietteelle, apuaineena erotuksessa käytetään polymeeria, joka edistää "flokkauksen" syntymistä. (Aprotech, 2019)



Kuva 2. Terminen kuivain KDM-450 (Mons, 2016)

Mekaanisesti kuivattu määdätejäännös syötetään kuvassa 2 olevaan termiseen kuivaimeen. Jotta määdätteen kuiva-ainepitoisuus saadaan nostettua halutulle tasolle, käytetään apuna välipainehöyryä, joka lämmittää kuivaimen sisällä olevan kiekkokuljettimen vaaditulle lämpötila-alueelle.

Kuivaimessa oleva roottoriosio vie määdätettä eteenpäin samalla kuivaten sitä. Lopputuotteena syntyy määdätepölyä, jonka tyypillinen kuiva-ainepitoisuus on 80 – 90 %. Kuivausprosessin aikana syntynyt haihdehöyryn ja pölyn seos kulkeutuu haihdehöyrylinjastoa pitkin pesulaatikoille, mistä pölypartikkelit pestään likaislauhteeksi. Esipuhdistettu höyry ohjataan termisen kuivaimen lauhduttimelle, missä höyry lauhdutetaan ja lauhde ohjataan likaislauhdesäiliön kautta takaisin prosessiin.

Termisesti kuivattu pöly syötetään ruuvikuljettimien sekä elevaattorin avulla höyrysekoittimelle, jonka tarkoituksena on sekoittaa sekä annostella materiaali rakeistimelle. Rakeistimessa kolleripyörät kuljettavat pölyn matriisiin lävitse, missä pöly puristuu kiinteään olomuotoon. Rakeistuksen jälkeen pelletit syötetään varastosiiiloihin, mistä ne kuljetetaan joko välivarastointiin tai loppusijoituspaikkaan poltettavaksi.

3 KAASUTUS JA REAKTIOT

3.1 Kaasutus yleisesti

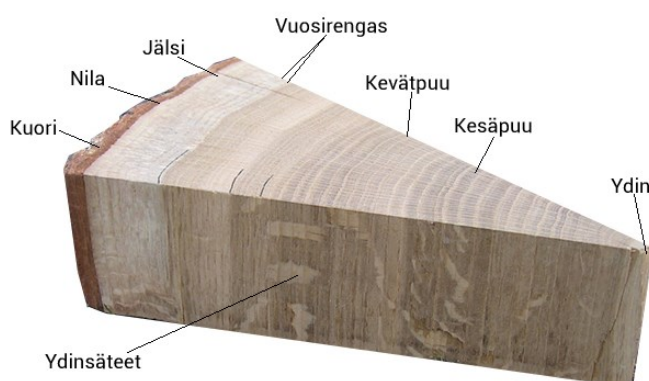
Kaasutus on nopeasti kehittyvä teknologia, jolla kierrätysmateriaalia ja jätettä voidaan muuttaa käyttökelpoiseksi energiaksi. Kaasutusta voidaan käyttää uusissa energiatuotantokattiloissa tai muokata olemassa oleva kattila prosessille sopivaksi. Tällä hetkellä vallitsevin kaasutustekniikka mitä käytetään on osittainen hapetus eli polttoainetta poltetaan tilassa, jossa on vähemmän happea käytössä mitä palaminen yleensä edellyttää. (Knowpulp, 2023)

Kaasutus on termokemiallinen prosessi, jossa kiinteää biomassaa muutetaan kaasumaiseen muotoon, jota kutsutaan tuotekaasuksi. Kaasutus tiivistää syötettävässä polttoaineessa olevan energian kemialliseksi energiaksi, joka johtaa korkeaan energiatiheuteen. Käytettävä syöte voi koostua esimerkiksi puusta, puun kuoresta ja sahanpurusta. (Pongracz, 2011)

Polttoaineen tuottaminen biomassan kaasutuksella on osoittautunut useista syistä hyväksi ratkaisuksi. Esimerkiksi meesauunilla käytettävä pikiöljy tai muut fossiilipohjaiset polttoaineet on onnistuttu korvaamaan tuotekaasulla. Lisäksi kaasutus on hyvin kustannustehokasta verrattuna siihen, että kuorta kuljetettaisiin polttoon muualle.

3.2 Kuori polttoaineena

Puun kuori muodostuu ulkokuoresta ja sisäkuoresta, jota kutsutaan nilaksi. Kuoren ja puun välissä sijaitseva jälsi tuottaa puuainesta sisäpuolelleen ja ulkopuolelleen nilaa, mitä pitkin puu kuljettaa yhteyttämistuotteita runkoon ja juuristoon. Tyypillisesti kuoren osuus runkopuusta on noin 10 -20%, mutta pienissä oksissa sen osuus kasvaa merkittävästi. (VTT, 2016) Kuvassa 3. on esitetty puun eri kerrokset.



Kuva 3. Puun kerrokset (Pro Puu -yhdistys)

Kuoressa on huomattavia määriä ligniiniä joten sen lämpöarvo on hyvin korkea. Tästä syystä kuori sopii hyvin metsäteollisuuslaitosten ja lämpökeskusten kattiloiden polttoaineeksi. Kuitenkin lämpöarvo riippuu pitkälti puulajista, koska niiden välillä lämpöarvovaihtelua tapahtuu huomattavasti. Esimerkiksi lehtipuulla lämpöarvo on selvästi korkeammalla tasolla verrattuna havupuuhun. Poikkeuksena on haapa, jonka kuoren lämpöarvo alhaisempi verrattuna muihin lehtipuihin. (VTT, 2016)

Lehtipuilla ulkokuoren lämpöarvo on parempi kuin sisäkuoren osuudessa. Puun ulkokuoren teholliset lämpöarvot kuiva-aineessa ovat luokkaa 20 – 32 MJ/kg kun taas puun sisäkuorella ne ovat 20 MJ/kg tai hieman alle. Merkittävimmät tekijät, mitkä vaikuttavat polttoaineominaisuuksiin, ovat korkeat kosteus- ja tuhkapitoisuudet, puulajin palakoko sekä millä suhteella lehti/havupuuta käytetään polttoaineena. (VTT, 2016)

Polttoaineominaisuuksia voidaan kuitenkin parantaa erilaisilla käsittelylaitteistolla. Tyypillisiä prosesseja, millä ominaisuuksia parannetaan ovat mm. kuoren puristaminen, kuivaaminen tai sekoittaminen muun polttoainejakeen sekaan. (VTT, 2016)

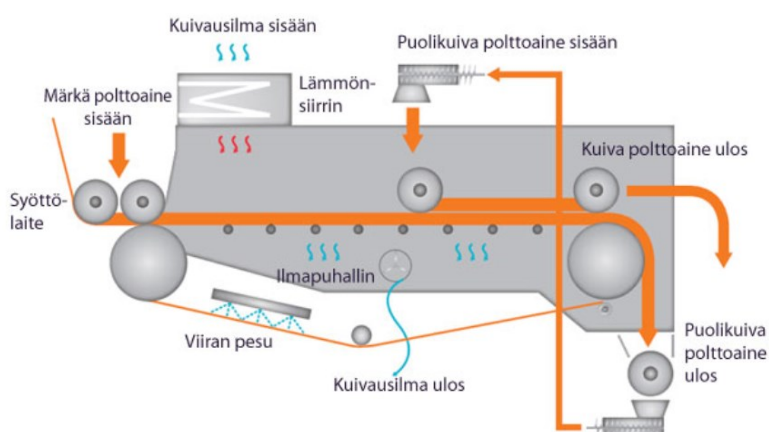
3.3 Kuoren kaasutusjärjestelmä ja oheislaitteet

Äänekosken biotuotetehtaalla on käytössä Valmetin toimittama CFB-kaasutin (Circulating Fluidized Bed Gasifier), joka perustuu kiertoleijupetikaasutuksen tekniikkaan. Polttoaineena kaasutinjärjestelmässä käytetään havu/koivukuoriseosta ja lopputuotteena syntyvää tuotekaasua hyödynnetään meesauunin polttoaineena kalkin poltossa. Kaasutusjärjestelmä koostuu kuoren kuivauksesta, polttoaineen syöttöjärjestelmästä sekä kaasutusreaktorista, joita käydään lävitse seuraavassa osiossa tarkemmin.

3.3.1 Kuoren kuivaus

Viirakuivuri (Kuva 4), mistä käytetään myös nimityksiä hihnakuivuri tai kerroskuivuri on yleisin kuivurityyppi matalassa lämpötilassa tapahtuvalle kuivaukselle. Sitä käytetään yleisesti sahanpurun, hakkeen, kuoren sekä lietteen kuivauksessa. Kuorikentältä kuljettimilla ajettu kostea polttoaine levitetään tasaisesti liikkuvalla viiraosalla koko kuivaimen leveydelle syöttölaitteiston avulla. Merkittävässä roolissa kuivurin toiminnan kannalta on muodostettavan patjan paksuus sekä polttoaineen jakautuminen viiraosalle. (Motiva, 2014)

Biomassan hihnakuivuri



kuva 4. Biomassan hihnakuivurin yksinkertaistettu prosessikuva (Knowpulp, 2023)

Materiaalin leivityksen jälkeen kuivuriin syötetään kuivausilmaa materiaalikerroksen ja viiraosan lävitse. Tyypillinen lämpötila, missä kuorenkuivuria operoidaan on noin 80 – 90 °C. Kuuma ilma jäähtyy ja kostuu sitomalla vettä kuivattavasta materiaalista. Kosteaa ilmaa poistetaan kuivurista poistoputkiston kautta puhaltimien avulla. Hihnan päässä kuivattu materiaalikerros poistetaan kuivurista ja syötetään polttoainejärjestelmään. Joissakin viirakuivurimalleissa on mahdollista kierrättää polttoainesyöttöjärjestelmään syöttämisen sijasta kuorta takaisin viiraosalle lisäkuivaukseen. (Knowpulp, 2023)

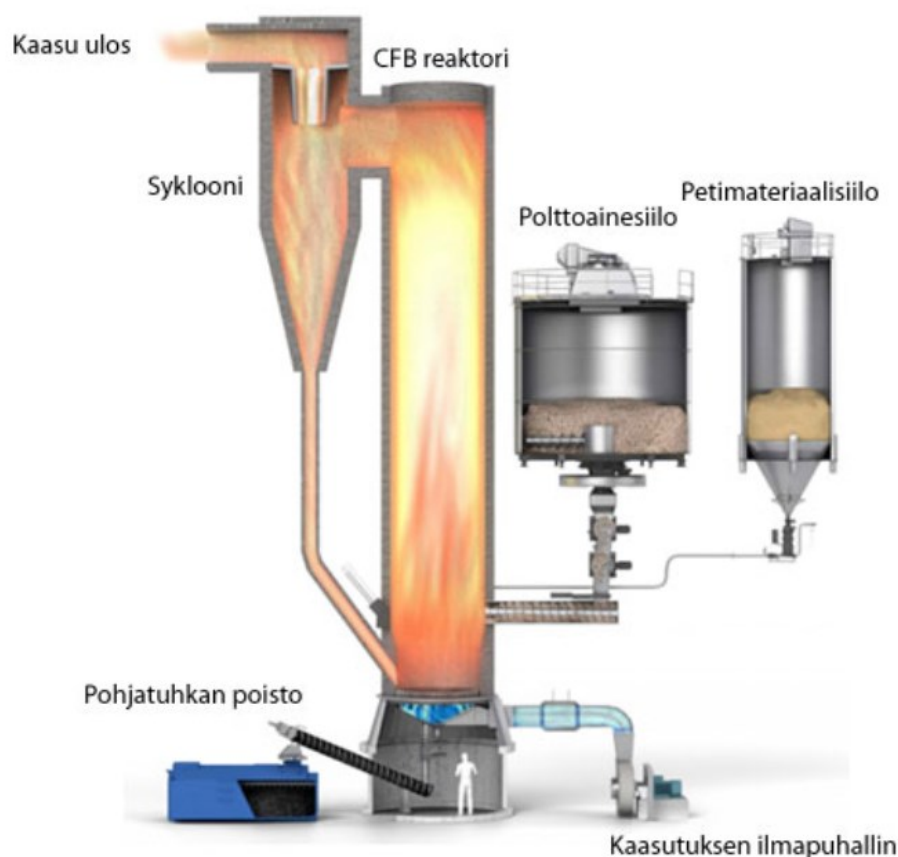
3.3.2 Polttoaineen syöttöjärjestelmä

Syöttöjärjestelmän tehtävänä on huolehtia polttoaineen tasainen syöttö kaasutusreaktoriin. Syöttöjärjestelmän mekaanisilla ratkaisuilla ja tiivistysilmalla ehkäistään tuotekaasun karkaaminen reaktorista polttoaineen syötön yhteydessä. (Valmet, 2017)

Kuivattu polttoaine syötetään polttoainesiloihin, jotka toimivat puskurina sekä mahdollistavat tasaisen syötön kaasuttimeen. Polttoainesiilot on varusteltu pyörivillä levittimillä ja purkuruuvilla, jotka tasaavat kuormaa ja annostelevat polttoainetta järjestelmään. Polttoaine kulkee sulkusyöttimien lävitse tunkijaruuville, mistä polttoaine ripotellaan kaasutusreaktoriin.

