

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Kandidaatintyö

**BIOTERMINEN KUIVAUS ERILLISKERÄTYN
BIOJÄTTEEN SEKÄ MEKAANISESTI EROTELLUN
YHDYSKUNTAJÄTE-REJEKTIN KÄSITTELYSSÄ**
**Biodrying in separately collected biowaste and mechanically
separated municipal solid waste handling**

Työn tarkastaja: Professori , TkT Mika Horttanainen
Työn ohjaaja: Tutkijaopettaja, TkT Jouni Havukainen

Lappeenrannassa 30.5.2021

Iida Kaskinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Iida Kaskinen

Bioterminen kuivaus erilliskerätyn biojätteen sekä mekaanisesti erotellun yhdyskuntajätterejektin käsittelyssä

Kandidaatintyö

2021

40 sivua, 5 taulukkoa ja 2 liitettä

Työn tarkastaja: Professori , TkT Mika Horttanainen

Työn ohjaaja: Tutkijaopettaja, TkT Jouni Havukainen

Hakusanat: bioterminen kuivaus, kompostointi, sekajäte, biojäte, liete

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan bioterminen kuivauksen vaikutusta eri jätelajien ominaisuuksiin ja hyödynnettävyyteen. Tutkittavia jätelajeja olivat kostea sekajäte, erilliskerätty biojäte sekä metsäteollisuuden- ja yhdyskuntalietteet. Tämän lisäksi vertailtiin biotermistä kuivausta prosessina kompostointiin, sekä termiseen kuivaukseen ja tutustuttiin muutamiin olemassa oleviin teknologioihin. Tutkittavista jätelajeista kostea sekajäte soveltuu hyvin biotermiseen kuivaukseen oli se sitten tarkoitus polttaa energiaksi, tai sijoittaa kaatopaikalle. Biojätteellä on kuivaamisen lisäksi muita mahdollisia käsittelytapoja, kuten kompostointi tai mädätys. Kuivaaminen on järkevää, jos biojäte tai lietteet on tarkoitus viedä poltettavaksi, eikä hyödyntää esimerkiksi lannoitteena kompostoinnin jälkeen. Yleisesti jätteiden kuivaamisen myötä helpottuu niiden lyhytaikainen varastointi sekä kuljetus, myös hajuhaitat ja jätteen fyysinen tilavuus pienenevät. Valmiista tutkimuksista löytyvien kuivaustulosten pohjalta selvitettiin esimerkin omaisesti jätteen kosteuden ja lämpöarvon muutos, sekä laskettiin kuivaamiseen kuluvan lämpöenergian määrä. Jätteen kuivaamisella on myös sen lämpöarvoa parantava vaikutus, jonka vuoksi kostean jätteen kuivaaminen ennen polttoa on kannattavaa. Esimerkkinä lämpöarvon paranemisesta sekajätteen kosteuspitoisuuden muututtua 33 %:stä 18 %:iin, parani sen lämpöarvo 18 MJ/kg:sta 21,1 MJ/kg:aan, jolloin sen loppusijoitus helpottui.

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | JOHDANTO | 1 |
| 2 | BIOTERMINEN KUIVAUS | 3 |
| 2.1 | Vaikuttavat tekijä | 5 |
| 2.1.1 | Ilmavirta..... | 6 |
| 2.1.2 | Sekoittaminen | 7 |
| 2.2 | Ero kompostointiin ja termiseen kuivaukseen | 7 |
| 2.2.1 | Ero kompostointiin | 8 |
| 2.2.2 | Ero termiseen kuivaukseen | 8 |
| 3 | KUIVAUKSEEN SOVELTUVAT MATERIAALIT | 10 |
| 3.1 | Biojäte | 10 |
| 3.2 | Sekajäte | 11 |
| 3.3 | Lietteet..... | 13 |
| 3.3.1 | Metsäteollisuuden lietteet | 13 |
| 3.3.2 | Yhdyskuntalietteet | 14 |
| 4 | OLEMASSA OLEVAT TEKNOLOGIAT | 17 |
| 4.1 | Sekajäte | 17 |
| 4.2 | Biojäte | 18 |
| 4.3 | Lietteet..... | 19 |
| 4.4 | Laitevalmistajia | 20 |
| 5 | ESIMERKKILASKENTA BIOTERMISELLE KUIVAUKSELLE..... | 22 |
| 5.1 | Kosteuspitoisuus | 23 |
| 5.2 | Lämpöarvo | 24 |
| 5.3 | Tulokset..... | 25 |
| 5.3.1 | Massatase | 26 |
| 5.3.2 | Energiatase | 27 |
| 6 | JOHTOPÄÄTÖKSET | 30 |
| 7 | YHTEENVETO | 31 |
| | LÄHTEET | 33 |

LIITTEET

LIITE I : Massataseen laskenta

LIITE II: Energiataseen laskentaa

1 JOHDANTO

Suomessa syntyy yhdyskuntajätettä noin kolme miljoonaa tonnia vuodessa, mistä sekajätettä on noin puolet. Erilliskerättyä jätettä on siis myös noin puolet. Suomessa kerätystä jätteestä vain alle prosentin osuus päätyy kaatopaikoille, sillä suurin osa jätteestä hyödynnetään energiantuotantoon ja loput materiaalit kierrätetään uusiokäyttöön. (Tilastokeskus 2020.) Vaikka erilliskerättyä jätettä on paljon, on sekajätteen joukossa edelleen paljon jätettä, jonka olisi voinut kierrättää.

Sekajätteen mukana voi olla paljonkin biojätettä, joka heikentää sekajätteen hyödyntämismahdollisuuksia. Suomessa sekajätteen koostumuksesta noin 30 % on biojätettä (Kiertovoima ry 2020). Sekajätteen seassa oleva biojäte poltetaan muun jätteen seassa, jolloin siinä olevat ravinteet ja humus häviävät sen sijaan, että ne olisi voitu hyödyntää kompostoinnin jälkeen. Kosteaa biojätettä sekajätteen seassa huonontaa myös jätteen lämpöarvoa. (Kiertokapula 2021.) Suomessa sekajätteen voi kuitenkin ongelmitta polttaa, sillä biojätteen osuus ei ole niin suuri. Esimerkiksi Kiinassa, Hangzhousa yhdyskuntajäte sisältää paljon enemmän biojätettä, jopa 64 % joka on melko paljon verrattuna Suomen 30 %:iin. (Havukainen et al. 2016.)

Suomessa suurin osa erilliskerätystä biojätteestä mädätetään ja kompostoidaan. Mädätyksen avulla saadaan tuotettua biokaasua ja mädätysjäännös sekä kompostimulta ovat hyviä maanparannusaineita. (Tilastokeskus 2020.) Biokaasujen ja maanparannusaineiden lisäksi biojätteestä voidaan prosessoida bioetanolia, joka toimii autojen polttoaineen raaka-aineena. Tämän prosessin sivutuotteena syntyy sähköä ja kaukolämpöä. (Kiertokapula 2021.)

Biotermistä kuivausta voi käyttää Ojasen (2001) mukaan yhtenä kuivaustapana esimerkiksi paperi- ja kartonkiteollisuudessa syntyvälle lietteelle. Kuivauksen avulla saadaan lietteen kuiva-ainepitoisuus sopivaksi polttoa varten. Nykyisin Suomessa metsäteollisuuden lietteet päätyvät polttoon, vaikka massa onkin hyvin kosteaa. (Ojanen 2001.) Myös yhdyskuntalietteitä voi kuivata biotermisesti, yleensä polttoa varten (Winkler et al. 2013). Lietteitä on mahdollista myös kompostoida, mutta EU:n määräysten vuoksi kompostoidun

lietteen käyttö lannoitteena on usein kiellettyä tai sen laadulle on tarkat laatuvaatimukset, minkä takia poltto on ainoa järkevä loppukäsittelyvaihtoehto (Ruokavirasto 2021).

Kompostointia muistuttava jätteen kuivaamistapa on biotermistä kuivausta. Biotermisen kuivauksen avulla jätettä voidaan kuivata, jolloin sen lämpöarvo paranee. Yleensä kuivaus tehdään polttoa varten. Kompostoinnin tehostamiseksi on materiaalilla oltava riittävä kuiva-ainepitoisuus, joka yleensä aikaansaadaan lisäämällä sen joukkoon tukiainetta, joka voi olla esimerkiksi haketta tai turvetta. Toinen vaihtoehto on käyttää biotermistä kuivausta. (Liimatainen 2000.)

Tässä kandidaatintyössä on tavoitteena tutkia biotermisen kuivauksen vaikutuksia jätteen ominaisuuksiin. Työssä tarkastellaan, muuttuuko jätteen hyödynnettävyys kuivauksen myötä. Työssä tutustutaan myös maailmalla käytössä oleviin ratkaisuihin sekä niiden kannattavuuteen. Tarkoituksena on selvittää millaista jätettä kuivataan, kuinka suuressa kokoluokassa kuivaus tapahtuu sekä mitkä ovat kuivauksen tavoitteet.

Teoriaosa perustuu kirjallisuuskatsaukseen. Toisena menetelmänä työssä käytetään laskentaa esimerkkitapausten avulla. Tavoitteena on saada selville massa- ja energiataseiden laskennan avulla konkreettisia lukuja kuivauksen vaikutuksista. Näitä lukuja ovat esimerkiksi lämpöarvot ja kosteuspitoisuudet ennen kuivausta ja sen jälkeen. Nämä ominaisuudet vaikuttavat jätteestä saatavaan hyötyyn esimerkiksi polton yhteydessä. Tutkimusalue rajataan työssä lietteiden osalta metsäteollisuuden- sekä yhdyskuntalietteiden tutkimiseen ja biojätteiden osalta tutustumaan muutamaa tutkimukseen. Sekajätteen osalta keskitytään muutamaa esimerkkipaikkaan, joiden jätteen koostumus tunnetaan ja jonka perusteella laskentaa voidaan tehdä. Laskenta perustetaan täyden kokoluokan reaktorille, jossa tutkimusta on tehty. Tässä tapauksessa kohde on Italian Milanossa.

2 BIOTERMINEN KUIVAUS

Bioterminen kuivaus perustuu biojätteen tai muun vastaavan jätteen sisältämän veden haihduttamiseen kompostoitumisesta syntyvän lämmön avulla. Olosuhteet säiliössä/reaktorissa ovat otolliset mikrobitoiminnan kannalta. Biotermisen kuivauksen tavoite on saada jätteen kosteuspitoisuus vähenemään sekä välttää orgaanisen jätteen liiallinen hajoaminen. Kuivauksen myötä paranee jätteen lämpöarvo. (Ojanen 2001.)

Biotermisessä kuivauksessa on tärkeää määrittää optimaaliset olosuhteet kosteuspitoisuuden poiston suhteen (Ojanen 2001). Optimaaliset olosuhteet luodaan riittävän voimakkaan läpikulkeva ilmavirran avulla, sekä poistuvan ilmavirran lämpötilan säilyminen tarpeeksi korkeana. Ilmavirran riittävyys riippuu jätteen määrästä ja sen kosteuspitoisuudesta. Ilmavirran lämpötilan mukaan määräytyy sen kyky sitoa kosteutta. (Navaee-Ardeh et al. 2006.) Optimaaliset olosuhteet tulee määrittää, jotta voidaan maksimoida haihtuvan veden määrä sekä minimoida kuivaamiseen käytetty energia ja kuivaamiseen käytetty aika (Velis et al. 2009). Kuivaus tapahtuu suljetussa tilassa, jossa jätteen esikompostointi tuottaa lämpöenergiaa, jonka myötä kosteus vähenee jätteessä. Tärkeää on huomata, että kuivatusta on tehtävä vain tarvittavaan kuiva-ainepitoisuuteen saakka, sillä kuivatukseenkin kuluu energiaa. Kosteutta poistetaan siis sen verran, että jätteen poltto onnistuu. Reaktorikompostoinnissa voidaan ottaa talteen ylimääräistä lämpöä, jos sitä on riittävästi. (Ojanen 2001.)

Biotermisellä kuivauksella voidaan jätteen, esimerkiksi metsäteollisuuden lietteiden kuiva-ainepitoisuutta nostaa 45 – 55 %:iin. Teoriassa voidaan päästä jopa 70 %:n kuiva-ainepitoisuuteen tehokkaan jälki-ilmastuksen avulla. Ennen kuivausta metsäteollisuuden lietteiden kuiva-ainepitoisuus on vain noin 30%. (Ojanen 2001.)