3.3.3 Kiertopetikaasutin ja toimintakuvaus

Ilmanpaineessa toimiva CFB-kaasutusjärjestelmä (Kuva 5). koostuu reaktorista, jossa polttoaineen kaasutusreaktio tapahtuu sekä syklonista, missä petimateriaali valuu palautusputkea pitkin takaisin reaktorin pohjaosaan sekä tuotekaasulinjasta. Käyttölämpötila on tyypillisesti 700 – 1000 °C joka tietenkin riippuu polttoaineesta ja laitetypistä. (Ojanen, 2001)



kuva 5. Valmetin CFB -kaasutuslaitos (Knowpulp, 2023)

Polttoaine syötetään kaasuttimen sisälle. Reaktoriin jouduttuaan polttoaineen hiukkaset alkavat kuivua ja reaktion aikana polttoaine muuttuu kaasuksi, hiileksi sekä tervaksi. Osa hiilestä valuu pohjalle ja hapettuu tuottaen samalla lämpöä. Loput pyrolyysituotteista lähtevät kaasutusilmavirtauksen mukana ylöspäin reaktorissa, jossa heterogeenisen ja homogeenisen reaktion seurauksena kaikki reaktioaineet muuttuvat kaasumaiseksi. Kaasumainen seos kulkeutuu syklooniin, missä tarkoituksena on erotella tuhka tuotekaasusta. Tästä huolimatta pieni osa tuhkasta kulkeutuu tuotekaasun mukana meesauunille. Syklonin jälkeen tuotekaasua pystytään hyödyntämään polttoaineena. (Ojanen, 2001)

Kaasutusprosessin aikana petimateriaalia vaihdetaan ajamalla reaktorissa olevaa petiä pohjatuhkajärjestelmän kautta tuhkalavalle ja vastaavasti syötetään uutta materiaalia tilalle petisiilosta. Tarkoituksena pitää reaktorissa käytettävä petimateriaali mahdollisimman edustavana ja lisäksi mahdollistaa toimiva leijutus kaasuttimen sisällä.

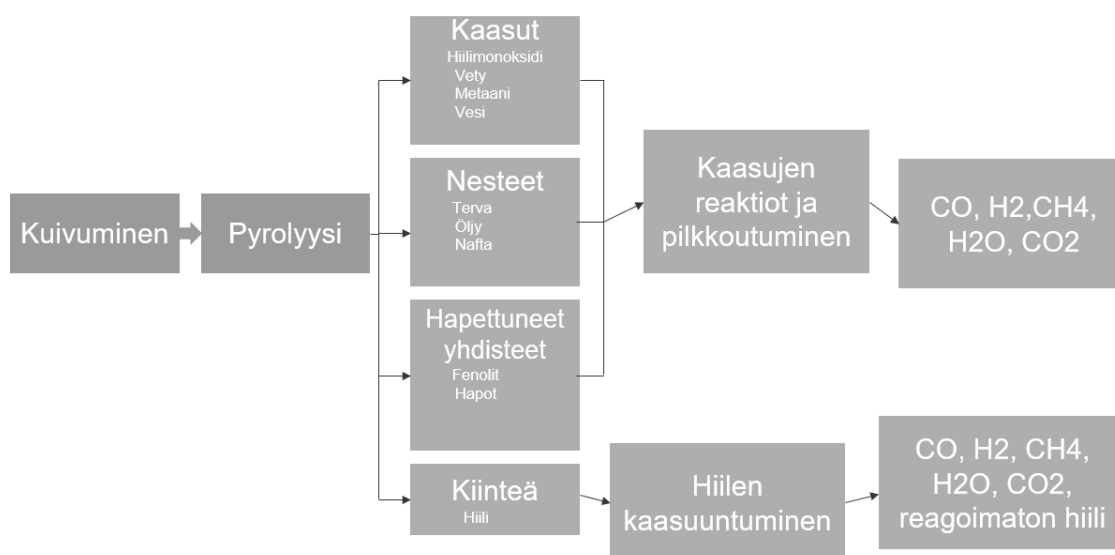
Jotta kaasutusprosessi onnistuu, joudutaan reaktorin sisälle syöttämään ilmaa puhaltimen avulla. Ilman syötön tarkoituksena on reaktorin pedin leijuttaminen sekä osallistuminen kaasutusreaktioihin.

3.4 Tuotekaasun muodostuminen ja ominaisuudet

Kaasuttimessa voidaan käyttää lähes mitä vain polttoainetta tai jätettä, joka sisältää hiiltä. Ainoita rajoittavia tekijöitä on palakoko, haihtuvat aineet ja polttoaineen kosteus. Tuotekaasun käytön kannalta polttoaineen ominaisuuksissa merkityksellisiä tekijöitä ovat syntyvän tuhkan määrä, alkalimetallit sekä terva ja happamat yhdisteet. (Basu, 2013)

Jotta polttoainetta voidaan käyttää kaasutusjärjestelmässä, se vaatii tyypillisesti korkean kuiva-ainepitoisuuden. Lisäksi jos polttoaine on liian kosteaa, tapahtuu polttoprosessin aikana merkittäviä energiahäviöitä kun ylimääräinen kosteus höyrystyy. Jokainen kilogramma vettä tarvitsee noin 2300 kJ lämpöä höyrystyäkseen sekä lisäksi 1500 kJ noustakseen kaasuttimen tyypilliselle lämpötila-alueelle. Mitä pienempi kosteus on sitä laadukkaampaa käytettävä tuotekaasu on. (Basu, 2013)

Kaasutusprosessi koostuu kolmesta vaiheesta, jotka ovat kuivuminen, pyrolyysi sekä hiilen kaasuuntuminen. Nämä vaiheet aktivoituvat kun kaasuttimessa tapahtuu osittaista palamisreaktiota. Selvää rajaa ei kaasutusprosessista pystytä päättämään, koska vaiheet tapahtuvat päällekkäin. Kaasutusprosessin tarkoitus on pyrkiä tuottamaan erilaisia kaasuja tai hiiltä kun taas nesteiden ja hapettuneiden yhdisteiden määrä pyritään pitämään mahdollisimman pienenä. (Basu, 2013) Kuvassa 6 on esitetty kaasutinprosessin vaiheet, hajoamisprosessi sekä siinä syntyvät yhdisteet.



Kuva 6. Kaasutusprosessin vaiheet. Muokattu alkuperäisestä lähteestä (Basu, 2013)

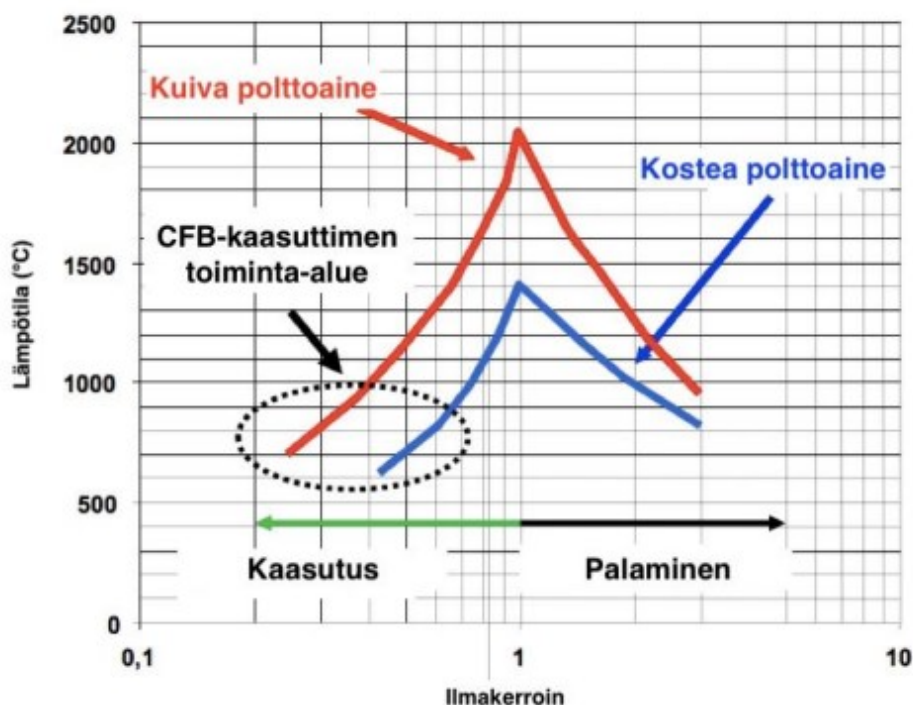
Lopullinen kuivuminen tapahtuu, kun syötettävä materiaali kulkeutuu kaasuttiimeen, jossa se vastaanottaa lämpöä reaktorin alaosan kuumalta vyöhykkeeltä. Alaosan lämpö esilämmittää polttoaineen ja haihduttaa siinä olevaa kosteutta. Lämpötilan noustessa, matalamolekyylipainoiset uuteaineet alkavat haihtua. Prosessi jatkuu sinne asti, kunnes lämpötila on noin 200 °C. (Basu 2013)

Polttoaineen kuivumisen jälkeen alkaa vähähappinen hajoamisprosessi, mitä kutsutaan pyrolyysiksi. Pyrolyysin tarkoituksena on termisesti erottaa polttoaineesta muodostuva puuhiili. Puuhiilellä tarkoitetaan reaktion aikana syntyvää hiiltä, joka sisältää myös vetyä ja happea. (Basu, 2013)

Toimintalämpötilaväli on 300 – 600 °C ja tämän aikana biomassasta hajoaa useita eri kiinteitä aineksia, nesteitä sekä kaasuja. (Basu, 2013)

Merkittävimpiä lopputuotteita ovat haitallinen terva, jota syntyy kaasun tiivistyessä nesteeksi. Lisäksi pyrolyysireaktiossa muodostuu eri hiiliyhdisteitä, vettä, hiilidioksidia ja hiilimonoksidia. Pyrolyysistä jäljelle jäänyt jäännöshiili kulkeutuu kaasutusvyöhykkeelle. (Basu, 2013)

Kaasutusvaihe sisältää kemiallisia reaktioita polttoaineessa olevien hiilivetyjen, höyryn, hiilidioksidin, hapen ja vedyn välillä. Tärkein kaasutettava lopputuote on pyrolyysivaiheesta tuotettu jäänöshiili. (Basu, 2018) Kuvassa 7. on esitetty tyypillinen CFB kaasuttimen lämpötila-alue.



Kuva 7. CFB-Kaasutuksen toiminta-alue. (Valmet, 2017)

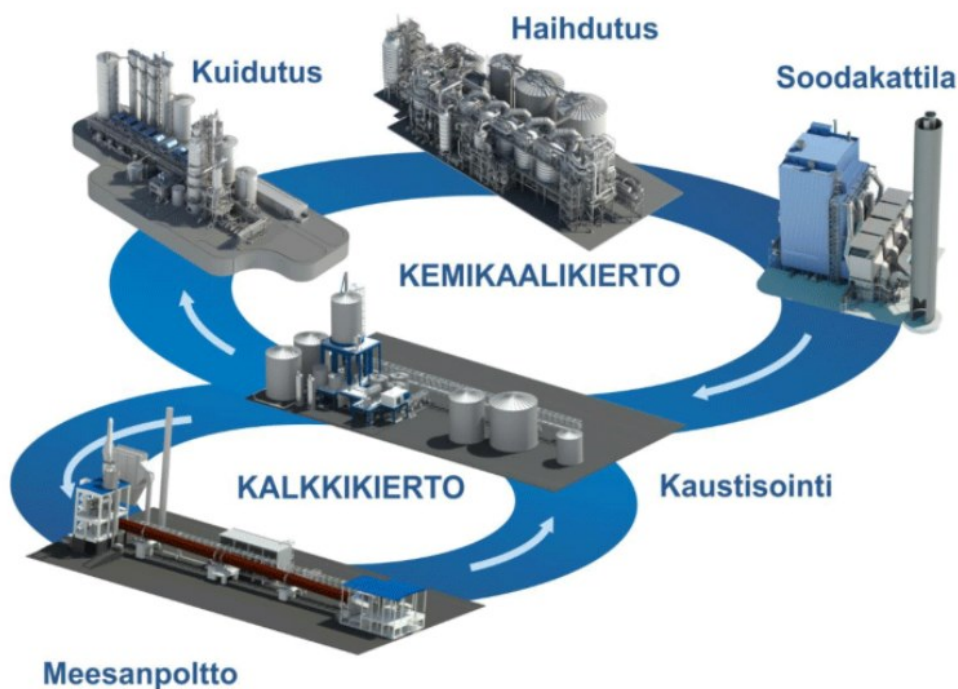
Jäljelle jäävän hiilen kaasuttaminen eli muuntaminen palamiskelpoiseksi kaasuksi vaatii tyypillisesti 800 -1000 °C lämpötilan, jonka jälkeen poltettavasta materiaalista jää jäljelle tuhkaa.

Lopputuotteeksi syntyvä tuotekaasu on seos, jonka pääkomponentit ovat häkä (CO), vety (H_2) ja metaani (CH_4). Lisäksi tuotekaasu sisältää pieniä määriä muita kaasuja, joilla on palamiseen tarvittavia ominaisuuksia. Näitä ovat hiilivedyt ja osa tervoista. Muut tuotekaasun komponentit hiilidioksidi (CO_2) ja typpi (N_2) ja vesihöyry (H_2O) ovat palamattomia kaasuja. Tuotekaasu ei sisällä ollenkaan happea (O_2) sillä kaasutusilmassa käytettävä happi kuluu kaasuttimen sisällä tapahtuvissa reaktioissa. (Valmet, 2017)

4 BIOTUOTETEHTAAN LIPEÄ- JA KALKKIKIERTO

Modernissa biotuotetehtaassa tavoitteena on pitää kemikaalikierto mahdollisimman suljettuna. Kuitenkin edellä mainitusta tavoitteesta huolimatta tapahtuu väkisin kemikaalihäviöitä ja prosessiin kuluu eri yhdisteitä hankittujen raaka-aineiden mukana.