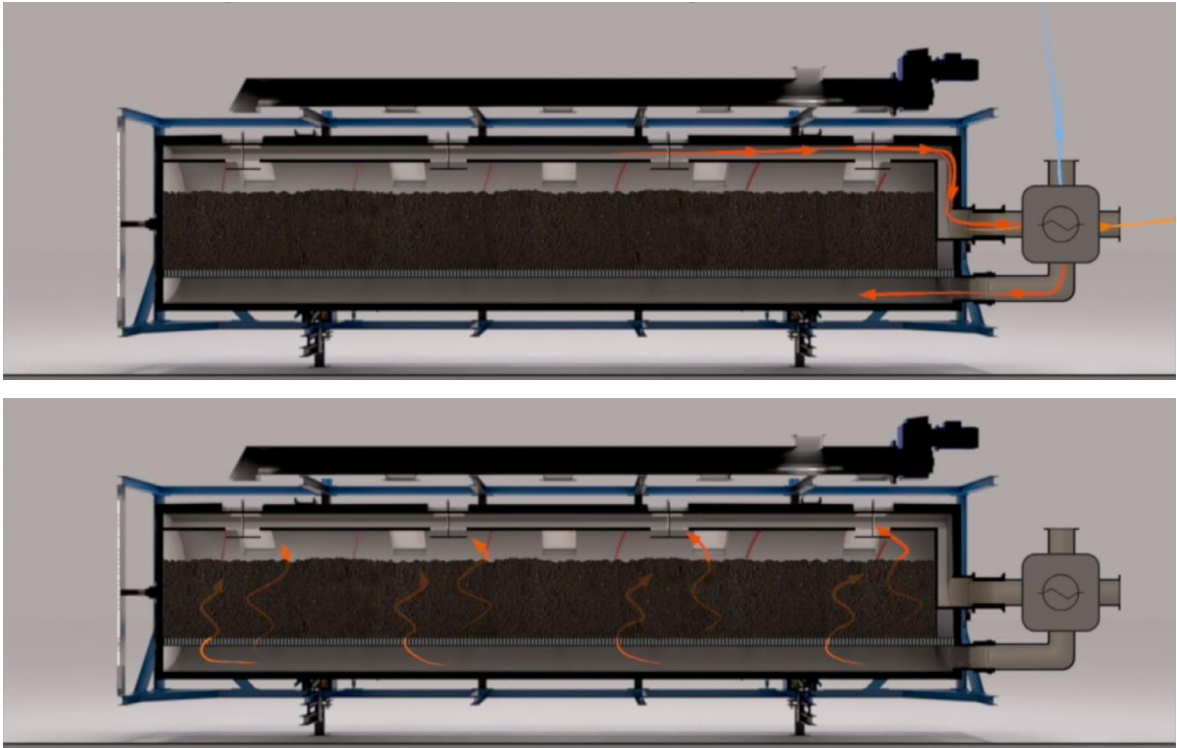
Etenkin kehittyvissä maissa biotermisellä kuivauksella on tärkeä tehtävä, sillä sen avulla vähennetään kaatopaikoille joutuvan sekajätteen määrää ja mahdollistetaan jätteen käyttö esimerkiksi energiantuotannossa polttamalla sitä (Dziedzid et al. 2015). Kuivauksen tavoite usein onkin saada aikaan polttokelvollista jätettä, jonka energiapitoisuus on edelleen korkea. Kuivauksen jälkeen jäte on kuitenkin poltettava lähes heti, sillä sen pitkäaikainen varastointi

ei ole mahdollista. Varastoinnin aikana jätteen orgaaninen aines jatkaisi hajoamista, minkä ei haluta tapahtuvan. Kuivauksen myötä jätteen kuljetus kuitenkin helpottuu huomattavasti, kun sen kosteuspitoisuus on alhaisempi. (Debicka et al. 2017.)

Tutkimuksien mukaan biotermisen kuivaus on laskenut jätteen kosteuspitoisuutta 50 %:sta 30 %:iin ja samalla lämpöarvo on noussut 30 %:sta 80 %:iin. Vaikka näiden tietojen perusteella kuivaus on pelkästään kannattavaa, tulee tässä myös huomioida biotermisen kuivauksen vaatima energia, jota käytetään ilman puhaltamiseen. Lisäksi kuivauksen aikana syntyy päästöjä, joita voivat olla esimerkiksi erilaiset biokaasut. (Psaltis et al. 2018.)

Monissa tutkimuksissa on seurattu tarkasti lämpötilan vaihtelua kuivausprosessin aikana. Esimerkiksi Shao et al. (2012) ja Yuan et al (2018) ovat huomanneet, että lämpötila nousee kuivauksen aikana korkeimmillaan noin 60 – 70 °C:seen, jossa se pysyy noin viikon ajan, kun kokonaisaika kuivaukselle on vähintään viikon, mutta se voi kestää jopa kolme viikkoa. Jos lämpötila laskee liian alas, hidastuu mikrobien toiminta ja siten lämpötila laskee edelleen. (Yuan et al. 2018)

Kuivausprosessi koostuu kolmesta vaiheesta. Ensimmäinen vaihe on lämpenemisvaihe, jonka aikana lämpötila jätteessä alkaa nousta, mutta kosteuspitoisuus tai jätteen massan määrä ei vielä tässä kohtaa oikeastaan muutu. (Bioforcetech 2021.) Ensimmäinen vaihe kestää noin 0,5 – 1 vuorokautta ja sen aikana prosessin lämpötila nousee noin 50 – 70 °C:seen (Lohiniva et al. 2001, 58). Kun jäte on saavuttanut tarpeeksi lämpimän lämpötilan haihtumisen kannalta, alkaa toinen vaihe. Toisessa vaiheessa sekä kosteuspitoisuus että sitä kautta myös jätteen kokonaismassa alkavat pienemään, kun jätteen sekaan syötetään ilmavirtaa. Lämpötilassa ei tässä vaiheessa tapahdu suurta muutosta (Bioforcetech 2021), vaikka se pikkuhiljaa alkaakin laskea mikrobitoiminnan hidastuessa (Yuan et al. 2018). Kolmannessa vaiheessa eli niin sanotussa jäähtymisvaiheessa massa jäähdytetään ulkoilman lämpötilaan. Jäähtytys kestää noin vuorokauden, jonka jälkeen se voidaan kuljettaa polttoaineeksi polttolaitokselle. (Louhineva et al. 2001, 58.) Alla olevassa kuvassa (Kuva 1) on laitevalmistaja Bioforcetechin laite. Kuvassa näkyy miten jäte on reaktorissa ja miten ilma pääsee kulkemaan sen läpi.



Kuva 1. Bioforcetechin käyttämä reaktori biotermiseen kuivaukseen. (Bioforcetech 2021.)

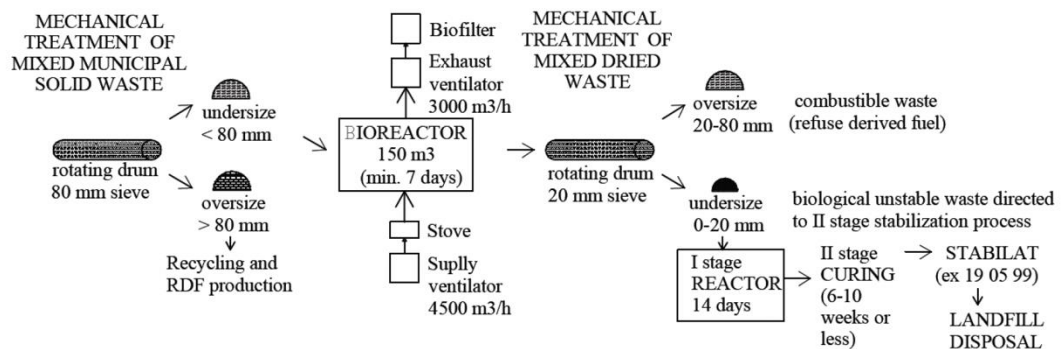
2.1 Vaikuttavat tekijä

Kuivaukseen voidaan vaikuttaa ilmavirran voimakkuuden ja jatkuvuuden säätämällä. Myös jätteen sekoittaminen kuivausjakson aikana vaikuttaa kuivauksen tulokseen. Jätteen määrällä saattaa myös olla vaikutuksia näiden tekijöiden tarpeellisuuteen ja siihen kuinka paljon niillä on loppujen lopuksi vaikutusta lopputulokseen. Luonnollisesti, jos jätettä on 5m korkuinen kasa, on ilmavirran vaikeampi päästä sen läpi kuin jos jätettä on 1m korkuinen kasa.

Ennen kuivausta tai muuta jätteenkäsittely- tai loppusijoitusmenetelmää jäte käy usein läpi mekaanisen erottelu. Mekaanisia jätteen erottelumenetelmiä on useita ja niitä usein yhdistellään keskenään, jotta saataisiin aikaan mahdollisimman tehokas kokonaisprosessi. Mekaanista erottelua voidaan käyttää ennen jätteen loppusijoittamista tai esikäsittelynä ennen muita käsittelyvaiheita, kuten biotermistä kuivausta. Erottelu ennen loppukäsittelyä tehdään, jotta esimerkiksi bioterminal kuivaus toimisi parhaalla mahdollisella tavalla. (Tukiainen 2015, 70.)

Biotermisen kuivauksen kohdalla on useiden tutkimusten perusteella mekaanisena erottelumenetelmänä rumpuseulan käyttö. Rumpuseula on pyörivä seula, johon jäte sijoitetaan. Seula jakaa jätteen sen koon perusteella siten, että sen läpi pääsee niin sanottu alite, eli jäte joka mahtuu seulan aukkojen läpi. Aukkojen koko voi vaihdella ja yhdessä seulassa voi olla alussa ja lopussa erikokoiset aukot. Niin sanottu ylite kulkeutuu koko rummun läpi. (Tukiainen 2015.)

Alla olevan kuvan esittämässä prosessissa (Kuva 2) ”rotating drum” eli rumpuseula on käytössä kahdessa eri kohdassa. Rumpuseulauksen tavoitteena on erottaa isommat jätekappaleet (yli 80 mm halkaisija) kuivaukseen menevästä massasta. Isommat kappaleet jatkavat matkaa kierrätykseen tai polttoon. Lopuksi jäte kuljetetaan vielä toisen kerran rumpuseulan läpi, jolloin alite on 0 – 20 mm. Tämä massa tässä tapauksessa päätyy kaatopaikalle, mutta sen osuus on paljon pienempi, kuin jos oltaisiin koko jätemassa sijoitettu suoraan kaatopaikalle. (Debicka et al. 2017.) Usein tällä alitteella on alhainen lämpöarvo, se voi olla esimerkiksi lasia, tuhkaa tai kiviä (Tambone et al. 2011). Ylite, eli 20-80 mm osuus jatkaa matkaa kohti polttoa (Debicka et al. 2017).



Kuva 2. Mekaanis-biologisen jätteenkäsittelyn vaiheet Puolassa sijaitsevalla laitoksella. (Debicka et al. 2017.)

2.1.1 Ilmavirta

On olemassa kolme erilaista ilmavirran syöttötyyppiä, jotka ovat tyypillisimmät biotermisessä kuivauksessa. Nämä kolme tapaa ovat positiivinen paine, negatiivinen paine ja niiden yhdistelmä. Pakotetun ilmavirran ja poistoilman imu on tärkeää biotermisessä

kuivauksessa. Suurin osa jätteessä olevasta vedestä poistuu haihtumisen kautta, mutta osa myös huuhtoutuu pois. (Shao et al. 2012.)

Ilmavirta vaikuttaa biotermiseen kuivaukseen kahdella tavalla, negatiivisesti ja positiivisesti. Positiivinen vaikutus on, että se poistaa haihtuvaa vettä, ja negatiivinen, että se vie lämpöä pois jätteestä. Nopea ilmavirta on tarpeellinen mahdollisimman nopean ja tehokkaan kuivaamisen aikaansaamiseksi. (Zhao et al. 2010.) Tämän lisäksi myös ilmavirran syöttöpaikat, ilmavirran syöttöaika ja ilman määrä vaikuttavat. (Yuan et al. 2018.)

Esimerkkejä eri ilmaustavoista tutki Yuan et al. (2018) artikkelissaan, jossa samaa sekajätettä kuivattiin erilaisissa ilmaus (ja sekoitus) olosuhteissa. Ilmaustavat vaihtelivat jatkuvan ja jaksottaisen, sekä voimakkuuden perusteella, mikä sitten vaikuttaa myös kokonaisilmamäärään, joka kulkee jätemassan läpi. (Yuan et al. 2018.)