Yksi biotuotetehtaan toimintaan vaikuttavista tekijöistä on tasapaino kemikaali- ja kalkkikierrossa. Taseiden kannalta kierrot biotuotetehtaalla jakautuvat lipeäkiertoon, kalkkikiertoon sekä soodakattilan ja meesauunin lentotuhkakiertoon. Lipeäkierrossa kulkee alkaliin liukenevia kemikaaleja. Kalkkikiertoon jääviä sekä kertyviä ovat alkaliin liukenemattomat aineet. Lentotuhkakiertoon kertyy helpoiten kaasuntuuvia kemikaaleja. (Knowpulp, 2023) Kuvassa 8. on esitetty sellutehtaan kemikaali- ja kalkkikierto.



Kuva 8. Sulfaattiprosessin kemikaalien talteenottokierrot (Knowpulp, 2023)

4.1 Kemikaalikierto

Kemikaalikierron tarkoituksena on kierrättää ja valmistaa sellun valmistuksessa käytettävää kemikaalia, eli valkolipeää. Ensimmäinen vaihe missä kemikaaleja käytetään on massanvalmistus ja se tapahtuu keittämöllä. Kaustisointiprosessissa valmistettu valkolipeä syötetään imeytystorniin hakkeen sekaan. Keiton päätehtävä on kemikaalien ja lämmön avulla poistaa kuituja sitovaa ligniiniä niin että hake alkaa kuituuntumaan. (Knowpulp, 2023)

Kemikaalina käytettävä valkolipeä on vahvasti alkalinen emäsluos, joka koostuu pääsääntöisesti natriumhydroksidista (NaOH) ja natriumsulfidista (Na_2S). Kemikaalit ovat merkittävässä roolissa, jotta keittoprosessi onnistuu. Natriumhydroksidin tehtävänä on pilkkoa ligniiniä keittoprosessissa ja natriumsulfidi nopeuttaa ligniinin liukenemista. (Knowpulp, 2023)

Keitosta valmistettu ruskea massa pestään, jotta siitä saadaan eroteltua liuenneet aineet helpommin pois. Liuenneita aineita kutsutaan mustalipeäksi ja lipeäjäe syötetään talteenottolinjalle. Talteenoton tarkoitus on uudelleen käyttää mustalipeän sisältämät kemikaalit ja energia. (Knowpulp, 2023)

4.1.1 Haihduttamo

Talteenottolinjan ensimmäistä prosessialuetta kutsutaan haihduttamoksi. Ensisijainen tehtävä on poistaa keittämön pesuprosessissa erotetusta mustalipeästä vettä haihduttamalla ja nostattaa lipeän kuiva-ainepitoisuus tasolle 75 – 85 %. Ennen haihduttamolle saapumista lipeän kuiva-ainepitoisuus on noin 15 – 18% ja prosessin alkuvaiheessa mustalipeää vahvistetaan paisuttamalla sekä lisäämällä toisesta yksiköstä vahvistettua lipeää sekaan. (Knowpulp, 2023)

Vedenpoiston lisäksi prosessissa käsitellään likaiset lauhteet strippaamalla, otetaan talteen haihdutuksesta syntyvät lauhteet sekä tuotetaan sivutuotteena esimerkiksi tärpähtiä, metanolia ja suovasta jatkojalostettua mäntyöljyä.

4.1.2 Soodakattila

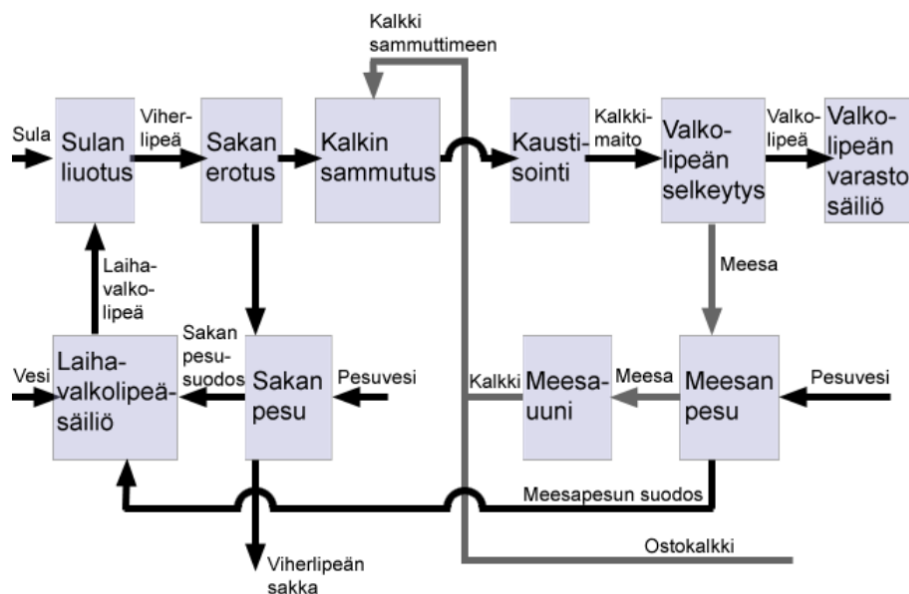
Mustalipeästä valmistettu polttolipeä syötetään soodakattilan tulipesään suuttimien avulla. Polton aikana mustalipeän vesi haihtuu ja orgaaninen materiaali palaa. Mustalipeän sisältämä epäorgaaninen aine sulaa korkean lämpötilan seurauksena ja valuu kattilan sularännien kautta liuottajaan. Liuottimessa olevaa sulaa kutsutaan viherliperiksi. (Knowpulp, 2023)

Sellunkeiton kemikaalit vapautuvat soodakattilan polttoprosessissa ja mustalipeän sisältämät rikki/natrium otetaan talteen jatkokäsittelyyn. Tarkoituksena on kierrättää selluntuotannossa käytettäviä kemikaaleja sekä ottaa talteen kemikaalisula. Lisäksi mustalipeän palamisen yhteydessä vapautuva lämpöenergia hyödynnetään höyryn ja sähkön tuottamiseen. (Knowpulp 2023),

4.2 Kalkkikierto

4.2.1 Kaustisointi

Kaustisoinnin prosessi on osa kemikaali-, ja kalkkikiertoa. Jotta soodakattilan sulasta saadaan valmistettua valkolipeää sellun keittoa varten, tarvitaan apuaineeksi kalkkia. Kaustistamo nimi tulee osastolla syntyvän reaktion mukaan. Kuvassa 9 on esitetty kaustisoinnin prosessikuvaus



kuva 9. Kaustisointi ja meesanpolton prosessikuvaus (Knowpulp, 2023)

Soodakattilalta tuleva viherliperisula liuotetaan säiliöön, jonka jälkeen viherliperissä sisältävä sakka erotetaan selkeyttämällä tai suodattamalla. Sakan erotuksen jälkeen viherliperi jäähdytetään ja ohjataan kalkin sammuttimeen. Sammuttimessa reaktio tapahtuu kun sammutettu kalkki (Ca(OH)_2) ja natriumkarbonaatti (Na_2CO_3) kohtaavat. Reaktion lopputuotteena syntynyt kalkkimaito ohjataan kaustisointisäiliöille kun taas sammuttimeen kertynyt sakka poistetaan ruuvien avulla ulos prosessista.

Jäähdytetty kalkki syötetään kuljettimien avulla annostelusiilille mistä se palautetaan takaisin kaustisointiprosessiin. Jotta kalkin laatu pysyisi mahdollisimman hyvänä, joudutaan sisäistä kalkkikiertoa syöttämään ulos prosessikierrasta. Tästä syntyvät häviöt korvataan poltetulla kalkilla, jota kutsutaan termillä ostokalkki.

4.3 Kemikaalitaseet ja vierasaineet

4.3.1 Rikki-natriumtase

Biotuotetehtaan on tärkeää seurata lipeän rikki-natrium (S/N₂) suhdetta jota kuvataan nimellä sulfiditeetti. Moderneissa sellutehtaissa rikki/natrium suhde on 0,3 – 0,4, joka sulfiditeettiä arvolla on noin 30 – 42%. (Kuikka, 2018)

Kun rikki/natrium suhde pysyy vakiona, kierrosta poistuvat ja sinne tulevat virtaukset ovat yhtä suuret. Suhdetta tyypillisesti säädetään lisäämällä tai poistamalla prosessista kemikaalia. Taulukossa 1. on kuvattu tyypillisiä lisäys- ja poistotapoja kemikaalikierrasta.

Taulukko 1. Kemikaali- lisäykset ja poistot kierrosta (Knowpulp, 2023)

Kemikaalilisäykset kemikaalikiertoon	Kemikaalipoistot kemikaalikierrasta
Puun mukana keittoon	Savukaasupäästöt soodakattilasta ja meesaunista
Valkaisusuodoksien palautus kemikaalikiertoon (Eop-suodos)	Ruskean sellun (pesuhäviö) tärpätin ja mäntyöljyn mukana
Valkaisukemikaalien valmistuksen natrium-sulfaatin palautus kemikaalikiertoon	Sähkösuodintuhkan tai ARC-prosessin tai kristallisoinnin poistosta soodakattilasta ja meesauunista
Mäntyöljyn valmistuksessa (rikkihappo)	Viherlipeä sakka
Apupolttoaineena (Pikiöljy)	Kalkin sammutuksen sakkana
Ostokemikaalien mukana (NaOH,kalkki,rikkihappo)	Vuosihuoltoseisokkien yhteydessä
Kuoren puristussuodoksen tai biolietteen palautus haihduttamolle	Prosessiongelmien (kaadot/yliuodot)

Rikkiä ja natriumia tulee kemikaalikiertoon käytännössä hakkeen ja mahdollisten make-up-kemikaalien sekä usein klooridioksidin valmistuksen sivutuotteen mukana sekä valkaisusuodoksen palauttamisena kuitulinjalle. Lisäksi mäntyöljyn palstoitukseen emävedestä tulee rikkiä kiertoon, mikäli palstoitusta on tehty rikkihapolla. (Knowpulp, 2023)

Rikkiä poistuu prosessista ruskean massan pesuhäviönä, tärpätin ja mäntyöljyn mukana, lentotuhkien ja viherlipeäsakan mukana hajukaasuista sekä savukaasuissa. Natrium poistuu pääasiassa pesuhäviöiden kautta ja lentotuhkasta. Lisäksi muita häviöitä ovat prosessihäiriöistä johtuvat häviöt, vuodot, ylijuoikutukset ja vuosihuoltoseisokit. (Knowpulp, 2023)

Sulfiditeetin ollessa matala se laskee keittosaantoa ja pienentää tuotetun massan lujuusominaisuuksia, kun taas liian korkea sulfiditeettitaso kasvattaa tehtaan hajuhaittoja sekä aiheuttaa korroosio- ja likaantumisongelmia soodakattilalle.

4.3.2 Vierasaineet

Pääosa vierasaineista kulkeutuu puun mukana prosessiin. Kuitenkin tulevat vierasainemäärät riippuvat pitkälti puulajista ja missä puu on kasvanut. Muita lähteitä mistä vierasaineita kulkeutuu ovat raakaveden, ostokalkin ja make-up kemikaalien mukana. (Knowpulp, 2023)

Kemikaalikiertoon lähteistä riippuen kertyy kuitenkin paljon eri vierasaineita, joista suurin osa ei vaikuta prosessin toimivuuteen. Merkittävimmiksi vierasaineiksi prosessin toimivuuden kannalta ovat nousseet kalium (K), kalsium (Ca), kloori (Cl), magnaani (Mn), fosfori (P), rauta (Fe) Pii (Si) ja Alumiini (Al). (Mertakorpi, 2021)

Vierasaineiden kertymiseen vaikuttaa tulevat lähteet ja niiden käyttäytyminen eri prosessivaiheissa. Lisäksi aineita pystytään karkeasti jaottelemaan kertyvätkö ne lipeäkiertoon tai kalkkikiertoon.

Taulukko 2. Vierasaineiden lajittelu (Mertakorpi, 2021)

Lipeäkierto
Kloori (Cl), Kalium (K) Pii (Si), Alumiini (Al) Kalsium (K)
Kalkkikierto
Magnesium (Mg) Alumiini (Al) Magnaani (Mn) Rauta (Fe) Pii (Si) fosfori (P)

Taulukossa 2. on esitetty kalkki- ja lipeäkierron vierasaineiden lajittelu. Tyypillisiä Lipeäkiertoon rikastuvia vierasaineita ovat kloori (Cl), Kalium (K), Pii (Si), Alumiini (Al) ja Kalsium (K). Kalkkikiertoon rikastuu edellisten lisäksi magnesium (Mg), mangaani (Mn), Rauta (Fe) ja fosfori (P).

4.3.3 Vierasaineiden aiheuttamat haitat

Modernien tehtaiden suljettu kemikaalikierto johtaa herkästi vierasaineiden rikastumiseen ja voi aiheuttaa haasteita tuotannossa sekä prosessin ajettavuudessa. Erityisesti helposti alkaliseen liuokseen liukenevat vierasaineet rikastuvat kiertoon herkemmin. Rikastuminen taas johtaa prosessilaitteissa tapahtuviin likaantumisiin, tukkeutumisiin, korroosioon sekä inerttiaineiden käytön lisääntymiseen. (Nousiainen, 2019) Taulukossa 3 on esitetty vierasaineiden haittoja prosessissa.

Taulukko 3. Vierasaineiden aiheuttamat haitat (Mertakorpi, 2021)

Lipeäkierto	
--------------------	--

Soodakattilan ongelmat	Cl, K
Haihduttamon likaantuminen	Si, Al, Ca, Fe, Si
Kalkkikierto	
Viherlipeän suodattavuus heikkenee	Si, Mg
Lisää kuollutta kuormaa	Si, Mg, Al, Fe, P, Mn

Lipeäkierron vierasaineet pääsääntöisesti kulkeutuvat valkolipeän valmistuksen kautta ja niistä merkittävästi haitallisimpia ovat kalium (K) ja kloori (Cl). Ne lisäävät soodakattilassa tuhkan tarttumista tulistinpinoille, korroosiota sekä lentotuhkan sulamispisteen laskua. Nämä ongelmat johtavat siihen, että kattilassa voi esiintyä tukkeutumisherkkyyttä. (Andritz, 2016)

Lisäksi vierasaineet voivat aiheuttaa haihdutinyksiköiden likaantumista. Erityisesti kalsium, magnesium, alumiini ja pii alkavat herkästi muodostamaan saostumakerroksia. Lisäksi tietyissä olosuhteissa ne voivat aiheuttaa myös haihduttamolle korroosiota. (Knowpulp, 2023)

Koska viherlipeäsakkaa ei saada täydellisesti erotettua, osa niukasti liukenevista vierasaineista saostuu ja rikastuu helposti kalkkikiertoon. Etupäässä magnesium (Mg), alumiini (Al) ja pii (Si) aiheuttavat inertin kuorman kasvua sekä kalkin kaustisoimisvoiman heikkenemistä. Jos käsiteltävä meesassa on runsaasti vierasaineita sisältää se enemmän ominaispintaa, mikä tunnistetaan hienommasta ja epäsäännöllisemmästä raemuodosta. Tällainen meesa jää kosteammaksi, joka lisää polttoaineen kulutusta, ja kasvattaa uunin pölyämistä sekä häiriökäyttäytymisen riskiä. (Knowpulp, 2023)

4.3.4 Vierasaineiden hallinta

Merkittävästi tärkein vierasaineiden pitoisuuksien hallintaan vaikuttava prosessi on viherlipeän selkeytys. Vuosien saatossa kun on haluttu sulkea tehokkaammin sellutehtaan kiertoa sen tärkeys on korostunut entisestään. Selkeytyksessä viherlipeässä oleva sakka erottuu ja laskeutuu pohjalle, mistä pyörivien harojen avulla sakka kerätään talteen. Selkeytynyt viherlipeä pumpataan prosessin seuraavaan vaiheeseen. Sakan laskeutumista voidaan tehostaa tarvittaessa polymeerin avulla. (Knowpulp, 2023)

Toinen tapa hallita vierasaineiden määrää on avata kalkkikiertoa, mitä joudutaan tekemään kalkin hyvän laadun varmistamiseksi. Meesasta erottuva savukaasu ohjataan sähkösuodattimelle, missä kaasut joutuvat sähkökenttään ja saavat sähköisen varauksen. Tämä aiheuttaa hiukkasten tarttumisen suodattimessa oleville erotuslevyille. Hiukkaset ravistetaan tietyn väliajoin sähkösuodattimen pohjaosaan, mistä kuljettimien avulla voidaan valita, syötetäänkö hiukkaset takaisin meesauunille vai tuhkasiilon kautta ulos prosessista.

Kaliumin (K) ja klooria (Cl) ei voida näillä metodeilla poistaa, koska ne rikastuvat soodakattilan lentotuhkaan. Perinteisesti ongelma on ratkaistu poistamalla soodakattilan sähkösuodattimen tuhkaa pro-

sessista. Kuitenkin on huomattu, että se ei ole ympäristö- ja taloudellisesta näkökulmasta kannattavaa, joten sitä varten on kehitetty oma laitteistonsa. Tyypillisin tapa nykyssellutehtaalla kalium (K) ja kloorin (Cl) hallintaan on tuhkan kiteytyslaitteisto. (Knowpulp, 2023)

5 TYÖN TOTEUTUS

Opinnäytetyössä tutkittiin biopelletin soveltuvuutta kuoren kaasutuksen polttoaineeksi ja palamisprosessissa vapautuvien vierasaineiden käyttäytymistä biotuotetehtaan kalkki- ja lipeäkierrossa. Lisäksi opinnäytetyössä selvitettiin pystyisikö kaasutinjärjestelmä käsittelemään biokaasulaitokselta syntyvän biopelletin vuorokausituotannon, joka on noin 20 tonnia vuorokaudessa (t/d).

Opinnäytetyö toteutettiin esiselvitystyönä, joten mitään konkreettisia koeajojärjestelyitä ei suoritettu. Esiselvitys pohjautuu pitkälti omiin kokemuksiin, kirjallisuuskatsauksiin, asiantuntijoiden lausuntoihin sekä aikaisempina vuosina tehtyihin koeajoraportteihin.

Työssä käytettiin raja-arvona biotuotetehtaan nimellistuotantoa (noin 3600 t/d) vuorokausitasolla minkä perusteella pystyttiin päättämään keskiarvoinen tehontarve meesauunille sekä kuoren kaasuttimelle.

Tutkimuksessa tarkasteltiin polttoaineen käsittelyä kuorenkaasutuslaitteistolla ja käyttäytymistä CFB-kaasutinjärjestelmässä. Kaasutinjärjestelmässä erityisesti tutkittiin aiheuttaako biopelletin polttamisesta muodostuva tuhkamäärä haasteita.

Vierasaineiden määrää lähdettiin tarkastelemaan rakentamalla tase biopelletin vierasainemääristä ja sitä verrattiin biotuotetehtaan aikaisempiin vierasainemääriin. Tasetta muodostaessa päätettiin, että työssä keskitytään ainoastaan alkuaineisiin, jotka voivat vaikuttaa suurina pitoisuuksina negatiivisesti biotuotetehtaan prosessiin. Valitut vierasaineet olivat: Alumiini (Al), Fosfori (P), Pii (Si), Magnesium (Mg) ja Mangaani (Mn).

Taselaskentaa tehdessä piti ottaa huomioon mihin kaasutuksen jälkeen vierasaineet rikastuvat ja kulkeutuvat. Lisäksi taseessa otettiin huomioon vierasaineiden poisto kierrosta. Vierasainetaseen laatimisessa käytettiin apuna aikaisempia tuloksia, joita laboratorioissa määritetään sekä yrityksessä työskenteleviä asiantuntijoita. Koottuja tietoja sekä aineistoja käsiteltiin Excel järjestelmän kautta.

Saatuja tuloksia verrattiin olemassa oleviin raja-arvioihin ja samalla tarkasteltiin tapahtuisiko biopelletin seospolttoaineen käytöstä merkittäviä ylityksiä kaasuttimen pohjatuhkassa sekä kalkki- että lipeäkierron vierasainemäärissä.

Esiselvityksen tuloksista laadittiin johtopäätös, missä käytiin lävitse kannattaako koeajojärjestelyitä toteuttaa sekä mitä tulee ottaa huomioon jos esiselvityksestä saadut tulokset osoittavat koeajon mahdollisuutta.

5.1 Biopelletin ominaisuuksia ja vertailua

Biopelletit ovat koostumukseltaan tumman värisiä ja rakenteen hajotessa aiheuttavat merkittävää pölyämistä ympäristöön. Lisäksi biopelletit hylkivät vettä ja tämä aiheuttaa itsesyttymisen riskiä varsinkin, jos pellettiä joudutaan varastoimaan paikallaan pitkiä aikoja. Yksi ominaisuus mistä pelletit

pystytään tunnistamaan on niiden pistävä hajua. Kuvassa 11. on esitetty, miltä biopelletit näyttävät rakeistuksen jälkeen.



Kuva 11. Biopelletit rakeistuksen jälkeen. (Kuivakangas, 2023)

Biopellettien valmistus aiheuttaa itsesyttymisen riskin, joten niiden käsittelyssä joudutaan sovelta-
maan ATEX- räjähdysvaarallisten tilojen laitedirektiiviä. Lisäksi biopellettien käsittelyssä on huomattu
korroosiota edistäviä tekijöitä, joten käsittelylaitteiston materiaalivalintoihin on jouduttu tekemään
merkittäviä muutoksia.

Tuotetuista biopelleteistä määritetään kuukausittain analyysit, joissa tarkastellaan tuhkakäyttäyty-
mistä, alkuainemääriä sekä polttoarvoja. Analyysit biopelleteistä toteutetaan Eurofinsin kautta.

Taulukko 4. Biopellettien arvoja (SFS-EN ISO 16967:2015 ja SFS-EN ISO 11885:2009) (Kuivakangas
2023)

	Yksikkö	Keskiarvo	17.3.2023	14.7.2023	25.8.2023
Tehollinen lämpöarvo	MJ/kg	11,12	11,49	11,65	10,23
Kosteus	%	22,8	21,6	21,1	21,9
Tuhkapitoisuus 550 °C	%	25,0	24,6	23,9	25,7
Sulamislämpötila	°C	1300	1320	1280	1300
Irtotiheys	kg/m ³	696	700	699	689
Alkuaineet					
Rikki (S)	%	1,52	1,42	1,56	1,58
Hiili (C)	%	40,1	40	40,3	40
Vety (H)	%	5	5,1	5,0	4,9

Typpi (N)	%	4,57	4,97	4,58	4,16
Kloori (Cl)	%	0,25	0,25	0,25	0,26
Fluori (F)	%	0,0036	0,003	0,004	0,004
Bromi (Br)	%	0,0056	0,006	0,007	0,004

Taulukkoon 4. on koottu vuoden 2023 määrityksistä saatuja tuloksia ja koostettu niistä keskiarvo, mitä hyödynnetään esiselvityksessä. Biopelletin tyypillisiä ominaisuuksia ovat merkittävä tuhkan muodostaminen lopputuotteena palamisessa, joka on merkittävästi korkeampi kuin tyypillisillä polttoaineilla.

Mädättämön prosessissa haluttu kosteus biopelletille on tyypillisesti luokkaa 10 – 15 % mitä rakeistuksesta on kuiva-ainepitoisuusmittareiden perusteella saatu ja analyysin perusteella tavoite kosteuteen ei ole päästy. Analyyseista voidaan myös päätellä, että näytteiden välillä ei ole merkittäviä eroavaisuuksia.

Taulukko 5. Polttoaineiden vertailu (Motiva, 2023) (VTT,2016)

	Yksikkö	Biopelletti	Kuori havu	Kuori koivu	Puupelletti
Tehollinen lämpöarvo	MJ/kg	10-12	18,5-20	21-23	19 -19,2
Kosteus	%	20-23	5-10	4-6	9,40
Tuhkapitoisuus 550 °C	°C	25,0	1,8	1,6	0,37
Sulamislämpötila	°C	1300	1400	1460	1190
Irtotiheys	kg/m ³	696	300	560	650-700
Alkuaineet					
Rikki (S)	%	1,52	0,01-0,08	0,01-0,08	0,007
Hiili (C)	%	40,1	54,4	56,6	49,12
Vety (H)	%	5	5,9	5,9	6,03
Typpi (N)	%	4,57	38	35	0,08
Kloori (Cl)	%	0,25	-	-	0,001
Fluori (F)	%	0,0036	-	-	-
Bromi (Br)	%	0,0056	-	-	-

Taulukossa 5. on vertailtu biopellettiä kuoren kaasutusjärjestelmässä käytettävään kuoriseokseen sekä puusta valmistettavan pelletin ominaisuuksiin. Vertailusta voidaan todeta, että biopelletin tehollisuus on huomattavasti korkeampi kuin kuoriseoksen.

linen lämpöarvo on alhaisempi kuin kuoriseoksella. Lisäksi biopelletin kosteus ja tuhkapitoisuus eroavat muista vertailukohteista. Biopelletin alkuaineiden vertailussa rikin ja kloorin määrä on korkeampi muihin polttoaineisiin verrattuna.

5.2 Vaikutus kuoren kaasutinjärjestelmässä

Ensimmäisenä lähdettiin selvittämään, riittääkö kuoren kaasutusjärjestelmän kapasiteetti käsittelemään syötettävän lisäpolttoainemäärän. Kapasiteetin selvittämiseksi laskettiin nykyinen kuoren virtausmäärä vuorokausitasolla sekä miten polttoaineen syöttöjärjestelmä on mitoitettu biotuotetehtaalla. Kuoren polttoainekuorma on laskettu saapumistilassa, eli ennen kuoren kuivausta.