2.1.2 Sekoittaminen

Kuivauksessa olevan jätteen sekoittaminen tai ”kääntäminen” (engl. turning) tietyn väliajoin on tutkimusten perusteella parantanut lopputulosta. Sekoittaminen mahdollistaa jätteessä tapahtuvien muutosten tapahtuvan samalla tavalla koko massassa. Se voi myös estää ylimääräisen lämmönkarkailun. (Leonard et al. 2008.)

Jätteen sekoittaminen kuivauksen aikana vaikuttaa jätteen lämpenemiseen ja lämmön poistumiseen (Shao et al. 2015). On myös eri kuivauksen aikoja, jolloin kääntämisestä on eniten hyötyä. Lämpötilan nousuvaiheessa kääntäminen on tutkimuksen mukaan vähiten hyötyä verrattuna sen tekemiseen muissa vaiheissa. (Zhao et al. 2010.) Parhaaksi on todettu lyhyempi aikaväli kääntämisten välissä. Lyhyempi aikaväli tässä tarkoittaa noin 2 – 3 päivän välein verrattuna esimerkiksi viikkoon. (Yuan et al. 2018)

2.2 Ero kompostointiin ja termiseen kuivaukseen

Biotermiseen kuivaus muistuttaa tietyiltä osin sekä kompostointia että termistä kuivausta ja onkin tavallaan näiden kahden menetelmän sekoitus. Seuraavaksi kerrotaan tarkemmin biotermiseen kuivauksen eroista verrattuna kompostointiin ja termiseen kuivaukseen.

2.2.1 Ero kompostointiin

Kompostointiin verrattuna bioterminen kuivaus on nopeampaa. Nopeus on kuivauksessa haluttu ominaisuus, sillä sitä kautta vähennetään hajoavan orgaanisen aineksen määrää. Reaktioon ei tuoda muussa muodossa energiaa kuin pakotettuna ilmavirtana. Kaikki lämpö syntyy mikrobitoiminnan myötä. Biotermisen kuivauksen aikana menetetään osa orgaanisesta aineksesta, minkä takia prosessi pyritään suorittamaan mahdollisimman nopeasti (7–15 päivää). (Ma et al. 2016) Prosessi on myös mahdollista lopettaa nopeasti.

Kompostoinnin onnistumiseksi tulee jätteessä olla tarpeeksi suuri kuiva-ainepitoisuus, joka yleensä aikaansaadaan lisäämällä jätteen joukkoon kuiva-ainetta, kuten sahanpurua tai haketta ynnä muuta sellaista. Kompostointiin kuluva aika on huomattavasti pidempi kuin biotermiseen kuivaukseen kuluva aika. Aika vaihtelee olosuhteista riippuen kolmen kuukauden ja jopa kahden vuoden välillä. (Gardeners 2021.)

Yksi suuri ero on myös se, että kompostoinnissa tavoitteena on saada täysin kompostoitunutta biomassaa, jossa taudinaiheuttajat ovat tuhoutuneet ja se voi täyttää turpeen tai mullan paikan puutarhanhoidossa. Biotermisessä kuivauksessa taas on tavoitteena vähentää jätteessä olevan veden määrää ja lisätä kuiva-ainepitoisuutta. (Melayib Bilgin et al. 2015.) Biotermisessä kuivauksessa ei siis tavoitella täysin stabiloitunutta kompostia, kuten tavallisessa kompostoinnissa.

Biotermisessä kuivauksessa optimilämpötila kuivausvaiheessa joidenkin tutkimusten mukaan on noin 45–55 °C, kun taas kompostoinnissa lämpötila voi nousta jopa 70 °C. (Debicka et al. 2017.)

2.2.2 Ero termiseen kuivaukseen

Termisellä kuivauksella tarkoitetaan menetelmää, jossa kosteaa jätettä kuivataan ulkopuolisen lämmönlähteen avulla. Tämän vuoksi terminen kuivaus vaatii enemmän energiaa. (He et al. 2013) Kuivaus tapahtuu haihduttamalla vettä jätteestä. (Lohiniva et al. 2001). Termisessä kuivauksessa tavoitteena on usein täysin stabiloitunut jäte, toisin kuin biotermisessä kuivauksessa. Jätteen kuiva-ainepitoisuuden ollessa noin 90 %, on se saavuttanut stabiilin tilan. Jätteen kosteuspuiteisuus saadaan siis termisessä kuivauksessa

vielä alhaisemmaksi kuin biotermisessä kuivauksessa. Jos tarkoituksena on kuitenkin polttaa jäte, eikä tavoitella stabiloitunutta jätettä, voidaan kuivaus keskeyttää, kun on saavutettu haluttu kuiva-ainepitoisuus. Tämä pitoisuus voi olla 35 – 60 %. Yksi iso ero biotermisen ja termisen kuivauksen lopputuotteessa on se, että termisesti kuivattua jätettä voi varastoida. Jätteen kuiva-ainepitoisuus pitää olla yli 85 %, jos sitä aiotaan varastoida. Kuten biotermisessäkin kuivauksessa, myös termisessä kuivauksessa syntyy kaasua, joka aiheuttaa hajuhaittoja. (Lohiniva et al. 2001, 61.)

3 KUIVAUKSEEN SOVELTUVAT MATERIAALIT

Biotermiseen kuivaukseen soveltuvia materiaaleja ovat kosteat jätteet, kuten biojäte tai paljon biojätettä sisältävä sekajäte. Näiden lisäksi metsäteollisuuden sekä yhdyskuntalietteitä voidaan kuivata biotermisesti, jotta jatkokäsittely helpottuu. On olemassa myös muita materiaaleja, mutta tässä kandidaatintyössä keskitytään näihin neljään mainittuun.

Biotermiseen kuivaukseen soveltuu jäte, jonka kosteuspitoisuus on noin 50-70 % (A.P Tom et al. 2015). Jos jätteen kosteuspitoisuus on alle 40 %, aiheuttaa se hitaamman mikro-organisen aktiivisuuden ja häiritsee aineenvaihduntaprosessia. Tämä tarkoittaa, että liian alhainen kosteuspitoisuus rajoittaa biologista toimintaa. Kun taas kosteuspitoisuus on liian suuri, ei kompostoituvasta jätteestä syntyvä lämpö ole tarpeeksi veden haihduttamiseen. (Jalil et al. 2015.)

3.1 Biojäte

Biojäte on kotitalouksissa syntyvää jätettä, joka koostuu pääosin ruuantähteistä. Biojätteeseen voi ruuantähteiden lisäksi lajitella muun muassa hedelmien kuoret, kahvinporot ja teepussit ja kalanperkuujätteet. Jos jäte sisältää paljon nestettä, voidaan se ensin imeyttää vaikka sanomalehteen ja sitten lajitella biojätteenä. Biojätteiden sekaan voi samalla tavalla lisätä jopa rasvoja ja öljyjä. (Etappi 2021.)

Esimerkkinä biojätteen koostumuksesta Kiinan Pekingissä, jossa 62,4 % oli syömättömiä vihanneksia, 10,3 % kuoria, 7,2 % syömätöntä ruokaa, 8,4 % muita ruoan tähteitä, 6,2 % kananmunankuoria ja luita ja 5,5 % pähkinöitä ja niiden kuoria. Kiinassa biojätteen kuiva-ainepitoisuuden parantamiseksi voidaan käyttää maissintähkiä, riisin kuoria, sahanpurua ja käytettyä sienisubstraattia, jotka ovat tyypillisiä maatalousjätteitä Kiinassa. (Yuan J. et al. 2019). Biojätteen kuivaus olisi hyödyllistä silloin, kun sen muunlainen jatkokäsittely ei ole mahdollista. Jos esimerkiksi jäte sisältää haitallisia aineita joita ei haluta kompostointiprosessiin mukaan. Voi myös olla, että kompostointi tai mädätys ei ole mahdollista puuttuvien laitosten vuoksi. Tällöin jäte poltetaan tai sijoitetaan kaatopaikalle, jota ennen bioterminen kuivaus on hyödyllistä jätteen lämpöarvon paranemisen vuoksi sekä

siksi, ettei se kaatopaikalla ollessaan ala mätänemään ja tuottamaan kasvihuonekaasupäästöjä, kuten metaania.

Suomessa erilliskerätty biojäte usein kompostoidaan tai mädätetään, jolloin siinä olevat ravinteet saadaan kiertoon. Mädätyksessä syntyy sivutuotteena biokaasuja, joita voidaan käyttää energian- ja lämmöntuotannossa. Mädätys on siis yksi biojätteen käsittelymenetelmä. Se on anaerobinen eli hapettomissa oloissa tapahtuva prosessi, jossa esimerkiksi biojäte tai muu orgaaninen aines hajoaa. (Latvala 2009.)

Biopolttoaineiden valmistus on yleistynyt viime vuosien aikana. Biojätteen fermentointi tuottaa biokaasua sekä sen kautta saadaan tuotettua myös bioetanolia. (Ilmasto-opas 2021.) Fermentointi tarkoittaa prosessia, jossa hiivalla tai bakteerilla hajotetaan orgaanista materiaalia (Lumme 2014), tässä tapauksessa siis biojätettä. Bioetanolia on jo Suomessa polttoainekäytössä muun muassa polttoaineyhtiö St1 on lisännyt valikoimaansa bioetanolista valmistetun polttoaineen tavallisten polttoaineiden lisäksi. (Niskanen ja Karjalainen 2014.) Biokaasua voi myös käyttää polttoaineena. Suomessa sitä tuottaa ja myy Gasum. Gasum käyttää biokaasun raaka-aineena biojätteen lisäksi puutarhajätettä ja esimerkiksi oluen panemisessa syntyvää mäskiä. Biokaasun tuotannosta sivuaineena syntyy ravinnejäännös ja se hyödynnetään suomalaisilla pelloilla lannoitteena. (Gasum 2021.)

Kompostointi on siitä hyvä tapa päästä eroon biojätteestä, että sitä voi tehdä pienen mittakaavan olosuhteissa talojen pihalla tai isommassa kokoluokassa. Kotitaloudet voivat hyödyntää itse kompostoinnilla saatavan mullan. Multa on ravinnepitoista ja sen kanssa tulee sekoittaa tavallista puutarhamultaa.

3.2 Sekajäte

Sekajätettä syntyy päivittäin suuria määriä. Vaikka sekajäte nimitys vaikuttaa siltä, että jätteen sekaan saa laittaa mitä tahansa, näin ei kuitenkaan ole. Ongelmajätteet, kuten maalit ja paristot on kerättävä erikseen. Kuten johdannossa mainittiin, on sekajätteen seassa oleva biojäte ongelmallista jätteen polton kannalta, joten sen erilliskeräystä tulisi suosia.

Kehittyvissä maissa sekä kehittyvien talouksien maissa jätteen tuoton määrä kasvaa vuosittain. Mahdolliset olemassa olevat jätteenkäsittelyjärjestelmät eivät pysy kasvavan jätemäärän perässä. Jätteen määrä kasvaa ihmisten määrän ja taloudellisen kasvun myötä, myös nopea kaupungistuminen vaikeuttaa asiaa entisestään. (Liikanen et al. 2018.)

Sekajätteen seasta voidaan erotella biojäte ja se voitaisiin käsitellä esimerkiksi kompostoimalla. Vain harvat toimijat esimerkiksi Malesiassa ovat valmiita kierrättämään orgaanisen jätteen, jonka takia se päättyy usein kaatopaikoille. (Jalil et al. 2015.)

Suomessa sekajäte poltetaan energiatuotannossa. Ja sekajätteen kanssa ei onneksi Suomessa olekaan ongelmia. Maailmalla suurin osa sekajätteestä päättyy kaatopaikoille. Varsinkin kehittyvissä maissa on sekajätteen käsittelyn kanssa ongelmia, koska sen suora polttaminen ei ole kannattavaa sen huonon lämpöarvon vuoksi.

Myös muualla maailmassa, etenkin Euroopassa yleistyy sekajätteen poltto energiantuotannossa (Psaltis et al. 2018), mikä on erittäin hyvä, sillä tämän tavan myötä ratkaistaan kaksi olemassa olevaa ongelmaa: jätteen joutuminen kaatopaikoille sekä vähennetään tavanomaisten fossiilisten polttoaineiden käyttöä polttolaitoksissa. (Tambone et al. 2011.)