Taulukko 6. Määritetyt ajoparametrit esiselvitystä varten (Valmet, 2017)

	Määrä	Yksikkö
Kaasutinteho	70	MW
Havu/koivu suhde	60 / 40	%
Kuoren ja petikalkin tuhka- määrä	8,8	t/d
Biopelletin määrä	5	t/d
Poltettu kalkki	1083,5	t/d
Sähkösuotimen pöly (ulos ajettu)	73,6	t/d
Valkolipeän valmistus	16416	m3/d

Taulukossa 6. on esitetty lähtöarvot mihin biopellettiä lähdettiin vertailemaan. Lähtöarvot määritettiin ajojärjestelmän kautta ja trendien perusteella etsittiin ajankohta jolloin biotuotetehtas on ollut nimellistuotannolla. Kaasutintehon arvoksi määritettiin 70 MW, mikä on tyypillinen tehoalue käyttöjärjestelmän trendien perusteella. Havu/koivu suhdetta pyritään pitämään havupainotteisena joten tarkastelujaksolle otettiin arvot 60/40 %. Kuoren tuhkamäärä määritettiin ajoraporttien perusteella, kuinka paljon kuukausitasolla tuhkaa kuljetetaan kaasuttimelta loppusijoituskohteeseen. Biopelletin tuhkan määrä laskettiin laboratorioanalyysien tuhkapitoisuuden perusteella. Kalkkikierron ajovauhti sekä valmistettavan valkolipeän määrä pystyttiin määrittämään käyttöjärjestelmän kautta. Sähkösuotimelta ajettavan poistotuhkan määrä laskettiin ajoraporttien perusteella.

Ajoparametrien määritysten jälkeen selvitettiin kaasuttimen kapasiteetti sekä kuinka paljon biopelletti tulisi kuormittamaan kaasutinlaitteistoa.

Vuorokaudessa käytettävä kuorimäärä pystyttiin laskemaan alla olevan yhtälön (1) avulla ja tarvittavat lähtötiedot saatiin kerättyä biotuotetehtaalla käytettävän ohjausjärjestelmän kautta. Saadun tuloksen perusteella pystyttiin laskemaan, kuinka monta prosenttia biopellettien syöttäminen nostaisi kapasiteettia vuorokausitasolla. Tulos laskettiin alla olevan yhtälön (2) avulla.

$$\frac{t}{d} = \left(\left(\text{Polttoainekuorma} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \times 24 \text{ h} \right) \right) \times \text{kuoren tuoretiheys} \left(\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right) \quad (1)$$

$$\% = \text{Biopelletin määrä} \left(\frac{\text{t}}{\text{d}} \right) \div \text{Kuoren määrä} \left(\frac{\text{t}}{\text{d}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Taulukko 7. kuivatun kuoren kapasiteetit eri tehoalueilla (Kuivakangas 2023)

Kaasuttimen teho	Kuoren määrä (t/d)	Kuoren syöttö kaasuttimelle (m3/h)	Pelletin määrä (t/d)	Biopelletin osuus kuoren määrästä (%)
70 MW	418,5	53	20	4,8
87 MW	521,1	65	20	3,8

Laskutoimituksesta saadut tulokset kirjattiin taulukkoon 7. Ensimmäisessä sarakkeessa kuvataan kaasuttimen tehoalueita. Tehoalueiksi on määritetty keskiarvoinen kaasutusteho sekä kaasuttimen nimellisteho. Muissa sarakkeissa ilmoitetaan kuoren määrä tehoaluekohtaisesti, syötettävän kuoren määrä kaasutinjärjestelmään, pelletin määrä sekä kuinka paljon biopelletti nostaisi kapasiteettia. Kaasuttimen kapasiteetti ja mitoitus tiedot saatiin käyttö- ja huolto-oheista, jotka kirjattiin taulukkoon 8.

Taulukko 8. Kaasuttimen syöttöjärjestelmän mitoitus (Valmet, 2017)

Laite	Kapasiteetti	Yksikkö
Polttoaineen syöttöjärjestelmä	12 – 115	m3/h
Kaasutin	87	MW

Taulukossa 8. on esitetty polttoaineen syöttöjärjestelmän kapasiteetti (12-115 m3/h) sekä kaasuttimen nimellisteho, joka on 87 MW.

5.3 Soveltuvuus palamisprosessiin

Koska opinnäytetyössä ei suoriteta konkreettisia koeajoja kaasuttimella, joudutaan soveltuvuutta tarkastelemaan aikaisempien koeajoraporttien kautta, mitä on toteutettu Metsä Fibren toimesta. Vuonna 2019 suoritettiin biopellettien koeajo voimalaitoksen leijupetikattilalla, jonka nimellinen polttoainetehto on 95 MW. Koeajon tarkoituksena oli tutkia pellettien vaikutusta kattilan ajettavuuteen, tuhkan ominaisuuksiin sekä ilmapäästöihin. (Kettunen, 2019)

Aikaisemmista Metsä Fibren laatimista koeajoraporteista todettiin, että biopellettejä voidaan käyttää yli 5 MW lämpö- ja voimakattiloilla seospolttoaineena. Aineistossa on suositeltu, että pellettien osuus kokonaispolttomäärästä voi olla maksimissaan noin 15 %. Biopellettien soveltuvuutta arvioitiin tärkeimpien laatuluokitusten (kosteus, lämpöarvo, tuhkapitoisuus) sekä kemiallisten ominaisuuksien kautta. Saatuja arvoja verrattiin kaasuttimen käyttö- ja huolto-ohjeissa laadittuihin raja-arvoihin ja määritykset kirjattiin taulukkoon 9.

Taulukko 9. Kaasuttimeen määritettyjä raja-arvoja (Valmet, 2017)

Polttoaineen kosteus ennen kaasutinta	92	m-%
Ylempi lämpöarvo	22	MJ/kg
Alempi lämpöarvo	18,8	MJ/kg
Tuhkapitoisuus	2,2	m-% ka
Alkuainepitoisuudet kuorella ajettaessa		
Kloori	0,02	m-% ka
Natrium + Kalium	<2000	mg/kg ka
Rikki	0,04	m-% ka

Taulukossa 9. on kerätty kaasuttimen toiminnan kannalta merkittävimpiä raja-arvoja, joita laitetoimittaja suosittelee noudatettavaksi. Lisäksi käyttö- ja huolto-ohjeessa oli mainittu, että polttoaine ei saa sisältää ylimääräisiä jakeita, jotka voivat syövyttää, kuluttaa tai olla haitallisimpia prosessin kannalta. Polttamisen kannalta haitallisimman alkuaineet ovat kalium (K), natrium (Na), kloori (Cl) ja rikki (S).

5.4 Vierasaineiden vaikutukset

Koska vierasaineiden määrä biotuotetehtaan prosessissa voi vaikuttaa sen toimivuuteen hyvinkin merkittävästi, selvitettiin olemassa olevien analyysien ja laadittujen vierasainetaseiden avulla prosessissa olevia vierasainemääriä. Olemassa olevaan alkuainetaseeseen lisättiin biopellettien vierasainemäärät ja vertailtiin tulisiko raja-arvoylityksiä tai pystyisikö prosessi poistamaan lisääntyneet alkuaineet prosessikierrosta.

Vierasainemäärityksessä lähdettiin ensimmäisenä selvittämään biopelletin sisältämiä vierasainemääriä, joita myöhemmin verrattiin kuoren määrityksiin. Jotta määrityksistä saatiin mahdollisimman edustavat, otettiin tarkastelujaksolle kolmen eri kuukauden näyteotanta, mistä laskettiin keskiarvo.

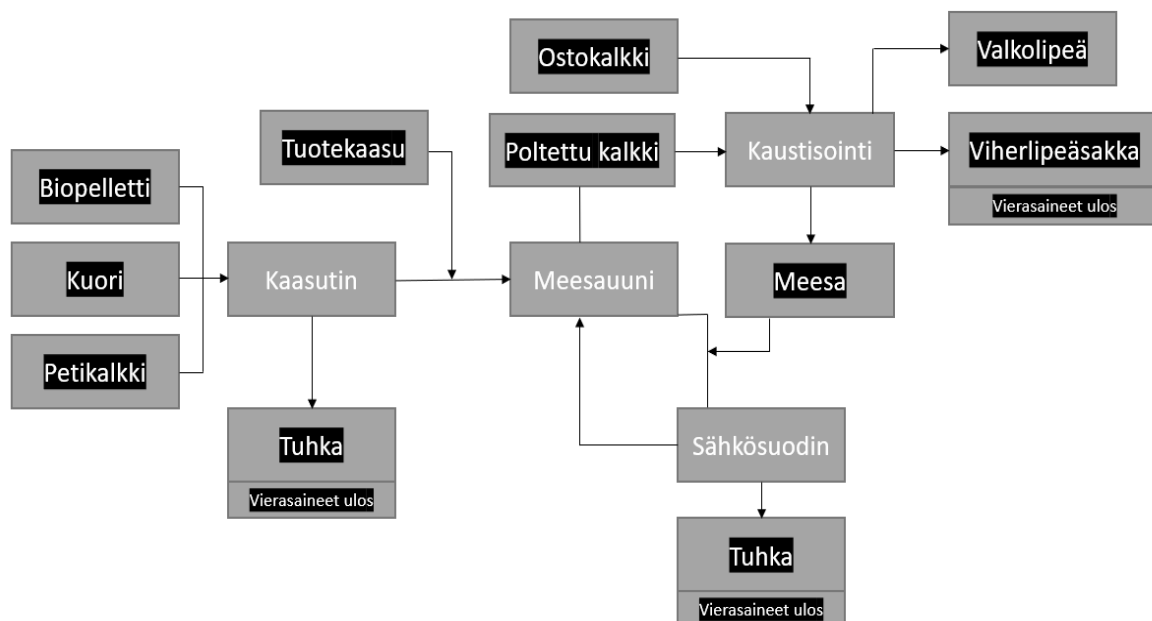
Taulukko 10. Biopelletin vierasaineet (SFS-EN ISO 16967:2015 ja SFS-EN ISO 11885:2009).
(mg/kg) (Kuivakangas 2023)

Märkäpoltto	Keskiarvo	17.3.2023	14.7.2023	25.8.2023
Vierasaineet				
Kalsium (Ca)	20600	24000	19000	19000
Magnesium (Mg)	5600	6400	5500	5100
Natrium (Na)	4900	4000	4500	6300
Kalium (K)	1700	1600	1700	1800
Fosfori (P)	8000	7900	7900	8100
Rikki (S)	15000	13000	15000	17000
Rauta (Fe)	35300	29000	32000	45000
Alumiini (Al)	16000	16000	17000	15000
Pii (Si)	22300	24000	23000	20000
Mangaani (Mn)	1900	2000	1700	2000

Taulukkoon 10. on koottu vuoden 2023 määrittämisistä saadut alkuainemäärät biopelletissä. Määrittäminen on toteutettu hehkutusuunimenetelmällä ja syntyneestä tuhkasta on liuotettu alkuaaineet analyysia varten. Tuloksista voidaan todeta, että merkittäviä eroavaisuuksia näytteiden välillä ei ole. Isoimmat alkuaainepitoisuudet biopelletissä ovat rauta (Fe), pii (Si) sekä kalsium (Ca).

5.5 Biopellettitaseen rakentaminen

Biopellettien vierasaineselvityksen jälkeen aloitettiin taseen rakentaminen. Ensimmäinen vaihe oli, että taseeseen määritettiin, mitä polttoaineita sekä apuaineita prosessissa käytetään sekä kuinka niistä syntyvät vierasaineet kulkeutuvat kalkkikierron kautta aina valkoliipeän valmistukseen. Kiertoa on havainnollistettu kuvan 12. avulla.

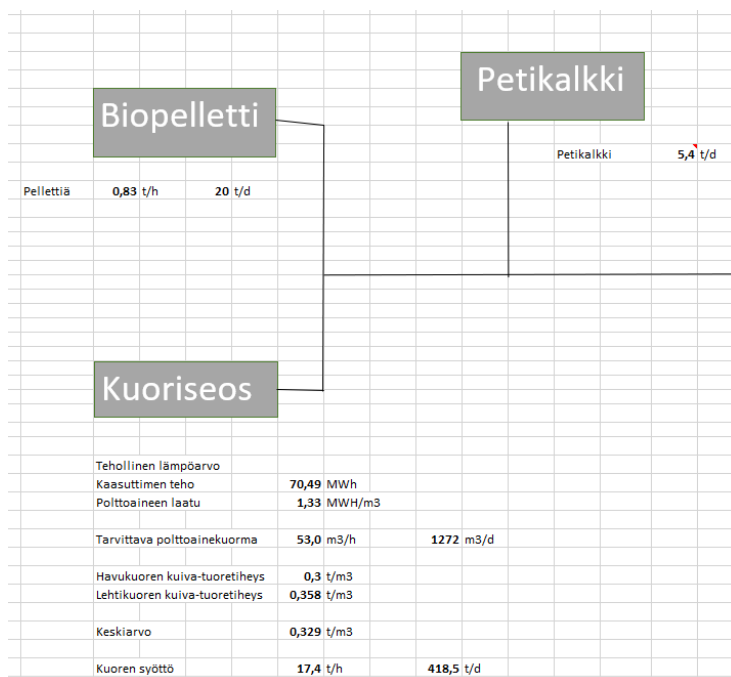


Kuva 12. Vierasaineiden kulkeutuminen kalkkikierrossa (Kuivakangas, 2023)

Kuvasta 12. voidaan todeta, että kuoren kaasuttimeen tultaisiin annostelemaan kolmea eri jaeetta, mistä lopputuotteena syntyy tuotekaasua sekä tuhkaa. Tuotekaasu poltetaan meesauunissa, mistä vierasaineet jakautuvat sähkösuotimelle sekä poltetuun kalkkiin. Sähkösuotimen kautta pystytään ajamaan ulos prosessista vierasaineita.