Suurin ongelma jätteen poltossa maailmalla on jätteen suuri kosteuspiitoisuus. Sen takia esimerkiksi Malesiassa monet polttolaitokset toimivat muilla polttoaineilla ja jätteet, jotka voitaisiin polttaa, joutuvat kaatopaikoille. Jätteen ja sen polton tulee täyttää tietyt määräykset esimerkiksi siitä syntyvien päästöjen suhteen. (Jalil et al. 2015.) Jos kostean jätteen polttaa ilman biotermistä tai muunlaista kuivausta, syntyy siitä suotovesiä (Tambone et al. 2011).

Kuten aikaisemmin mainittu, kaatopaikka on kehittyvissä maissa yleinen jätteen hävittämismuoto. Vaikka se kuulostaakin vain siltä, että roskat haudataan maahan, on sitä hiukan mietitty. Esimerkiksi Malesiassa on käytössä niin sanottu ”sanitary landfill”, joka tarkoittaa, että kaatopaikan alusta on valmisteltu niin, ettei pohjavesi pääse pilaantumaan jätteistä valuvien ja niiden läpi suodattuvien nesteiden takia. (Jalil et al. 2015.)

3.3 Lietteet

Esimerkiksi metsäteollisuuden sivutuotteena syntyy paljon lietteitä, joita on mahdollista kuivata biotermisesti, vaikka se ei kovin yleistä olekaan (Ojanen 2001.). Myös yhdyskuntajätelietteitä voi kuivata biotermisesti ja Euroopassa sitä on jo jonkin verran otettu käyttöön muun muassa Alankomaissa (Winkler et al. 2013). Lietteiden kuivaaminen biotermisesti etenkin metsäteollisuuden lietteiden kohdalla on kannattavaa, koska sen käyttö vähentää merkittävästi fossiilisten polttoaineiden käytön tarvetta, myös sähkön käytön tarve vähenee. Kun liete on kuivattu, voidaan sen poltossa saatua energiaa ja/tai höyryä hyödyntää teollisuuden muissa toiminnoissa. Liete on polttoaineena tehtaille halpaa ja sen saanti on melko tasaista, jolloin voi luottaa siitä saatavan energiavirran olevan tasaista. (Navaee-Ardeh et al. 2006)

3.3.1 Metsäteollisuuden lietteet

Tutkimusten mukaan biotermisen kuivaus sopisi hyvin paperi- ja selluteollisuuden lietteiden kuivaamiseen polttoa varten (Tchoryk et al. 2021) (Navaee-Ardeh et al. 2006). Etenkin (Navaee-Ardeh et al. 2006) suorittaman tutkimuksen mukaan paperi- ja selluprosessien lietteiden kuivaaminen biotermisesti on erittäin kannattavaa sekä taloudellisesti että ajankäytön kannalta. Tutkimus on suoritettu Kanadassa. Koska monissa tehtaissa on puukuitujen hyötykäyttö ja talteenotto parantunut, sisältää liete paljon biologista ainesta, jolloin sitä on vaikea kuivattaa. Lietteiden kohdalla niin sanottu kriittinen kuiva-ainepitoisuus on 42 %. Kun tämä kuiva-ainepitoisuus on saavutettu, voidaan liete polttaa tehokkaasti ja taloudellisesti höyryn tuottamista varten. (Navaee-Ardeh et al. 2006.) Kuivausta varten optimaalinen kosteuspitoisuus lietteessä on noin 45-65 % kostean jätteen painosta (Nakasiki et al. 1994). Kuivausprosessi olisi hyvä suorittaa tehdasalueella, sillä jos liete ensin kuljetetaan tehtaalta reaktorille, ehtii se jäähtyä kuljetuksen aikana. Koska tavoitteena on saada liete lämpenemään kuivauksen aikana, on hyvä saada hyödynnettyä lietteessä valmiiksi oleva lämpö. (Tchoryk et al. 2021.)

Vedenerotuksen jälkeen liete tyypillisesti poltetaan muiden ”ylijäämien”, kuten kuoren, hakkeen ja purun seassa. Osa lietteistä saatetaan joutua viemään jopa kaatopaikalle, mutta sitä on rajoitettu jätelailla. Lietteiden sijoittaminen kaatopaikoille on kiellettyä sen sisältämien orgaanisten ainesten vuoksi. Orgaanisen jätteen kaatopaikkakielto kieltää lietteiden sijoittamisen kaatopaikalle jos lietteessä on vähintään 10 % orgaanista ainesta.

(Finlex 2013). Kaatopaikkasijoitus on korvattu aumakompostoinnilla. Aumakompostoinnissa kuitenkin huonoina puolina ovat haju- ja valumavesiongelmien. Jotta lietteen energiasisältö saataisiin talteen, voidaan lietteitä myös mädättää. Mädätysprosessissa syntyy humusta ja biokaasua. Alkuperäisen lietteen painosta syntyvän humuksen paino on noin 30-40 %. Biokaasua taas kertyy 60-80 m³ jokaista käsiteltyä lietetonnin kohden. Olosuhteista riippuen biokaasua voidaan käyttää sähkön tai sähkön ja lämmön tuotantoon. (Ojanen 2001.) Lietteiden sijoittaminen kaatopaikoille maksaa ja lietteiden kompostointia tai maahan levittämistä varten tulee tehdä monimutkaisia esivalmisteluja. (Navae-Ardeh et al. 2006.)

Käytännöllinen vaihtoehto lietteen käsittelylle on poltto, sillä polttolaitos sijaitsee yleensä lähellä lietteenkäsittelylaitosta sekä poltosta syntyvä energia on mahdollista hyödyntää tuotantoprosesseissa. (Ojanen 2001.)

3.3.2 Yhdyskuntalietteet

Myös yhdyskuntalietteet ovat potentiaalisia jätteitä kuivattavaksi niin Suomessa kuin muuallakin maailmassa. Yhdyskuntalietteitä syntyy jätevesien käsittelyn sivutuotteena ja niitä syntyy kokoajan kaikkialla, joten käsittelyn tulee olla mahdollisimman tehokasta sekä energian-, että ajankäytön suhteen. Euroopan Unionin maissa tuotettiin vuonna 2015 noin 11,5 miljoonaa tonnia tätä lietettä. (Durdević et al. 2019.) Myös kustannukset pyritään pitämään alhaalla. Tämän vuoksi bioterminen kuivaus soveltuisi erittäin hyvin yhdyskuntalietteiden käsittelyyn. Siinä ulkopuolisena energiana tarvitaan ainoastaan ilmapvirran puhaltamiseen kuluva energia. Koska tavoitteena ei ole täysin stabiloitunut massa, säilyy sen energiapitoisuus korkeana ja näin ollen voidaan sitä polttamalla saada jopa energiaa hyötykäyttöön. Kuivattu jäte voi lämmöntuotannossa korvata muun muassa hiilen käytön. Tämän myötä myös loppusijoituspaikka muuttuu merkittäväksi, kun lietettä ei enää vietäisi kaatopaikoille. (Winkler et al. 2013.)

Yhdyskuntalietteiden käsittelyssä on Euroopassa käytetty kompostointia, jonka tarkoituksena on ollut päästä eroon mahdollisimman suuresta osasta biomassaa. Prosessin aikana on lietteeseen lisätty vettä, jotta kompostointi jatkuu mahdollisimman pitkään. Tämän käsittelytavan huono puoli on siihen kuluva aika, joka voi olla jopa 50 päivää, joka on

hankala suurien jätemäärien kanssa. Kompostoinnissa myös jätteen energia-arvo heikkenee huomattavasti, mikä taas vähentää sen kannattavuutta käyttöä poltossa. (Cai et al. 2013.) Polttoa varten kuiva-ainepitoisuuden tulisi olla noin 45 % tai enemmän, jotta poltosta saataisiin energiaa. Tähän kuiva-ainepitoisuuteen harvoin päästään kompostoinnilla. (Kudra et al. 2002.)

Jätevesilietteitä on mahdollista käyttää myös lannoitevalmisteena maataloudessa, mutta lannoitteen tulee olla EU:n tiukkojen määräysten vuoksi. Tämän vuoksi lietteiden poltto on ainoa vaihtoehto niiden hävittämiselle. Jos lietteet vastaavat niille asetettuja laatuvaatimuksia, tulee vielä ottaa huomioon erilaiset määräykset siitä, millaisille viljelysmaille lietteitä saa levittää. Esimerkiksi jätevesilietteitä saa käyttää ainoastaan sellaisten peltojen lannoittamiseen, joilla ei kasvateta ravinnoksi tuoreena käytettäviä kasveja tai käytetä eläinten rehuksi. (Ruokavirasto 2021).

Viherrakentamiseen on kuitenkin sallittua käyttää kompostoitua ja mädätettyä jätevesilietettä. Viherrakentamisessa käytetyn jätteen haittapuolena on sitä kautta ympäristöön joutuvat mikroroskat ja tutkimustyö niiden joutumisesta maaperään on kesken. Tätä kautta haitta-aineita voi päästä myös pohjaveteen. Yleisesti jätevesilietteiden käyttö viherrakentamisessa on sallittua, koska sitä ei mielletä ravinteiden kierrättämiseksi, kuten taas lannoitteena käyttö. (Berninger 2018)

Suomessa lannoitevalmistelaki määrää millaiset ominaisuudet lietteellä tulee olla, jotta sitä voidaan käyttää maanparannusaineena. Se ei saa sisältää merkittäviä määriä ympäristölle, ihmisille, eläimille tai kasveille haitallisia aineita, tuotteita tai eliöitä. (Lannoitevalmistelaki 2006). Kuivattua lietettä voidaan käyttää maanparannusaineena esimerkiksi uusilla pelloilla. Suomessa käsitellyt jätevesilietteet, joista fosfori vapautuu pitkän ajan kuluessa sopii maanparannusaineena pitkävaikutteiseksi lannoitteeksi. Kun lietteitä käytetään maanparannuksessa, saadaan niissä olevat ravinteet, kuten fosfori ja hiili takaisin kierto. (Vesilaitosyhdistys 2019). Kuten viherrakentamisessa, myös maanparannuksessa on lietteiden käytöllä riskejä esimerkiksi mikroroskien ja lääkeaineiden osalta. Tämän vuoksi

jotkut elintarviketuottajat eivät halua ottaa tuotantoonsa raaka-aineita, joiden viljelyyn on käytetty yhdyskuntalietteistä valmistettuja maanparannusaineita.

Kompostoinnin lisäksi käsittelyvaihtoehtona on terminen kuivaus. Koska siinä vaaditaan lämmönlähteeksi ulkopuolista energiaa, nousevat kustannuksen nopeasti turhan korkeiksi. (Tambone et al. 2011.)

4 OLEMASSA OLEVAT TEKNOLOGIAT

Tähän mennessä on kokeiltu monia biotermiseen kuivaukseen tarkoitettuja reaktoreita laboratoriuokossa, joilla on voitu määrittää kuivauksen kannattavuus erilaisissa tilanteissa. Myös täyden kokoluokan kuivausreaktoreita on käytetty ja muutamia esimerkkejä näistä.

4.1 Sekajäte

Puolan Krakovassa on käytössä mekaanis-biologinen jätteen käsittelylaitos, jossa jätteestä erotellaan lasi, metalli, muovi ja paperi sekä manuaalisesti että mekaanisesti. Jäljelle jäänyt jäte lajitellaan pyörivässä rummussa. Rummussa on halkaisijaltaan 80 mm kokoisia reikiä, joista pääsee osa jätteestä läpi. Läpi päässyt jäte kuljetetaan biologiseen käsittelyyn ja biotermiseen kuivaukseen ja loput poltton sementtilaitokseen. (Dziedzic et al. 2015.)