Poltettua kalkkia ja ostokalkkia annostellaan kaustisoinnin prosessiin viherlipeän sekaan, mistä lopputuotteena syntyy erotettua meesaa sekä valkolipeää keittämölle. Kaustisoinnin prosessista pystytään ajamaan vierasaineita ulos prosessista selkeyttimen sekä sammuttimen poistoruuvien kautta viherlipeäsakkalavoille.

Kaavion rakentamisen jälkeen selvitettiin, kuinka paljon eri jakeita kulkee vuorokaudessa kalkkikierron prosessissa. Apuna määrien selvityksessä käytettiin ohjausjärjestelmää, mistä trendien ja prosessiarvojen perusteella pystyttiin nimellistuotantoon peilaten löytämään tarvittavat tuotantomäärät. Tarkastelujaksolle valittiin sellainen kuukausi, jolloin oli mahdollisimman vähän tasaista tuotantoa häiritseviä tekijöitä. Kuvassa 13 on esitetty Exceliin laadittua tasetta.



Kuva 13. Kuvakaappaus tuotantotaseen rakentamisesta Excel pohjalle. Excel pohjaan merkittiin vuorokaudessa kulutettavat polttoainemäärät sekä tuotantovauhdin ajolukemat. Yksikkönä käytettiin t/d. (Kuivakangas, 2023)

Tuotantotaseeseen selvitettiin jakeet, joita poistetaan prosessista. Niistä lukemista ei ollut valmiiksi ohjausjärjestelmässä arvoja, joten ulosajettavat kuormat jouduttiin määrittämään ulosajoreportin perusteella. Määrät laskettiin alla olevan yhtälön (3) avulla ja saadut arvot merkittiin Excel pohjalle omille sarakkeille.

$$\frac{t}{d} = \text{Netto määrä} \left(\frac{t}{m} \right) \div \text{kuukauden vuorokaudet} (d) \quad (3)$$

Taserakenteen muodostamisen jälkeen selvitettiin aikaisemmat vierasainemäärät, jotka löytyivät osittain valmiiksi määritettyinä. Kaikkiin prosessivaiheisiin ei ollut olemassa aikaisempia määrittämiä, joten niiden kohdalla jouduttiin arvioimaan minne vierasaineet tulisivat kulkeutumaan. Vierasainemääristä tehtiin (kuvan 12). mukainen tasekaavio, minne listattiin tarkasteltavat vierasaineet sekä kuinka paljon niitä esiintyy prosessissa. Vierasainetaseen muodostamisen apuna käytettiin tuotantotasetta, joiden perusteella pystyttiin laskemaan vierasainemäärät.

		Tuotekaasu						
Kuori + petikalkki							yhteensä	
	Vierasaine	kg/t	kg/d				kg/t	kg/d
	Al	1,8	63,3				9,8	223,3
	P	0,6	175,0				8,0	322,6
	Si	19,7	169,5				30,8	392,5
	Mg	69,5	637,8				74,7	742,0
	Mn	0,4	129,8				0,6	133,3
Biopelletti								
	Vierasaine	kg/t	kg/d					
	Al	8,0	160,0					
	P	7,4	147,7					
	Si	11,2	223,0					
	Mg	5,2	104,2					
	Mn	0,2	3,6					

kuva 14. Vierasainetaseen rakentaminen Excel alustalle (Kuivakangas, 2023)

Kuvassa 14 on esitelty vierasainetaseen rakentamista Excel alustalle. Taseeseen merkattiin vierasaine mitä tarkastellaan, sekä kuinka paljon sitä esiintyisi prosessissa. Vierasaineet olivat alun perin esitetty yksikössä mg/kg ja tulkinnallisista syistä arvot muutettiin yksikköön kg/t. Kuitenkin tulokset osiossa saadut tulokset esitettiin yksiköissä mg/kg.

Kun tarvittaviin kohtiin oli saatu syötettyä vierasainearvot, lisättiin pellettien vierasainemäärät Excel pohjalle. Vierasainetasetta muodostaessa tuli ottaa huomioon että kaasuttimelta vierasaineet jakautuvat joko tuotekaasun tai tuhkan mukaan. Vierasaineille ei ole olemassa virallista jakautumiskeroa, joten jakautumisen arviointiin käytettiin aikaisempia määrittämiä.

Tasetta muodostaessa tuli ottaa huomioon tuotekaasun saapuminen meesauunille ja selvittää minne vierasaineet rikastuisivat prosessissa. Varsinaisia rikastumiskertoimia ei ole laadittu, joten ei pystytty varmaksiksi osoittamaan, minne vierasaineet tulisivat rikastumaan prosessissa.

Vierasaineiden rikastumisen selvitystä varten laadittiin kuvitteelliset prosessitilanteet, joihin määritettiin, kuinka monta prosenttia saapuvista vierasaineista kulkeutuisi sähkösuotimelle ja mikä osuus poltetun kalkin mukana kaustisoinnin prosessiin.

Saatuja tuloksia verrattiin laitetoimittajien laatimiin raja-arvoihin jotka löytyivät ohjausjärjestelmän kautta. Saatujen tuloksien jälkeen pystyttiin arvioimaan, pysyisikö vierasainetase tasapainossa kun siihen lisättäisiin biopelletteistä syntyvä vierasainekuorma.

5.6 Prosessikierrosta poistettavat jakeet

Tasemäärittysten jälkeen selvitettiin kierrosta poistettavien jakeiden ominaisuuksia, raja-arvoja sekä mihin niitä hyödynnetään. Tarkasteltavat jakeet olivat kuorikaasuttimen tuhka ja sähkösuotimen pöly.

Esiselvitystä laatiessa huomattiin, että kuoren kaasuttimen tuhkaa hyödynnetään metsälannoitteena, joten tulkintaa varten jouduttiin käyttämään maa ja metsätalousministeriön asetusta lannoitevalmisteista. Asetuksessa oli määritetty haitallisten metallien enimmäispitoisuudet joita verrattiin biopelletteistä tehtyihin määrittämiin.

Taulukko 11. Biopelletin raskasmetallipitoisuudet (SFS-EN ISO 16967:2015 ja SFS-EN ISO 11885:2009) (mg/kg) (Kuivakangas, 2023)

Märkäpoltto	Keskiarvo	17.3.2023	14.7.2023	25.8.2023
Vierasaineet				
Arseeni (As)	3,2	3,7	2,8	3,2
Elohopea (Hg)	0,17	0,14	0,29	0,08
Kadmium (Cd)	11,8	7,4	16	12
Kromi (Cr)	49	42	69	36

Kupari (Cu)	50	48	50	53
Lyijy (Pb)	18	17	20	18
Nikkeli (Ni)	41	38	50	35
Sinkki (Zn)	1000	1100	1000	920

Taulukossa 11. on esitetty biopelletin sisältämät raskasmetallipitoisuudet 3 eri kuukauden tarkastelujaksolta. Määrittäyksestä voidaan todeta, että pitoisuudet eivät merkittävästi eroa toisistaan. Biopelletin raskasmetallipitoisuuksia verrattiin kuorituhalke laadittuihin raja-arvoihin, jotka on sovellettu lannoitevalmisteasetuksesta 24/11. Raja-arvot on esitetty taulukossa 14.

6 TULOKSET

Biopellettien soveltuvuutta tarkasteltiin useasta eri näkökulmasta. Tuloksissa otettiin kantaa miten biopelletit kannattaisi annostella kaasuttimelle ja aiheuttaako niiden käsittely merkittäviä haasteita esimerkiksi turvallisuuskulmasta katsoen sekä onko pellettien polttamisessa jotain, mikä tulisi huomioida. Lisäksi tulokset osiossa käytiin lävitse kuinka paljon vierasaine- sekä raskasmetallipitoisuudet kasvaisivat annostelun yhteydessä.

Koska opinnäytetyön aikana ei toteutettu konkreettisia koeajoja, kaikki tulokset osiolla esitetyt asiat perustuvat oletettavuuksiin sekä aikaisempiin aiheesta laadittuihin materiaaleihin.

Biotuotetehtaan prosessin vierasainemäärien vaihtelevuus vaikeutti tulosten analysointia ja se heijastui laboratoriossa määritettyihin arvioihin. Esimerkiksi joinain kuukausina vierasaineiden raja-arvot saattoivat olla lähellä ylitystä, kun joinain kuukausina raja-arvot saattoivat olla todella matalalla tasolla. Tästä syystä käytettiin vuoden 2023 saatujen arvojen keskiarvototeumaa.

Kuorenkaasuttimen- sekä sähkösuotimen tuhkan osiossa esitetyt raja-arvot ovat määrittäneet laitteitoimittajat, joihin vierasainemääriä verrattiin. Lisäksi kaasuttimen tuhkan määrityksissä jouduttiin käyttämään maa ja metsätalousministeriön asetusta lannoitevalmisteista (Asetus 24/11), koska tällä hetkellä tuhka hyödynnetään peltolannoitteena.

6.1 Biopelletin annostelu ja käsittely laitteistolla

Biopellettejä pystyttäisiin annostelemaan polttoainejärjestelmään eri väyliä pitkin laitteistolle. Ensimmäinen vaihtoehto olisi sekoittaa biopelletti kuoren sekaan ennen kuoren kuivausjärjestelmää tai vaihtoehtoisesti kuoren kuivauksen jälkeiselle linjastolle.

Turvallisuuskulmasta ajatellen olisi annostelu hyvä toteuttaa kuivurin jälkeen, koska biopelletin varastoinnissa syntyvien itsesyttymisominaisuuksien kanssa ei tulisi mahdollisia haasteita kuoren varastointialueella. Lisäksi biopelletti saataisiin syötettyä tasaisemmin järjestelmään, joka antaisi säästövaraa kyseiselle sektorille.

Kustannustehokkaampi ratkaisu olisi annostella pelletit suoraan kuoren sekaan varastoalueella, jolloin välttyttäisiin erillisen annostelulaitteiston rakentamiselta. Lisäksi jos biopelletit kuivattaisiin kuoren seassa, laskisi se pellettien kosteusprosenttia joka vähentäisi ylimääräisen vesimassan käsittelyn kaasuttimella.

Biopellettien käsittelyn yhteydessä on havaittu runsasta pölyämistä ja osa pelleteistä heikon rakenteensa takia jauhautuisi pölyseokseksi. Tämä aiheuttaa lähinnä kosmeettista haittaa käsittelyalueella. Lisäksi pelletin varastointi siilossa tai vastaavassa säiliössä on osoittautunut myös haasteelliseksi. Jos pellettejä joudutaan varastoimaan useamman vuorokauden, niiden purkaminen varastosäiliöstä on tuottanut holvaamishaasteita sekä sen mukana myös kytöpalon riski tulisi kasvamaan.

Biopellettien korroosio-ominaisuudet tulee ottaa huomioon. Kaasuttimen toimilaitteiden kosketuspinnat on vuorattu ruostumattomalla teräksellä, joten korroosio-ongelmia ei pitäisi tulla.

Koska meesauunin tehontarve riippuu biotuotetehtaan ajovauhdista, vertailtiin arvoa eri kaasuttimen tehoalueille. Tuloksista voidaan päätellä, että biopelletti nostaisi kapasiteettia noin 4-5 % vuorokaudessa (taulukko 6).

Taulukosta 8. voidaan todeta, että polttoaineen syöttöjärjestelmä pystyisi käsittelemään biopelletistä syntyvän lisäkapasiteetin syöttölaitteistolle. Syöttölaitteisto on mitoitettu kahdella polttoainelinjalla, joiden kapasiteetti on 115 m³/h. Nimellistehopoltossa (87MW) syötettävän kuoren annostelmäärä on noin 65 m³/h.

Polttoaineen syöttöjärjestelmä soveltuu myös turvallisuusnäkökulmasta biopellettien käsittelyyn. Syöttölaitteisto on varusteltu ATEX direktiivin mukaisesti, joten senkin puolesta materiaalin syöttäminen olisi turvallista. Linjaston alasajo ja häiriötilanteessa jos biopellettiä jää polttoainesiloihin pitemmäksi ajaksi tulisi kiinnittää huomiota siihen, että kyöpalon riski kasvaa. Linjasto on kuitenkin varusteltu sammutushöyryjärjestelmällä, millä pystytään reagoimaan äkillisiin vaaratilanteisiin tarpeen vaatiessa.

6.2 Biopelletin polttaminen kaasuttimessa

Biopelletit soveltuvat seospolttoaineeksi kuoren kaasutukseen. Aikaisempien koeajojen perusteella pystyttiin todentamaan, että biopellettejä pystytään käyttämään yli 5 MW lämpö ja voimakattiloissa jos niiden osuus kokonaispolttomäärästä on alle 15 %. Koska kaasutuksen mitoitusteho on yli 5MW se soveltuisi tehon näkökulmasta käsittelemään biopelletit. Lisäksi päivittäinen seospolttoaineen kapasiteetti ei ylitä ohjearvoa 15 %.

Biopelletteissä lämpöarvo on alhaisempi kuin havu- ja koivukuoren, joten seosta poltettaessa se tulisi ottaa huomioon varsinkin silloin kun meesauunin kuormituksen seurauksena kaasuttimen teho on lähellä nimelliskapasiteettia. Kuitenkin biopellettien määrä suhteutettuna kuorivirtaan on maltillinen, joten mitään merkittäviä häviöitä ei pitäisi päästä syntymään. Jos biopelletti käsiteltäisiin kuoren kuivurin lävitse parantaisi se biopelletin lämpöarvoa samalla.