Myös Pohjois-Italiassa on tehty tutkimus, jossa biotermisesti kuivattiin sekajätettä viiden kuukauden ajan. Tämän tutkimuksen perusteella on suoritettu alempana näkyvät laskut. Kyseinen laitos käsittelee vuosittain noin 50 000 tonnia yhdyskuntajätettä eli tässä tapauksessa sekajätettä. Pohjois-Italiassa erilliskerätään ruoantähteet, puutarhajätteet, paperi ja lasi. Vaikka näitä jätelajeja erilliskerätään, sisältää sekajäte niitä silti. Jätteen kosteuspitoisuus ei erilliskeräyksen vuoksi ole niin suuri, kuin esimerkiksi Kiinassa, mutta tutkimuksessa todettiin kuivauksesta silti olevan hyötyä. Jätettä kuivattiin 14 päivän ajan. Jätteestä otettiin näytteitä ennen kuivausta ja sen jälkeen, jonka perusteella on saatu selville esimerkiksi jätteen lämpöarvon muutos. Laitoksessa on eri kuivausalueita, joihin jätteet sijoitetaan. Ennen sijoitusta, jauhetaan jäte hieman pienempiin paloihin. Jätteet muodostavat noin 5,5 metriä korkeita kasoja ja jätettä ilmataan pohjan kautta. Tavoitteena tutkimuksessa oli pitää poistuvan ilman lämpötila noin 50 °C:ssa mahdollisimman kauan. Kuivauksen jälkeen kuivattu jäte paalataan ja kuljetetaan kaatopaikalle. Kuivaus paransi kaatopaikalla sijoitettavan jätteen laatua, esimerkiksi mahdolliset hajuhaitat vähenevät. Kuivauksen myötä jätteen kuiva-ainepitoisuus kasvoi 67,3 %:sta 82,2 %:iin. Myös lämpöarvo parani kuivauksen myötä, alussa se oli 18,2 MJ/kg ja lopussa 21,1 MJ/kg. Tässä on hyvä huomioida, että lämpöarvo on tehollinen lämpöarvo kuiva-ainelle. (Tambone et al. 2011.) Tämän kandidaatintyön esimerkkilaskentakappaleessa on laskettu tämän prosessin massatase, jossa saadaan selville kuivauksen aikana poistuvan veden määrä. Tämän lisäksi lasketaan veden poistamiseen tarvittavan lämpöenergian määrän.

Kiinassa on tehty tutkimus sekajätteen kuivaamisesta biotermisesti. Tutkimuksessa sekajätteen sekaan on lisätty suhteessa 1/9. Ennen sekoittamista maissintähkät on paloitetu noin 1-5 cm kokoisiksi paloiksi. Sekajätteen ja maissintähkien sekoitusta kuivattiin laboratoriokoon reaktorissa ja tavoitteena tutkimuksessa oli tutkia eri ilmavirtausmäärien ja jätteen sekoitus ajankohtien vaikutusta kuivaustulokseen. Mielenkiintoista on huomata erittäin suuri vaihtelu kuivien jätteiden lämpöarvoissa eri kuivaustapojen välillä. Tutkimuksessa jätettä kuivattiin 10 eri erässä, joissa jokaisessa kuivausolosuhteet vaihtelivat jollakin tavalla. Ensimmäisessä kahdessa erässä ilmavirtaus oli pätkittäistä, esimerkiksi 10 minuuttia päällä, 20 minuuttia pois. Muissa kahdeksassa ilmavirta oli jatkuvaa. Ilmavirran määrä vaihteli 0,2-0,6 L/kg min. Sekoitusvälit seitsemällä ensimmäisellä erällä olivat kolme päivää, yhdellä kaksi päivää, yhdellä kuusi ja yhtä erää ei sekoitettu ollenkaan. Jätteen läpi kulkeva kokonaisilmamäärä vaihteli noin 100-200 m³ välillä. Kuivauksen aikana jäte-erien välillä oli hieman eroavaisuuksia lämpötilojen välillä. Keskimääräiset lämpötilat vaihtelivat 65 ja 76 celsiusasteen välillä. Alhaisin kosteuspitoisuus ja paras lämpöarvo saavutettiin erällä, jossa ilmavirta oli jatkuvaa ja jota sekoitettiin kolmen päivän välein. Huonoin tulos saavutettiin jatkuvalla ilmavirralla ja ilman sekoituksia. Saavutetut kosteuspitoisuudet 33,25 % ja 52,89%, ja lämpöarvot 9,4 MJ/kg ja 3,2 MJ/kg. (Yuan et al. 2018.) Tästä voidaan päätellä, että jätteen sekoittaminen kuivauksen aikana on tärkeää parhaan lopputuloksen aikaansaamiseksi.

4.2 Biojäte

Kiinassa on tutkittu biojätteen kuivaamista biotermisesti, sillä sen osuus sekajätteessä on niin suuri, että se hankaloittaa sen käsittelyä. Biojäte eroteltiin manuaalisesti sekajätteestä, jonka jälkeen sen sekaan lisättiin maatalouden jätteitä kuiva-ainepitoisuutta parantamaan. Maatalouden jätteen (maissintähkät, riisin kuoret, sieni substraatti ja sahanpuru) pilkottiin 1-5cm kokoisiksi paloiksi. Tässä käytössä oli laboratoriomittakaavan 60 litran reaktorit, jotka on tehty kahdesta kerroksesta ruostumattomasta terästä lämpöhäviöiden minimoimiseksi. Alaosaan asetettiin samasta teräksestä valmistettu ritilä, joka toimi alustana biojätteelle ja jonka läpi ilmavirta pääsisi kulkemaan. (Yuan 2019.)

Esimerkiksi Kiinassa biotermistä kuivausta käytetään biojätteen käsittelyyn. Jossain tapauksissa biotermistä kuivausta on käytetty/kokeiltu kahden eri jätteen sekoittamiseen ja yhtäaikaista kuivaamiseen. Sekoitettujen jätteiden olivat kuivattu liete sekä ruokajäte. (Ma et al. 2016.)

4.3 Lietteet

Alankomaissa, Zutphenissa, on otettu käyttöön yhdyskuntalietteiden käsittelyyn bioterminen kuivauslaitos. Laitos on täyden kokoluokan laitos, jossa voidaan käsitellä noin 150 kilotonnia lietettä vuodessa. Jäte on suurimmaksi osaksi yhdyskuntalietettä, seassa on myös pieni määrä teollisuuden lietteitä. Kiinteää ainesta on noin 25 % ja orgaanista ainesta noin 65 %. Lietettä tuodaan tähän kyseiseen kuivauslaitokseen eri puolilta Alankomaita. Tämä kyseinen kuivausprosessi toimii niin, että ensin ennen kuivausta, sekoitetaan liete jo esikuivatun lietteen kanssa. Tämän tavoitteena on sekoittaa keskenään mikrobit, jotka ovat hyvin sopeutuneet reaktorissa vallitseviin olosuhteisiin, kuten lämpötilaan, joka on noin 65-75 °C. Sekoituksen jälkeen lietteen kuiva-ainepitoisuus on noin 45 %. Liete kuljetetaan 1900 m³:n kuivatustunneleihin. Ennen prosessin alkua lisätään lietteen sekaan vielä puulastuja 5,6 % kosteasta massasta. Puulastut auttavat ilmavirran kulkua lietteen läpi. Ilma pääsee kulkemaan betonilattiaan upotettujen ilmatuskulujen läpi. Prosessin läpi kulkevasta ilmasta otetaan talteen lämpö ja typpi, sekä poistetaan mahdolliset hajuhaitat. Kuivaus tapahtuu kahdessa osassa, ensimmäinen osa kestää 10 päivää ja toinen 14 päivää. Ensimmäisen osan jälkeen jäte erotellaan koon perusteella ja raekooltaan isompi jäte sekoitetaan uuden kuivaamattoman jätteen kanssa ja hienompi jäteainekokoinen jatkaa kohti toista kuivausosaa. Jälleen toisen kuivausosan jälkeen kuivattu massa erotellaan rumpuseulan avulla, jonka jälkeen hienompi aine jatkaa kohti polttolaitoksia, joissa jäte poltetaan energiantuotantoon. Isompi jäteainekokoinen kierrätetään takaisin prosessin alkuun eli sekoitetaan kuivaamattoman jätteen sekaan. Kuivauksella jätteen kuiva-ainepitoisuus saadaan nousemaan 25 %:sta 55 %:iin. (Winkler et al. 2013.)

Toinen vaihtoehto jätteen käytölle kuivauksen jälkeen olisi maataloudessa, mutta sitä varten jätteen ominaisuuksien tulee vastata EU:n vaatimuksia tautia aiheuttavien patogeenien ja raskasmetallien osalta. Tämän työn esimerkkilaskentaosiossa on tutkittu myös tämän

prosessin kuivumista lämpöarvon ja kosteusprosenttien osalta ennen kuivausta ja sen jälkeen.

4.4 Laitevalmistajia

Bioforcetech on yritys, jolla on konttorit sekä Yhdysvalloissa että Italiassa. Yrityksen valmistamat biokuivaimet kuivaavat jätettä, joka sisältää paljon orgaanista ainesta. Bioforcetechin mukaan heidän kuivausreaktorinsa kuluttaa 50 % vähemmän energiaa verrattuna esimerkiksi kaasulla lämmitettäviin kuivaimiin. (Bioforcetech 2021.)

Heidän kuivaimensa ovat tietyn kokoisia, mutta niitä voi yhdistää toisiinsa, jolloin kuivauskapasiteetti kasvaa. Yksi biokuivausreaktori voi käsitellä noin 1000 tonnia jätettä vuodessa. Sopivat jätteet ovat yhdyskuntajäteliätteet, teollisuuslietteet ja biojäte. Jätteen alhaisin kuiva-ainepitoisuus ennen kuivausta voi olla 17%, ja reaktorin sisäinen lämpötila voi enimmillään nousta 75 °C:seen. Yksi reaktori painaa 6000 kg ja sen arvioitu käyttöaika vuodessa on noin 8400 tuntia. Reaktoreiden kerrotaan olevan pitkäikäisiä ja kestävän käytössä noin 30 vuotta. Energiaa reaktori käyttää sähköä alle 35 kWh/t käsiteltyä jätettä. (Bioforcetech 2021.) Alla olevassa kuvassa (Kuva 3) on kuva reaktorista asennettuna.



Kuva 3. Bioforcetechin biokuivausreaktori. (Bioforcetech 2021.)

Lietteiden kuivausta Alankomaissa tekee yritys nimeltä GMB. Tämä yritys kuivaa yhdyskuntalietteitä joihin ensin sekoitetaan kompostimateriaalia sekä haketta, jonka ansiosta jäte on mahdollista kasata viiden metrin korkuisiin kasoihin kuivaustunneileihin. Jätettä kuivataan 10 päivän ajan, jonka jälkeen se seulotaan. Tämän prosessin aikana jätteen rakenne muuttuu rakeiseksi. Rakeista ”biogranulaattia” voidaan käyttää polttoaineena esimerkiksi voimalaitoksissa. Joissain maissa biogranulaatteja voidaan käyttää myös lannoitteena, mutta se ei ole kaikkialla laillista. (GMB 2021)

5 ESIMERKKILASKENTA BIOTERMISELLE KUIVAUKSELLE

Kuivauksen tehoa lasketaan hyödyntämällä olemassa olevia tietoja jätteen koostumuksesta valitulla esimerkkialueella, joka tässä tapauksessa on Milano Italiassa. Massa- ja energiataseiden avulla voidaan kuvata biotermisen kuivauksen vaikutuksia. Siellä tehdystä tutkimuksesta löytyi hyvin laskentaan tarvittavat tiedot ja lukuarvot. Jätteen kosteuspitoisuus Milanossa ei ole niin suuri kuin joissain kehittyvässä maissa. Tässä kuitenkin voidaan Milanon lukujen avulla havainnollistaa laskentaa esimerkin omaisesti. Samaa laskentatapaa voidaan hyödyntää myös muille pakoille, kunhan jätteestä on mitattu tietyt arvot ennen kuivausta ja sen jälkeen.

Milanossa toimiva biotermisen kuivauksen laitos on täyden kokoluokan laitos, jossa jätettä kuivattiin tutkimusta varten viiden kuukauden ajan. Kuivattava jäte oli sekajätettä, jonka koostumus on esitetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 1). Italiassa jätettä myös erilliskerätään ja nämä erilliskerätyn jätteiden määrät näkyvät myös taulukosta.

Esimerkkienomaisesti on mukaan lisätty taulukkoja (Taulukot 1, 2, 3 ja 4), joista on nähtävissä myös muiden tutkimusten vastaavia arvoja niin sekajätteelle kuin muillekin jätelajeille. Esimerkkien kokoluokat vaihtelevat.

Taulukko 1. Milanon jätteen koostumus taulukoituna

| Jätelaji | Kokonaisosuus yhdyskuntajätteestä, | josta erilliskerättyä | ja josta sekajätteessä |
|-----------------|---|------------------------------|-----------------------------------|
| Biojäte | 25,9 % | 33,4 % | 17,2 % |
| Puutarhajäte | 3 % | 73,2 % | 0,8 % |
| Muovi | 17,9 % | 22,3 % | 13,9 % |
| Paperi | 26,4 % | 46,9 % | 14,0 % |
| Puu | 1,5 % | 81,8 % | 0,3 % |
| Tekstiilit | 4,4 % | 9,4 % | 4,0 % |
| Lasi | 5,5 % | 63,9% | 2,0 % |
| Metallit | 3,4 % | 37,8 % | 1,4 % |
| Muu | 12,0 % | 7% | 11,2 % |
| Yhteensä | 100 % | 45,3% | 54,7 % |

5.1 Kosteuspitoisuus

Jätteen kosteuspitoisuus saapumistilassa voidaan laskea punnitsemalla ”raaka” jäte ja kuivauksen jälkeen kuivattu jäte. Huomioon tulee ottaa myös kuivauksessa käytettävä astia ja sen paino. Yleensä tulos ilmoitetaan 0,1 %-yksikön tarkkuudella. (Alakangas et al. 2016)

Koska tässä työssä käytettiin lähteenä vain valmiita tutkimuksia, eikä käytössä ollut laboratoriota, jossa olisi voinut jätettä punnita ja kuivata itse, käytetään kosteuspitoisuuden arvoina muista tutkimuksista saatuja arvoja. Alla on taulukoituna (taulukko 2) eri artikkeleista löytyneitä jätteen kosteuspitoisuuksia. Esimerkkinä siihen on laitettu myös kosteuspitoisuus Suomesta. Muutama kosteuspitoisuuden arvo on myös kuivauksen

jälkeisestä pitoisuudesta. Taulukon 2 arvoista laskennassa on jatkossa käytetty Tambone et al. (2011) arvoja.

Taulukko 2. Jätteen kosteuspitoisuuksia eri paikoissa taulukoituna.

| Paikka (lähde) | Kosteuspitoisuus (kostean jätteen painosta) ennen kuivausta | Kosteuspitoisuus kuivauksen jälkeen |
|------------------------------|--|--|
| Suomi (Huttunen 2019) | noin. 30% | |
| Italia (Tambone et al. 2011) | 33 % | 18 % |
| Kiina (Yuan et al. 2018) | 71,5 % | 41 % |
| Malesia (Jalil et al. 2015) | 67 % | 34 % |
| Puola (Dziedzic et al. 2015) | 47 % | 20% |

5.2 Lämpöarvo

Kuivauksen tehoa voidaan laskea tarkastelemalla jätteen kosteutta sekä lämpöarvoa ennen biotermistä kuivausta ja sen jälkeen. Lämpöarvoja on erilaisia, joista kalorimetrinen lämpöarvo on niin sanotusti ylempi lämpöarvo, joka kertoo lämpöenergian määrän poltettavan aineen massayksikköä kohti, kun aine palaa täydellisesti ja palamistuotteet jäähtyvät 25 °C:een lämpötilaan. Lämpöarvo, jota Suomessa useimmiten käytetään on tehollinen lämpöarvo. (Alakangas et al. 2016) Koska tässä työssä lähteenä käytettiin Italiassa tehtyä tutkimusta, on tässä käytetty artikkelissa esiintyvää lämpöarvoa LVH eli tehollista lämpöarvoa (eng. lower heating value) laskennassa. Lähteenä käytetyssä artikkelissa oli valmiiksi selvitetty tämä lämpöarvo sekä kostealle että kuivatulle jätteelle. Lämpöarvot taulukoituna ennen kuivausta ja sen jälkeen (taulukko 3). Laskennassa on käytetty Italiassa mitattuja arvoja.

Taulukko 3. Lämpöarvoja ennen kuivausta ja sen jälkeen taulukoituna.

| Paikka/ LVH | Italia (Tambone et al. 2011) sekajäte | Kiina (Yuan et al. 2018) sekajäte+maissintähkät | Malesia (Jalil et al. 2015) sekajäte | Puola (Dziedzic et al. 2015) sekajäte |
|------------------------|---|---|--|---|
| ennen [MJ/kg] | 18,1 | 2,4 | 5,0 | 6,0 |
| jälkeen [MJ/kg] | 21,1 | 7,1 | 14,0 | 8,6 |

Kuten yllä olevasta taulukosta voi nähdä, paranee jätteen lämpöarvo kuivauksen myötä. Huomioitavaa on, että Italiassa mitattujen lämpöarvojen suuruus on huomattavasti eri verrattuna muiden maiden tuloksiin. Tämä johtuu siitä, että arvot on määritetty kuiva-aineelle (LVH_{dry}) ja muut arvot esitetään kosteudessa.

5.3 Tulokset

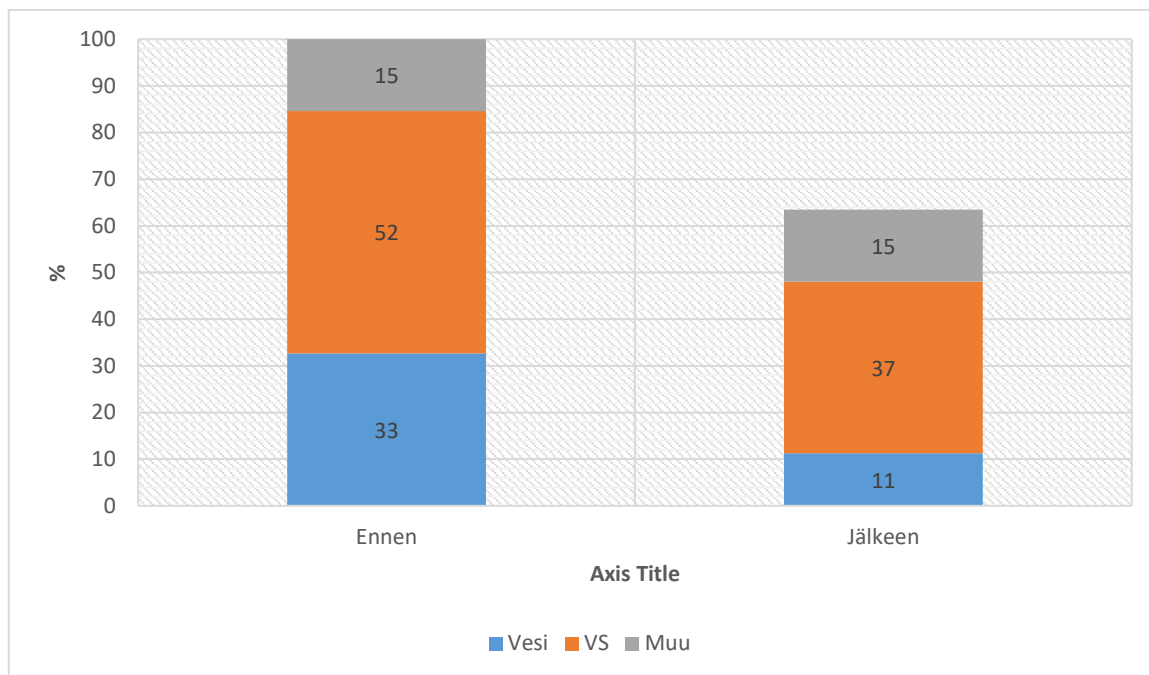
Tuloksena kirjallisuuskatsauksen ja niiden perusteella tehtyjen laskentojen jälkeen, voidaan todeta, että lämpöarvo paranee biotermisen kuivauksen myötä. Jos kuivauksella ei ole suurta vaikutusta lämpöarvoon, ei jäte ole alussa ollut kovinkaan kosteaa ja se olisi ehkä jopa mahdollista polttaa sellaisenaan. Jos jäte on kuitenkin tarkoitus sijoittaa kaatopaikalle, on biotermisestä kuivauksesta hyötyä jätteen määrän vähentämisessä, sekä sen ominaisuuksien parantamisessa. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi kosteuspitoisuus, jonka vähenemisen myötä jätteen orgaanisten materiaalien hajoaminen vähenee merkittävästi kaatopaikalla, jolloin myös siitä syntyvien kaasujen ja hajuhaittojen määrä vähenee. Kuten aikaisemmin on mainittu, jätteen kosteuspitoisuuden olisi hyvä olla noin 50-70% ennen kuivausta.

5.3.1 Massatase

Massataseen avulla voidaan kuvata kuivausprosessin materiaalmassojen muuttumista kuivauksen aikana. Jätteen massa ja määrä vähenevät kuivauksen aikana, kun orgaaninen aines jätteessä hajoaa. Tämän lisäksi veden määrä jätteessä vähenee merkittävästi.

Laskennassa hyödynnetään valmiissa tutkimuksissa kerättyä tietoa ja mitattuja arvoja. Näitä arvoja massataseen kohdalla ovat veden sekä haihtuvien aineiden massojen muutokset kuivauksen aikana. Laskenta on suoritettu Excel taulukkolaskentaohjelmassa ja laskenta löytyy liitteistä (LIITE I),

Tässä jätteen koostumuksesta tiedetään kosteuspitoisuus ja VS-pitoisuus eli haihtuvien aineiden (engl. Volatile Solids) pitoisuus ennen kuivausta ja sen jälkeen, joiden avulla massatase on tehty. Massataseesta nähdään kunkin pitoisuuden muutos kuivauksen aikana. Alla olevassa diagrammissa (kuva 3) nähdään massatase, joka kuivauksen aikana muodostuu. Massan oletetaan olevan alussa 100 tonnia ja kuivauksen jälkeen se on 63,5 tonnia. Kuvasta nähdään miten vesi-, ja VS-pitoisuudet vähenevät kukin kuivauksen aikana. Massataseessa ”muu” pitää sisällään biologisesti hajoamattomia aineita, kuten hiiltä ja tuhkaa. Tämä osuus jätteessä siis säilyy samana kuivauksen aikana. Tässä se osuus on 15,4 tonnia. Veden määrä vähenee kuivauksen aikana 32,7 tonnista 11,3 tonniin ja sen väheneminen on huomattavasti suurin osa vähenevästä kokonaismassasta. Haihtuvien aineiden määrä väheni 51,9 tonnista 36,8 tonniin.



Kuva 4. Kuivausprosessin massatase.

5.3.2 Energiatase

Tässä tapauksessa Pohjois-Italian arvoja hyödyksi käyttäen laskettiin jätteestä saatavan energian määrä, enne kuivausta ja sen jälkeen. Jotta vesi voi poistua jätteestä, tarvitaan energiaa veden höyrystämiseen. Lämpöenergiankulutus kuivanjätteen lämpöarvolla laskettiin myös. Alle on taulukoitu (taulukko 4) laskennalla saatuja arvoja eri paikoissa. Laskenta suoritettiin Excel taulukkolaskentaohjelmassa (LIITE II,1).

Vaikka jätteen lämpöarvo paranee kuivauksen myötä, ei jätteestä saatavan kokonaisenergian määrä voi koskaan kasvaa, sillä kuivauksen aikana jätteen massa vähenee niin paljon. Kuivan jätteen polttaminen on kuitenkin helpompaa, eikä siitä jää jäljelle suotovesiä. Jäte myös palaa puhtaammin ja sen polttaminen on energiatehokasta. Lämpöenergiaa kuluu sitä enemmän mitä kosteampaa jäte on alussa, koska siitä pitää poistaa enemmän vettä.

Lämmönkulutus on laskettu veden ominaislämpökapasiteetin (4,19 kJ/kgK) ja ominaishöyrystyslämmön (2260 kJ/kg) avulla. Kuten aiemmin työssä mainittiin, koostuu kuivausprosessi kolmesta vaiheesta, joista ensimmäisessä jätteen lämpötila nousee noin 50-70 asteeseen. Tämä lämpötilan nousu on laskettu ensin, ja oletuksena on käytetty jätteen

lämpenevän 40 asteella. 40 asteen lämpötilannousu tarkoittaisi jätteen lämpötilan olevan alussa noin 20 astetta, ja lopuksi noin 60 astetta. Tämän jälkeen toisessa vaiheessa alkaa veden haihtuminen ja lämpötila ei oikeastaan enää muutu. Vaikka ulkopuolista lämmönlähdettä ei biotermisessä kuivauksessa tarvita, on mielenkiintoista tietää kuivausprossin vaatima lämmöntarve.