Poltettaessa tulisi kiinnittää huomiota biopellettien korkeaan tuhkapitoisuuteen, joka kuoren tuhkamääriin verrattuna on merkittävästi suurempi. Kasuvat tuhkamäärät edistävät kaasuttimen likaantumista sekä kapasiteetin kasvattamista tuhkan poistolaitteistolla.

Taulukko 12 Syötettävän polttoaineen tuhkapitoisuudet (Kuivakangas, 2023)

Polttoaine	Kaasutusteho (MW)	Tuhkapitoisuus (%)	Tuhkan määrä (t/d)
Biopelletti	-	25	5
Havu- koivukuori	70	2,2	8,8
Havu- koivukuori	87	2,2	10,8

Taulukossa 12. on esitetty kaasuttimeen syötettävien polttoaineiden tuhkapitoisuudet. Havu- ja koivukuoren syntyneen tuhkan määrään vaikuttaa kaasuttimen tehontarve. Mitä kovempi kaasutusteho

on, sen enemmän tuhkaa myös muodostuu. Taulukosta voidaan todeta, että poistettavan tuhkan määrä kaasutuslaitteistolla kasvaisi noin 45-60 % vuorokaudessa. Tämä tihentäisi tuhkalavojen tyhjennystarvetta merkittävästi. Kuitenkin kaasuttimen tuhkan käsittelylaitteiston kapasiteetti pystyisi käsittelemään molempien polttoaineiden tuhkamäärät.

Biopellettien kemialliset ominaisuudet poikkeavat kuoresta jonkin verran. Kuitenkin tyypillisille polttoaineille tarvittavia palavia komponentteja esiintyy biopelletistä (hiili, vety, happi, typi ja rikki). Taulukosta 5. voidaan tulkita, että hiilen (C) ja Vedyn (H) määrät eivät merkittävästi eroa havu- koivu- kuoresta.

Biopelletin koostumus poikkeaa laaditusta suunnittelupolttoaineseoksesta. Biopelletit omaavat alemman lämpöarvon (18,86 MJ/kg) sekä korkeamman kloori- (0,02 m- %ka) rikki- (0,04 m- %ka) ja tuhkapitoisuuden (2,2 m- %ka) (taulukko 6). Kuitenkin nykyisin käytettävä polttoaine myös poikkeaa hieman suunnittelupolttoaineseoksesta ja lisäksi sekoittuessaan kuoren kanssa, pitoisuudet laskevat kokonaispolttoainemäärässä.

Ilmapäästöjen osalta biopelletit eivät tulisi kuormittamaan luparajoja. Biopellettien koeajoraportin mittausten perusteella pystyttiin toteamaan, että seospoltossa ei havaittu merkittäviä luparajaylityksiä. Koska biopelletti sisältää pienen määrän typpeä (N) suhteessa kuoripolttoaineeseen ei se nostata typen oksidien (NO_x) päästöjä merkittävästi. Kuitenkin mahdollisia rikkidioksidi (SO₂) pitoisuuksia voidaan havaita päästöjen valvonnassa satunnaisina piikkeinä.

6.3 Biopellettien vierasaineiden vaikutukset

6.3.1 Kaasuttimen pohjatuhka

Biopellettien vierasainemäärät nostattavat pohjatuhkan pitoisuuksia osittain yli laitevalmistajan määrittämien raja-arvojen.

Taulukko 13. Pohjatuhkan vierasaineiden luparaja-arvot sekä polttoaineiden vierasainemäärät (mg/kg pohjatuhkaa kohden) (Kuivakangas, 2023)

Alkuaine	Raja-arvo	Pitoisuudet pohjatuhkassa kuori	Pitoisuudet pohjatuhkassa biopelletti	Pitoisuudet pohjatuhkassa yhteensä	Biopelletti nostaa vierasainemäärää %
Alumiini (Al)	3000	1579	2898	4478	184
Fosfori (P)	3000	1113	217	1336	20
Pii (Si)	50000	4490	4040	8530	90
Magnesium (Mg)	100000	29442	142	29584	0
Mangaani (Mn)	2000	1090	45	1135	4

Taulukossa 13. on esitetty kuoren kaasuttimen pohjatuhkan vierasaineiden määrät. Taulukon vasemmassa reunassa on määritettävä vierasaine. Vierekkäisessä sarakkeessa on esitetty laitevalmistajien määrittämät raja-arvot pohjatuhkapitoisuuksille. Taulukon keskiosalla on kerrottu kuoren- sekä biopellettien vierasainepitoisuudet. Kuoren pitoisuusarvot määritetään laboratoriossa ja syötetään käyttöjärjestelmään. Määritettyjen lukujen keskiarvoista ja biopelletin vierasaineet laskettiin alla olevan yhtälön (4) mukaisesti.

$$\text{Biopelletti} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) = (\text{Biopelletti vierasaine} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) * \text{Biopelletin tuhkamäärä} (\text{kg})) \div \text{Kokonaistuhka} (\text{kg}) \quad (4)$$

Taulukon oikeassa reunassa on laskettu kuoren- sekä biopelletin vierasaineet yhteen sekä kuinka paljon biopelletin osuus nostaisi kokonaisvierasainemäärää.

Tuloksista voidaan todeta, että alumiinin (Al) määrä tulisi ylittämään määritetyt raja-arvot. Pelkästään biopelletin korkea alumiinipitoisuus (2898 mg/kg) melkein ylittää laaditun raja-arvon (3000 mg/kg). Muut vierasainepitoisuudet eivät tulosten perusteella ylittäisi raja-arvoja.

6.3.2 Biopelletin raskasmetallipitoisuudet

Biopellettien raskasmetallipitoisuudet vaikuttavat merkittävästi pohjatuhkalle määritettyihin luparaja-arvoihin.

Taulukko 14. Biopelletin tuhkan raskasmetallipitoisuudet sekä kuoren tuhkalta laaditut raja-arvot (mg/kg) (Finlex, 2011)

Raskasmetallit	Biopelletti tuhkan raskasmetallipitoisuudet	Kuoren tuhkan raja-arvot
Arseeni (As)	3,2	40
Elohopea (Hg)	0,17	1
Kadmium (Cd)	11,8	1,5
Kromi (Cr)	49	300
Kupari (Cu)	50	600
Nikkeli (Ni)	18	120
Lyijy (Pb)	41	150
Sinkki (Zn)	1000	4500

Taulukossa 14. on esitetty biopelletin tuhkan sisältämiä raskasmetallipitoisuuksia sekä kuorituhkan lannoitteelle laaditut enimmäispitoisuudet. Taulukosta voidaan todeta, että Kadmiumpitoisuus (Cd)

(11,8 mg/kg) ylittää sallitun raja-arvon (1,5 mg/kg) moninkertaisesti. Muut raskasmetallipitoisuudet ovat luparajojen alapuolella. Kaasuttimella käytettävästä kuoren tuhkasta on tehty raskasmetallipitoisuusmääritykset ja siinä ei ole havaittu luparajaylityksiä kadmiumpitoisuudessa (alle 0,01 mg/kg).

Taulukko 15. kadmiumin (Cd) määrä pohjatuhkassa (mg/kg) (Kuivakangas, 2023)

kuoren- ja biopelletin tuhka (kg)	Kadmiumpitoisuus Biopelletissä (Cd)	kokonaispitoisuus biopelletissä (Cd)
13 800	11,8	4,27

Taulukossa 15. on esitetty kadmiumin määrä kokonaistuhkassa. Ensimmäisessä sarakkeessa on esitetty syntyvän kuoren- ja biopelletin tuhkan määrä vuorokausitasolla. Toisessa sarakkeessa on esitetty biopelletin kadmiumpitoisuus, jos syntyvää tuhkamäärä on 5 tonnia/vuorokaudessa. Viimeisessä sarakkeessa on esitetty kuoren tuhkan kadmiumpitoisuus, joka saatiin laskettua alla olevan yhtälö (5) mukaan.

$$(Cd) \text{ mg/kg} = (Biopelletin \text{ kadmium } (Cd) \text{ mg/kg} * Biopelletin \text{ tuhkamäärä } (kg)) \div Tuhkan \text{ määrä } (kg) \quad (5)$$

Lannoitevalmistusasetuksessa 24/11 5 a § (Finlex 2011). todetaan: ”Lannoitevalmisteissa saa kadmiumin määrä olla enintään 1,5 milligrammaa kadmiumia kilogrammassa kuiva-ainetta sekä maa- ja puutarhataloudessa ja viherrakentamisessa saa maisemoinnissa käytettävässä tuhkalannoitteessa enintään 2,5 milligrammaa kadmiumia kilogrammassa kuiva-ainetta. Edellisestä poiketen saa metsässä käytettävissä tyyppinimiryhmän 1A7 tuhkalannoitteet lannoitevalmisteissa ja niiden raaka-aineena käytettävässä tuhkassa olla enintään 25 milligrammaa kadmiumia kilogrammassa kuiva-ainetta. Lannoitevalmisteen fosforipitoisuuden ollessa vähintään 2,2 % (5% P₂O₅) saa kadmiumia olla 50 mg yhtä fosforikilogrammaa kohden”.

Tuloksista voidaan päätellä, että kuoren tuhkan kadmiumpitoisuus (Cd) ylittäisi sallitun luparaja-arvon.

6.3.3 Rikastuminen sähkösuotimen pölyyn

Koska ei pystytä varmaksi todentamaan minne tuotekaasun mukana kulkeutuvat vierasaineet rikastuvat, esitettiin kolme erilaista versiota tilanteesta. Ensimmäisessä versiossa kaikki tuotekaasun vierasaineet rikastuisivat sähkösuotimen tuhkaan. Toisessa versiossa 70 % vierasaineista rikastuu sähkösuotimen tuhkaan ja kolmannessa versiossa 30 % vierasaineista rikastuu sähkösuotimen tuhkaan. Versiossa 2 ja 3 vierasaineet rikastuisivat poltetun kalkin mukana kaustisointiprosessiin. Biopelletin vierasainepitoisuudet laskettiin alla olevan yhtälön (6) mukaan.

$$Biopelletti \text{ vierasainemäärä pölyssä } mg/kg = (Biopelletin \text{ vierasaine } (mg/kg) * Biopelletin \text{ osuus tuotekaasusta } (kg)) \div \text{sähkösuotimen tuhkan määrä } (kg) \quad (6)$$

Taulukko 16. Versio 1. sähkösuodattimen tuhkan vierasaineiden raja-arvot 100/0 % (mg/kg) (Kuivakangas, 2023)

Alkuaine	Raja-arvo	Pitoisuudet sähkösuotimen tuhkassa	Pitoisuudet sähkösuotimen tuhkassa biopelletti	Kokonaispitoisuus sähkösuotimen tuhkassa
Alumiini (Al)	900	353	1630	1983
Fosfori (P)	10000	4416	1505	5921
Pii (Si)	2000	798	2272	3070
Magnesium (Mg)	12000	6153	1061	7214
Mangaani (Mn)	1100	553	362	915

Taulukossa 16. on esitetty versio, missä tuotekaasun mukana tulevat vierasaineet rikastuisivat pelkästään sähkösuodattimen tuhkaan. Tuloksista voidaan todeta, että alumiini ja pii ylittäisivät määritetyt raja-arvot. Jotta vierasainepitoisuudet saataisiin alle raja-arvon, tulisi kalkkikiertoa aukaista noin 220 000 kiloa/vuorokaudessa, joka olisi noin 3 kertainen määrä nykyiseen tilanteeseen verrattuna.

Taulukko 17. Versio 2. sähkösuodattimen tuhkan vierasaineiden raja-arvot 70/30 % (mg/kg) (Kuivakangas, 2023)

Alkuaine	Raja-arvo	Pitoisuudet sähkösuotimen tuhkassa	Pitoisuudet sähkösuotimen tuhkassa biopelletti	Kokonaispitoisuus sähkösuotimen tuhkassa
Alumiini (Al)	900	353	1141	1494
Fosfori (P)	10000	4416	1053	5469
Pii (Si)	2000	798	1591	2389
Magnesium (Mg)	12000	6153	743	6896
Mangaani (Mn)	1100	553	253	806

Taulukossa 17. on esitetty versio, missä tuotekaasun mukana kulkeutuvat vierasaineet rikastuvat 70 % sähkösuotimen tuhkaan. Kokonaisvierasainemäärä saatiin laskettua yhtälön 6. avulla, mutta kokonaistuloksesta vähennettiin poltettuun kalkkiin rikastuva määrä. Tuloksista voidaan todeta, että alumiini (Al) sekä pii (Si) ylittäisivät laaditut raja-arvot. Jotta vierasainepitoisuudet saataisiin alle raja-arvojen, tulisi kalkkikiertoa aukaista noin 160 000 kiloa/vuorokaudessa, joka olisi yli 2 kertainen määrä verrattuna nykyiseen tilanteeseen.

Taulukko 18. Versio 3. Sähkösuodattimen tuhkan vierasaineiden raja-arvot 30/70 % (mg/kg) (Kuivakangas 2023)

Alkuaine	Raja-arvo	Pitoisuudet sähkösuotimen tuhkassa	Pitoisuudet sähkösuotimen tuhkassa biopelletti	Kokonaispitoisuus sähkösuotimen tuhkassa
Alumiini (Al)	900	353	489	842
Fosfori (P)	10000	4416	451	4867
Pii (Si)	2000	798	682	1480
Magnesium (Mg)	12000	6153	318	6471
Mangaani (Mn)	1100	553	109	662

Taulukossa 18. on esitetty versio, missä tuotekaasun mukana kulkeutuvat vierasaineet rikastuvat 30 % sähkösuotimen tuhkaan. Kokonaisvierasainemäärä saatiin laskettua yhtälön 6. avulla, mutta kokonaistuloksesta vähennettiin poltettuun kalkkiin rikastuva määrä. Tuloksista voidaan päätellä että määritetyt vierasaineet alittaisivat laaditut raja-arvot.