Italian esimerkin lisäksi on myös muiden aiemmin mainittujen jätteiden energiasisällöt ja lämpöenergiankulutuksen laskettu, jotta voidaan nähdä miten esimerkiksi alussa hyvin kostean lietteen kuivaamiseen kuluu huomattavasti enemmän energiaa kuin muissa tapauksissa, jonka voi nähdä taulukosta 5. Taulukkoon 5 on mielenkiinnosta suhteutettu näiden kolmen tapauksen jätemäärät 100 kg alussa, jolloin voitiin laskea helposti vertailtava lämpöenergian kulutus näiden välillä. Tästä huomaa helposti, miten alussa kuivimman jätteen lämpöenergiankulutus on huomattavasti pienempi märän lietteen vastaavaan arvoon. (LIITE II,2)

Taulukko 4. Jätteistä saatavia energiamääriä ennen kuivausta ja sen jälkeen sekä energiankulutus taulukoituna.

| | Tambone et al. 2011 | Yuan et al. 2018 | Winkler et al. 2013 |
|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Massa ennen | 100,0 t | 30,0 kg | 150 kg |
| Massa jälkeen | 63,4 t | 8 kg | 39 kg |
| Energiasisältö ennen kuivausta | 1815,0 MJ | 72,7 MJ | 1155 MJ |
| Energiasisältö kuivauksen jälkeen | 1336,5 MJ | 57,4 MJ | 546 MJ |
| Lämpöenergiankulutus | 52,0 MJ/t | 36,0 MJ/kg | 230,5 MJ/kg |

Taulukko 5. Haihtuvan veden määrä ja lämpöenergian kulutus, jos kaikkien massa alussa olisi 100 kg.

| | Tambone et al. 2011 | Yuan et al. 2018 | Winkler et al. 2013 |
|----------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Haihtuvan veden määrä [kg] | 21,4 | 49,4 | 63,3 |
| Lämpöenergiankulutus [MJ] | 52 | 120 | 154 |

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Johtopäätöksenä tästä kandidaatintyöstä voisi todeta, että biotermisen kuivauksen hyödyt ovat parhaimmillaan kostean sekajätteen lämpöarvon parantamisessa polttoa varten. Yhdyskuntalietteiden suuren määrän vuoksi, helpoin tapa sen hävittämiseen on poltto, jota ennen biotermisen kuivaus on erittäin hyvä tapa parantaa sen lämpöarvoa. Kenties erilaisten prosessiin vaikuttavien tekijöiden yhdistäminen voisi johtaa parhaaseen tulokseen. Näillä tekijöillä tarkoitetaan esimerkiksi jätteen sekoittamista sopivin väliajoin, jolloin ilmavirta pääsee kulkemaan tasaisemmin kaikkialle. Sekoittamisen tarpeellisuus vaihtelee jätemäärän mukaan. Jos jätettä on paksu kerros, on sekoittaminen tarpeellista useammin, kuin jos jätettä olisi vain ohut kerros. Ilmavirran optimointi on myös tärkeää ja kuten sekoittamiseen, myös ilmavirran määrään vaikuttaa kuivattavan jätteen määrä. Jos ilmavirta on liian voimakas, vie se mukanaan myös lämpöä liikaa. Lämpötilan optimointi mahdollisuuksien mukaan on tärkeää parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi. Lämpötilan säilymiseen vaikuttaa ilmavirran lisäksi jätteen sekoittaminen. Koska kaikki muuttuvat tekijät vaikuttavat toisiinsa, on niiden käyttö suunniteltava tapauskohtaisesti.

Biotermisen kuivauksen käyttö on suotavaa siihen parhaiten soveltuvien jätelajien kanssa ja paikoissa, joissa muunlainen käsittely on hankalaa. Sekajätteen osalta biotermisen kuivauksen käyttö esimerkiksi Suomessa olisi tarpeetonta, mutta Kiinassa taas hyvinkin hyödyllistä erilaisten jätteen kosteuspitoisuuksien vuoksi. Yhdyskuntajätelietteiden kuivaaminen olisi varmasti kannattavaa kaikkialla maailmalla, sillä sen koostumus ei kovinkaan paljon muutu eri maiden välillä. Biojätteessä olevien ravinteiden talteen saamisen vuoksi sen käsittely esimerkiksi kompostoimalla on suotavaa, mutta jos tämä ei ole mahdollista ja ainoana vaihtoehtona on poltto tai kaatopaikkasijoitus, on biotermisen kuivaus esikäsittelynä sopiva. Poltto tai kaatopaikkasijoitus orgaanisten jätteiden kohdalla tulee kyseeseen, jos niitä ei voida hyödyntää lannoitteena tai maanparannuksessa. Ilman biotermistä kuivausta kostean jätteen sekaan on yleensä tarpeellista sekoittaa apupolttoaineita, jotta poltto helpottuu.

Suomessa eniten potentiaalia biotermisen kuivauksen käytölle olisi erilaisen lietteiden kuivauksessa. Sekajäte Suomessa ei kuitenkaan ole niin kosteaa, että sen kuivaaminen olisi kannattavaa tai tarpeellista, sillä sitä voi nykyiseen tapaan polttaa energiaksi hyvin.

7 YHTEENVETO

Biotermisen kuivaus on kompostoinnin ja toisaalta myös termisen kuivauksen tapainen jätteenkäsittelytapa. Se hyödyntää jätteen orgaanisen aineksen hajoamisesta syntyvää lämpöä. Jätteen sekaan syötetyn ilmavirran avulla poistetaan kosteutta. Parhaan kuivaustuloksen aikaansaamiseksi voidaan jätteeseen syötettävän ilmavirran määrää vaihdella, sekä jätettä sekoittaa kuivauksen aikana. Tutkimusten mukaan sekoittaminen on paras tehdä tietyissä kohtaa prosessia (noin 3 päivän välein), jotta se ei häiritse sitä liikaa esimerkiksi hidastamalla mikrobitoimintaa, kun sen pitäisi toimia päin vastoin. Kuivauksen aikana on tavoitteena säilyttää lämpötila korkeana, jotta mikrobitoiminta säilyy. Kuivausprosessi tapahtuu kolmessa vaiheessa, joissa erona on lämpötilan muuttuminen/muuttumattomuus, sekä kosteuspitoisuuden muuttuminen.

Ennen kuivausta etenkin sekajätteen kohdalla jäte esikäsitellään usein rumpuseulan avulla, jolloin jätteen seassa olevat suuremmat jätekappaleet erotellaan kuivaukseen jatkavasta jätteestä. Erotellut jätteet voidaan joko viedä kierrätettäväksi tai suoraan polttoon. Sama rumpuseulakäsittely saatetaan toistaa kuivauksen jälkeen, jolloin seulassa olevat aukot ovat vielä pienemmät kuin aikaisemmassa vaiheessa. Tällöin alite päättyy mahdollisesti kaatopaikalle.

Usein kuivauksen tavoitteena on parantaa jätteen lämpöarvoa polttoa varten. Myös kaatopaikalle sijoittaminen on kuivauksen jälkeen ”helpompaa”, koska sen määrä vähenee, sen orgaaninen aines on jo lähes hajonnut, jolloin jäte ei ala tuottamaan kasvihuonekaasuja kuten metaania mädäntyessään.

Kostean sekajätteen kuivaamista on tutkittu laboratoriokoon laitoksissa jonkin verran. Yhdyskuntalietteitä kuivataan Alankomaissa täyden mittakaavan laitoksessa. Kuivaus parantaa jätteen lämpöarvoa, mutta on huomioitava, että myös kuivaukseen kuluu energiaa, kun siihen syötetään ilmavirtaa. Jätteen itse tuottamaa lämpöenergiaa tarvitaan sitä enemmän, mitä kosteampaa jäte on alussa ja mitä enemmän jätettä on.

Bioterminen kuivaus olisi varmasti erittäin hyvä tapa vähentää jätteen kaatopaikkasijoittamista, tai edes parantaa kaatopaikoille joutuvan jätteen laatua kehittyvissä maissa. Tämän kandidaatintyön perusteella eniten biotermiselle kuivaukselle olisi tarvetta kehittyvissä maissa, joissa jätteen määrä kasvaa huimaa tahtia ja joissa jätteiden ja etenkin biojätteen erilliskeräystä ei olla järjestetty ja sitä on vaikea järjestää. Yhdyskuntajätteen polttamista varten olisi esimerkiksi Malesiassa saatavilla polttolaitoksia, mutta jätteen huonon lämpöarvon vuoksi niitä ei olla käytetty. Biotermiseen kuivaukseen sopivia jätteitä on kostea sekajäte, jota esimerkiksi Kiinassa on ongelmaksi asti. Sekajätteen lisäksi biojäte ja metsäteollisuuden lietteet sekä yhdyskuntalietteet.

Lämpöarvon parantamisen kannalta bioterminen kuivaus on hyvä jätteenkäsittelytapa. Jos jäte on tarkoitus polttaa energiantuotannossa ja jäte on mahdollista polttaa melkein heti kuivauksen jälkeen, on bioterminen kuivaus erittäin hyvä käsittelytapa. Jätteen ollessa kuivempaa kuivausprosessin jälkeen helpottuu sen lyhytaikainen varastointi ja kuljettaminen.

Termiseen kuivaukseen verrattuna bioterminen kuivaus on ympäristöystävällisempää siinä mielessä, koska siinä ei tarvita ulkopuolista lämmönlähdettä. Erona kuitenkin on se, että biotermisellä kuivauksella ei saada täysin stabiloitunutta jätettä, jolloin se pitää hyödyntää heti polttamalla tai jollain muulla tavalla, sillä varastointi ei ole mahdollista. Huomioitava asia näiden menetelmien vertailussa on myös niiden investointi- ja käyttökustannuserot, joita voisi vielä tutkia lisää, jos työtä jatkaisi pidemmälle. Toinen mahdollisessa jatkotutkimuksessa käsiteltävä asia voisi olla biotermiseen kuivaukseen tarvittava energia esimerkiksi ilmapvirran puhaltamiseen, sekä jätteen kuljetus- ja varastointitarpeet.

Ehdottomasti parasta kuitenkin olisi, jos kaikkialla voitaisiin mahdollistaa toimiva jätteiden erilliskeräys, jolloin sekajäte voitaisiin suoraan hyödyntää polttamalla, ilman että sitä pitää ensin kuivata. Tällöin myös uudelleen hyödynnettävät materiaalit pääsisivät takaisin kiertoon. Biojäte voitaisiin hyödyntää kompostoimalla tai mädättämällä, jolloin siinä oleva energia saataisiin hyötykäytettyä.

LÄHTEET

- Alakangas Eija, Hurskanen Markus, Laatikainen-Luntama Jaana, Korhonen Jaana. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Technology 258. [Viitattu 25.2.2021] Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf>
- Berninger Kati. 2018. Puhdistamolieteeselvitys: Yhteenveto toteutettujen hankkeiden tuloksista. Tyrsky Consulting Oy. [Tieteellinen artikkeli] [Viitattu 28.5.2021] Saatavissa: <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7b018126E5-DE6A-4F34-9F31-8CB56B533785%7d/142878>
- Bilgin Melayib et al. 2015. Biodrying for municipal solid waste: Volume and weight reduction. [Viitattu 22.2.2021]
- Bioforcetech Corporation. 2021. Biodrying. [www-sivu] [Viitattu 19.3.2021] Saatavissa: <https://www.bioforcetech.com/biodryer.html>
- Debicka Marlena ja Żygadlo Maria. 2017a. Full-scale biodrying process of municipal solid waste. E3S Web of Conferences 17, 00018. [tieteellinen artikkeli] [Viitattu 22.2.2021] Saatavissa: DOI: 10.1051/e3sconf/20171700018
- Debicka Marlena, Żygadlo Maria, Latosinska. 2017b. The effectiveness of biodrying waste of biodrying waste treatment in full scale reactor. [Tieteellinen artikkeli] [Viitattu 4.3.2021] Saatavissa: DOI 10.1515/chem-2017-0009
- Durdevi'c Dinko, Blecich Paolo ja Juric Zeljko. 2019. Energy from Sewage Sludge: The Case Study of Croatia. Energies 2019, 12, 1927. [tieteellinen artikkeli] [Viitattu: 25.3.2021] Saatavissa: doi:10.3390/en12101927

Dziedzic Krzysztof, Lapczynska-Kordon Boguslawa, Malinowski Mateusz, Niemiec Marcin, Sikora Jakub. 2015. Impact of aerobic biostabilisation and biodrying process of municipal solid waste on minimisation of waste deposited in landfills. *Chemical and Process Engineering*, Volume 36, Issue 4, Pages 381-394. [tieteellinen artikkeli] [Viitattu 22.2.2021] Saatavissa: DOI: 10.1515/cpe-2015-0027

Etappi. 2021. Biöjäte. [www-sivu] [Viitattu 4.2.2021] Saatavissa: <https://www.etappi.com/jateneuvonta/lajitteluohteet/biojate/>

Finlex. 2013. Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista. [www-sivu] [Viitattu 25.5.2021] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130331>

Gardeners. 2021. Jumpstart Your Compost. [www-sivu] [Viitattu 22.2.2021] Saatavissa: <https://www.gardeners.com/how-to/jumpstart-your-compost/5380.html>

Gasum. 2021. Biokaasu osana kiertotaloutta. [www-sivu] [Viitattu 3.4.2021] Saatavissa: <https://www.gasum.com/kaasusta/biokaasu/biokaasu/>