6.3.4 Rikastuminen kalkkikiertoon

Kalkkikierron vierasainetasetta säädetään sekä seurataan sähkösuotimen ja uunin välisen ulosajolinjaston avulla, joten vierasaineiden rikastuttua poltettuun kalkkiin ei viherlipeäpuolella ole raja-arvoihin perustuvaa seurantaa. Vierasainemääriä pystytään seuraamaan valkolipeästä ennen saapumista keittämön prosessiin. Biopelletin vierasainemäärät valkolipeässä laskettiin alla olevan yhtälön (7) mukaan.

$$\text{Biopelletti vierasainemäärä valkolipeässä mg/l} = (\text{Biopelletin vierasaine (mg/kg)} * \text{Biopelletin osuus tuotekaasusta (kg)}) \div \text{valkolipeän määrä (l)} \quad (7)$$

Ennen valkolipeän valmistusta, poltetu kalkki ja soodakattilalta syötettävä viherlipeä kohtaavat sammuttimessa, missä kemiallinen reaktio tapahtuu. Sammuttimen pohjalla sijaitsee lajitinruuvi, minkä tehtävänä on poistaa viherlipeäsakka sammuttimesta sakkalavoille. Sammuttimen sakasta ei ole tehty vierasainemäärityksiä, mutta voidaan olettaa, että osa vierasaineista rikastuu ja kulkeutuu lajitinruuvin mukana ulos prosessista.

Taulukko 19. Valkolipeäsäiliön jälkeen määritetyt vierasainepitoisuudet (mg/l) (Kuivakangas, 2023)

Alkuaine	Raja-arvo	Pitoisuudet valkolipeässä	Pitoisuudet valkolipeässä biopelletti	Kokonaispitoisuus valkolipeässä
Alumiini (Al)	100	13,3	7,3	20,6

Fosfori (P)	1000	8,66	6,7	15,4
Pii (Si)	1000	153	10,2	163,2
Magnesium (Mg)	100	0,452	4,8	5,2
Mangaani (Mn)	100	3,98	1,6	5,6

Taulukossa 19. on esitetty valmistettavan valkoliipeän sisältämät vierasainemäärät käyttöjärjestelmän raportista. Taulukkoon on määritetty, että kaikki biopelletissä olevat vierasaineet rikastuisivat valkoliipeään. Raja-arvojen perusteella pystytään toteamaan, että valkoliipeässä sisältämät vierasainemäärät ovat hyvin maltilliset. Taulukosta voidaan myös todeta, että biopellettien vierasainemäärät eivät nostaisi kokonaisvierasainemääriä yli laadittujen raja-arvojen.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Esiselvitys mielestäni onnistui hyvin ja opinnäytetyöhön saatiin laadittua kasaan aineisto, minkä perusteella pystyttiin määrittelemään biopelletin soveltuvuutta tuotekaasun raaka-aineeksi ja olisiko järkevää kokeilla koeajoja kaasuttimella. Lopputyö täytti työlle asetetut tavoitteet.

Haasteita opinnäytetyön aikana oli aikataulutus. Koska työ toteutettiin oman työn ohessa, jäi välillä esiselvitystyö muiden projektien varjoon. Lisäksi opinnäytetyötä tehdessä meinasi aihe paisua todella helposti moneen otteeseen. Työtä merkittävästi helpottivat Metsän asiantuntijat, jotka opastivat tarpeen vaatiessa. Esiselvitystä tehdessä yllätti, miten runsaasti biopelletit sisältävät ei toivottuja vierasaineita.

Esiselvityksen perusteella biopellettejä pystyttäisiin käsittelemään sekä polttamaan kaasuttimessa, mutta siitä mahdollisesti tulisi aiheutumaan luparajaylityksiä sekä prosessihaasteita. Keskeisimmät haasteet mitä tunnistettiin biopelleteistä olivat korkeat kadmium- (Cd) ja alumiinipitoisuudet (Al). kaasuttimen sekä sähkösuotimen alueella.

Biopellettien käsittely kaasuttimella nostaisi syntyvän pohjatuhkan määrää, jonka seurauksena tuhkalavojen tyhjennysväli tihentyisi merkittävästi.

Koska biopellettien korkea kadmiumpitoisuus (Cd) nostattaisi kuorituhkan raskasmetallipitoisuuden yli sallittujen raja-arvojen, (4,27 mg/kg) sitä ei pystyttäisi hyödyntämään jatkossa peltolannoitteena vaan tulisi tuhkalta löytää uusi loppusijoituspaikka.

Biopelletin vierasainemäärityksissä esille nousi korkea alumiinipitoisuus (Al), joka ylitti laadittuja raja-arvoja. Kuoren tuhkassa alumiinipitoisuudet keskiarvallisesti tulisivat ylittämään määritetyt raja-arvot. Kuitenkin esiselvitystä tehdessä havaittiin että vaihtelevaisuutta pitoisuuksissa oli todella paljon laboratoriotulosten perusteella. Alumiinille ei ole määritetty Maa ja metsätalousministeriön laatimassa asetuksessa lupa-asetuksiin perustuvaa raja-arvoa, joten sen puolesta tuhka soveltuisi lannoitekäyttöön.

Koska esiselvityksen aikana tuli selväksi, ettei pystytä varmaksi osoittamaan aukotonta vierasaineiden kulkeutumista prosessissa, jouduttiin laatimaan kolme versiota vierasaineiden kulkeutumisesta prosessissa. Lisäksi esiselvityksessä tarkisteltiin kuinka paljon vierasaineet kuormittaisivat keittämölle syötettävää valkolipeää.

Esiselvityksessä havaittiin tuloksien perusteella rajaylityksiä alumiinilla (Al) sekä piillä (Si), jotka pa-kottaisivat kierron aukaisemisen lisäämistä kalkkikierrossa. Tämä aiheuttaisi ostokalkin annostelumäärän nostamisen, joka lisäisi biotuotetehtaan tuotantokustannuksia sen osalta. Vaikka yksi laadituista versiosta alitti raja-arvot, oli vierasainepitoisuudet siinäkin todella korkeat alumiinin (Al) osalta.

Metsä Groupin laatimassa vierasainekoulutuksessa mainitaan, että alumiinin todennäköisin rikastumiskohde olisi kalkkikierto ja jos alumiinia on runsaasti kierrossa, se tyypillisesti tunnistetaan meesän värin muuttumisesta tummaksi. Lisäksi koulutusmateriaalissa kerrotaan, että alumiinilla on korkea liukoisuusaste valkolipeään, joten korkeina pitoisuuksina alumiini saattaisi aiheuttaa haasteita kuitu- ja talteenottolinjalla esimerkiksi saostumalla haihdutinyksikköihin. Lisäksi on tunnistettu, että alumiinin esiintyessä aluminaatti-ionina ($\text{Al}(\text{OH})_4$) se muodostaa yhdessä magnesiumyhdisteiden kanssa alkalisissa olosuhteissa liukenemattoman yhdisteen nimeltä hydrotalsiitti. Hydrotalsiitti voi aiheuttaa haasteita varsinkin kaustisoinnin prosessissa. (Kankaanpää, 2008) Alumiinipitoisuuden pienentäminen prosessista onnistuu tehokkaimmin selkeytysprosessin kautta kun poistetaan viherlipeäsakkaa.

Kuitenkin raportointijärjestelmään laadittujen raja-arvojen perusteella Äänekosken biotuotetehtaan vierasainetasapaino ja valkolipeän laatu tuntuvat olevan hyvässä tilassa. Varsinkin valkolipeän sisältämät vähäiset vierasainepitoisuudet olivat positiivinen yllätys.

Jotta pystyttäisiin tarkasti arvioimaan biopelletin soveltuvuutta, tulisi järjestää seospolttoaineen koeajot kaasuttimelle ja tehdä pitempi tarkastelujakso. Opinnäytetyössä sivuttiin ainoastaan, mitä tapahtuisi yhden vuorokauden otannalla prosessissa.

Jos edellä mainittuihin toimenpiteisiin haluttaisiin ryhtyä, tulisi kaasuttimen pohjatuhkalle löytää toinen loppusijoituskohde. Koeajoissa tulisi kiinnittää huomiota myös pitäisikö kaasuttimen petikalkin annosteluun tehdä muutoksia biopelletin lisäyksen seurauksena. Lisäksi koeajojen aikana tulisi tarkkailla erityisesti alumiinin (Al) käyttäytymistä kalkki- ja lipeäkierrossa.

8. LÄHDELUETTELO

Andritz. 2016. Haihduttamon käyttö- ja huolto-ohje. [Viitattu 30.8.2023].

Aprotech. 2019. Käyttö- ja huolto-ohje dekantterilinko. [Viitattu 15.8.2023]

Basu, Prabir. 2013. Biomass gasification pyrolysis and torrefaction. Sciencedirect. [Viitattu 30.9.2023] Saatavissa: <http://www.iqytechnicalcollege.com/RE502-%20Biomass%20Gasification.pdf>

Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. 2022. Puupohjaisiin raaka-aineisiin perustuvien biotuotelaitosten uudet tekniikat, päästötasot ja tekniikoiden kokonaisympäristövaikutukset. [Viitattu 16.8.2023] Saatavissa: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/186294/Ra-portti%2079_2022.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Finlex. 2011. Maa ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista. [Viitattu: 14. 11 2023.] Saatavissa: [file:///C:/Users/U00540475/Downloads/11024fi%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/U00540475/Downloads/11024fi%20(3).pdf).

Metsä Fibre. 2023. Äänekosken biotuotetehdas. Metsä Group. [Viitattu 21.9.2023] Saatavissa: <https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/metsafibre/sellun-tuotanto/aanekosken-biotuotetehdas/>.

Kankaanpää, M 2008. Viherlipeäsakan ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät Metsä Botnia Keminsellutehtaalla .Oulun Yliopisto, 2008. s. 45-46. [Viitattu 15.1.2024]

Kettunen, S. 2019. Biokaasulaitoksen biopelletin käyttö polttoaineena. [Viitattu 2.9.2023]

Knowpulp. 2023. Sellunvalmistuksen oppimisympäristö. [Viitattu 25.9.2023] Saatavissa: knowpulp.com

Kuivakangas, A. 2023. Biopelletit rakeistuksen jälkeen. 30.8.2023. Äänekoski

Kuivakangas, A. 2023. Biokaasulaitoksen prosessikaavio. 21.8.2023. Äänekoski

Kuikka, T. 2018. Sulfiditeetin hallinnan kemikaalilaskennan laatiminen. LUT [Viitattu 2.10.2023] Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/149443/Kandidaatinty%C3%B6_Tuure%20_Kukka.pdf?sequence=1

Mertakorpi, A. 2023. Vierasaineiden käyttäytyminen sulfaattisellutehtaan kalkkikierrrossa. LUT, [Viitattu 5.10.2023] Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/162331/diplomityo_aatu_mertakorpi_11_03.pdf?sequence=4&isAllowed=y

Monts. 2016. Kiekkokuivain käyttö- ja huolto-ohjeet. [Viitattu 2.9.2023]

Motiva. 2023. Biopolttoaineen lämpöarvoja. [Viitattu 6.10.2023]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/tietolahteita/biopolttoaineiden_lampoarvoja.

Motiva. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen polttoaineen kuivaustekniikat. [Viitattu:16.8.2023.] Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/13514/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Polttoaineen_kuivaustekniikat.pdf.

- Nousiainen, M. 2019.** *Kalium ja kloorin pitoisuuksien hallinta modernilla sellutehtaalla.* LUT, [Viitattu 21.9.2023] Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159769/DIty%C3%B6_NousiainenMarko.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ojanen, Pekka. 2001.** Sellu- ja paperitehtaiden lietteiden käsittely ja hyötykäyttö sekä niitä rajoittavat tekijät. Kaakkois-suomen ympäristökeskus, [Viitattu: 17. 8 2023.] : Saatavissa: <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/113719/AY223%20Sellu-%20ja%20paperitehtaiden%20lietteiden%20k%C4%96sittely%20ja%20hy%C6%96tyk%C4%96ytt%C6%96sek%C4%96niit%C4%96rajoittavat%20tekij%C4%96t.pdf?sequence=2>.
- Poukka, O. 2023.** Kehityspäällikkö. Haastattelu. Äänekoski 11.10.2023
- Pongracz Eva, Jouko Parviainen, Ville Kuittinen, Nick Lyth. 2011.** Energiaa biomassasta ja jätteistä. *Micre.Eu.* Micre Energy, 1. 10 2011. [Viitattu: 16. 8 2023.] Saatavissa: http://nortech.oulu.fi/MicrE_files/MicrE_W2E_FIN.pdf.
- Pro Puu -yhdistys.** Puun kerrokset. Puuproffa, [Viitattu: 20.9.2023.] Saatavissa: <https://puuproffa.fi/puutieto/puun-kerrokset/>.
- Turunen, E. 2023.** Tekninen johtaja. Haastattelu. Äänekoski, 15.8.2023
- Valmet. 2017.** Kaasuttimen käyttö- ja huolto-ohje. [Viitattu 14.9.2023]
- VTT. 2016.** Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT, 2016. [Viitattu: 20. 9 2023.] Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf>.