GMB. 2021. Orgaaninen kuivaus. [www-sivu] [Viitattu 11.4.2021] Saatavissa: <https://www.gmb.eu/gmb-clusters/gmb-bioenergie/biologisch-drogen>

Havukainen Jouni, Zhan Mingxiu, Dong Jun, Liikanen Miia, Deviatkin Ivan, Li Xiaodong, Horttanainen Mika. 2016. Environmental impact assessment of municipal solid wastemanagement incorporating mechanical treatment of waste and incineration in Hangzhou, China. *Journal of Cleaner Productio*, 141, Pages 453-461. [tieteellinen artikkeli] [Viitattu 2.2.2021] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.146>

Hupponen Mari, Luoranen Mika, Horttanainen Mika. 2012. Mädätysjäännöksen rakeistus terminen kuivaus ja energiahyötykäyttö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. LUT Energia. [Tutkimusraportti] [Viitattu: 8.2.2021] Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/86811/VALMIS_JULKINEN_JATKE_KL_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Huttunen Marika. 2019. Kausivaihteluiden vaikutus kierrätyspolttoaineen (yhdyskuntajäte) käytettävyyteen energiantuotannossa. [Opinnäytetyö] Savonia ammattikorkeakoulu, Tekniikan ja Liikenteen ala. [Viitattu: 11.4.2021] Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/260702/Huttunen_Marika.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Impact on fluidized bed boiler efficiency. [verkkodokumentti] [Viitattu 25.2.2021] Saatavissa:https://pdfs.semanticscholar.org/22c9/b35669894f79918df62c298fa6b4e4c3de07.pdf?_ga=2.91169690.1486037332.1613994533-1022433971.1613994533

Ilmasto-opas. 2021. Biomassan tuotanto ja polttoaineen käyttö ratkaisevassa roolissa bioenergian ilmastohyötyjä arvioitaessa. [www-sivu] [viitattu 23.3.2021] Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/c14a79cd-d384-41f4-a422-32338ecb35ca/bioenergia.html>

Jalil N. A. Ab., Basri H., Basri Ahmad N.E., AbuShammala M.F.M. 2015. The Potential of biodrying as Pre-treatment for Municipal Solid Waste in Malaysia. Journal of Advanced Review on Scientific Research, Volume 7, Issue 1, Pages 1-13. [tieteellinen artikkeli] [Viitattu 22.2.2021] Saatavissa: http://www.akademiabaru.com/doc/ARSRV7_N1_P1_13.pdf

Kiertokapula Oy. 2021. Biojätteet. [www-sivu] [Viitattu 28.1.2021] Saatavissa: <https://www.kiertokapula.fi/neuvonta-ja-ymparistokasvatus/ohjeita-ja-oppaita-lajitteluun/biojatteet/>

Kiertovoima ry. 2020. Koostumustietopankki. [www-sivu] [Viitattu 29.5.2021] Saatavissa: <https://kivo.fi/yymmarramme/koostumustietopankki/>

Lannoitevalmistelaki. 2006 [laki] [Viitattu: 28.5.2021] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2006/20060539>

Latvala Markus. 2009. Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Paras käytössä oleva tekniikka (BAT). [Verkkodokumentti] [Viitattu: 3.4.2021] Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37998/SY_24_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Liimatainen Pasi. 2000. Metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamon lietteiden vaihtoehtoiset käsittelymenetelmät. Diplomityö. [Viitattu 28.1.2021].

Lohiniva Elina, Mäkinen Tuula, Sipilä Kai. 2001. Lietteiden käsittely: Uudet ja käytössä olevat tekniikat. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT Tiedotteita. [Tieteellinen artikkeli] [Viitattu: 20.3.2021] Saatavissa: <https://cris.vtt.fi/en/publications/lietteiden-kasittely-uudet-ja-kaytossa-olevat-tekniikat>

Lumme Jyrki. 2014. Biopolttoaineiden ongelmat. [Diplomityö] Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT. Teknillinen tiedekunta, energiatekniikan koulutusohjelma. [Viitattu 3.4.2021] Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/102123/Diplomity%c3%b6_JyrkiLumme_d0363520.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Ma Jiao, Zhang Lei, Li Aimin. 2016. Energy-efficient co-biodrying of dewatered sludge and food waste: Synergistic enhancement and variables investigation. *Waste Management* 56, Pages 411-422. [tieteellinen artikkeli] [Viitattu 25.2.2021] Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.007>

Nakasaki Kiyohiko, Aoki Nobuto, Kubota Hiroshi. 1994. Accelerated composting of grass clippings by controlling moisture level. *Waste Management & Research*, Volume 12, Issue 1, Pages 13–20. [Tieteellinen artikkeli] [Viitattu 25.3.2021] Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0734-242X\(94\)90017-5](https://doi.org/10.1016/S0734-242X(94)90017-5)

Navaee-Ardeh Shahram, Bertrand Fancois ja Stuart Paul R. 2006. Emerging Biodrying Technology for the Drying of Pulp and Paper Mixed Sludges. *Drying Technology: An International Journal*. Volume 24, Issue 7, Pages: 863-878, [Tieteellinen artikkeli] [Viitattu 20.3.2021] Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1080/07373930600734026>

Niskanen Tuomas ja Karjalainen Timo. 2014. Biopolttoaineiden tuotantomahdollisuudet Kainuussa. [verkkodokumentti] [Viitattu 3.4.2021] Saatavissa: https://www.oulu.fi/sites/default/files/content/files/Biopolttoaineiden%20tuotantomahdollisuudet%20Kainuussa_Final_0.pdf

Ojanen Pekka. 2001. Sellu- ja paperitehtaiden lietteiden käsittely ja hyötykäyttö sekä niitä rajoittavat tekijät. *Alueelliset ympäristöjulkaisut*, 223. Kaakkois-Suomen Ympäristökeskus. [verkkodokumentti] [Viitattu 28.1.2021] Saatavissa: <https://docplayer.fi/31804312-Sellu-ja-paperitehtaiden-lietteiden-kasittely-ja-hyotykaytto-seka-niita-rajoittavat-tekijat.html>

He Pinjing, ZhaoLing, Zheng Wei, Wu Duo, Shao Liming. 2013. Energy Balance of a Biodrying Process for Organic Wastes of High Moisture Content: A Review. [Viitattu 22.2.2021] Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2012.693143>

Psaltis Panagiotis, Komilis Dimitrios. 2018. Environmental and economic assessment of the use of biodying before thermal treatment of municipal solid waste. *Waste Management*, 83, pages 95-103. [tieteellinen artikkeli] [Viitattu 22.2.2021] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.007>

Ruokavirasto. 2021. Jätevesilietteiden käyttö lannoitevalmisteena. [www-sivu] [Viitattu 28.5.2021] Saatavilla: <https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/rehu--ja-lannoiteala/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/kierratysravinteet/jatevesilietteet/>

Shao Li-Ming, He Xiao, Yang Na, Fang Jing-Jing, Lü Fan and He Pin-Jing. 2012. Biodrying of municipal solid waste under different ventilation modes: drying efficiency and aqueous pollution. *Waste Management & Research*, Volume 30, Issue 12, Pages 1272-1280. [Tieteellinen artikkeli] [Viitattu 4.4.2021] Saatavissa: DOI: 10.1177/0734242X12462278

Tilastokeskus. 2020. Yhdyskuntajätettä kertyi vuonna 2018 aiempia vuosia enemmän. [www-sivu]. Päivitetty 17.1.2020. [Viitattu 26.1.2021] Saatavissa: http://www.stat.fi/til/jate/2018/jate_2018_2020-01-15_tie_001_fi.html

Tambone F., Scaglia B., Scotti S., Adani F. 2011. Effects of biodrying process of municipal solid waste properties. *Bioresearch Technology*, 102, Pages 7443-7450. [tieteellinen artikkeli] [Viitattu 22.2.2021] Saatavissa: doi:10.1016/j.biortech.2011.05.010

Tom Asha P., Pawels Renu, Haridas Ajit. 2015. Biodrying process: A sustainable technology for treatment of municipal solid waste with high moisture content. *Waste Management*, 49, Pages 64-72. [Tieteellinen artikkeli] [Viitattu 22.2.2021] Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.004>

Tchryk C., Stuart Paul P.R. 2010. Design of novel biodrying process for pulp and paper mill sludge, and Impact on Fluidized Bed Boiler Efficiency. [Verkkodokumentti] [Viitattu 20.2.2021] Saatavissa: <https://doi.org/10.24908/pceea.v0i0.3157>

Tukiainen Minna-Maria. 2015. Yhdyskuntajätteen mekaanisen erottelun erotustehokkuus. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto LUT. [opinnäytetyö] [Viitattu 9.4.2021] Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/104865/DIPLOMITY%c3%96%20Minna%20Tukiainen.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Winkler M. -K.H, Bennenbroek M.H., Horstink F.H., van Loosdrecht M.C.M., van de Pol G.-J. 2013. The biodrying concept: An innovative technology creating energy from sewage sludge. *Bioresource Technology* 147, Pages 124-129. [Tieteellinen artikkeli] [Viitattu 25.3.2021] Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.138>

Velis C.A., Lonhurst P.J., Drew G.H., Smith R., Pollard S.J.T. 2009. Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of process science and engineering. *Bioresource Technology*, Volume 100, Issue 11, Pages 2747-2761. [Tieteellinen artikkeli] [Viitattu 10.2.2021] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.026>

Vesilaitosyhdistys. 2019. Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 56. Helsinki. [Tieteellinen artikkeli] [Viitattu: 29.5.2021] Saatavissa: https://www.vvy.fi/site/assets/files/2916/puhdistamolietteen_termiset_kasittelymenetelmät_ja_niiden_soveltuvuus_suomeen.pdf

Yuan Jing, Zhang Difang, Li Yun, Li ji, Luo Wenhai, Zhang Hongyu, Guoying Wang, Guoxue Li. 2018. Effects of aeration pattern, aeration rate, and turning frequency on municipal solid waste biodrying performance. *Journal of Environmental Management* 218 (2018) 416-424. [tieteellinen artikkeli] [Viitattu: 15.3.2021] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.089>

Yuan Jing, Li Yun, Wang Guoying, Zhang Difang, Shen Yujun, Ma Ruonan, Li Danyang, Li Shuyan, Li Guoxue. 2019. Biodrying performance and combustion characteristics related to bulking agent amendments during kitchen waste biodrying. *Bioresource Technology*, 284, Pages 56-64. [Tieteellinen artikkeli] [Viitattu 22.2.2021] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.115>

LIITE II Energiataseen laskentaa

Taulukko 2. Energiasisällön ja lämpöenergiankulutuksen laskenta

| Lähde | Kiina (Yuan et al. 2018) | | Italia Tambone et al. 2011 | | Winkler et al. 2013 | |
|---------------------|--------------------------|-------|----------------------------|-------|---------------------|-------|
| Materiaali | Sekajäte+maissintähkät | | sekajäte | | yhdyskuntaliete | |
| Input | 30 | kg | 100 | t | 150 | kg |
| Kiintoainepitoisuus | 40 % | TS | 67 % | TS | 25 % | TS |
| VS | 81 % | TS | 77 % | TS | | |
| LHV in | 2,4 | MJ/kg | 18,2 | MJ/kg | 7,7 | MJ/kg |
| Energiasisältö | 73 | MJ | 1815 | MJ | 1155 | MJ |
| Output | 8 | kg | 63,4 | t | 39 | kg |
| Kiintoainepitoisuus | 59 % | TS | 82 % | TS | 55 % | TS |
| VS | 65 % | TS | 71 % | TS | | |
| LHV_out | 7,2 | MJ/kg | 21.1 | MJ/kg | 14,0 | MJ/kg |
| Energiasisältö | 57 | MJ | 1336 | MJ | 546 | MJ |
| Massan vähennys | 22 | kg | 37 | t | 111 | tkg |
| Haihtunut vesi | 15 | kg | 21408 | kg | 95 | kg |
| Lämmönkulutus | 36 | MJ | 51969 | MJ | 231 | MJ |

| | |
|--------------------------|-------------|
| Lämpötilanmuutos | 40 K |
| Ominaislämpökapasiteetti | 4.19 kJ/kgK |
| Ominaishöyrystymislämpö | 2260 kJ/kg |

Taulukko 3. Energiasisällön ja lämpöenergiankulutuksen laskenta kun kaikkien massa alussa oletettu 100 kg.

| Lähde | Kiina (Yuan et al. 2018) | | Italia Tambone et al. 2011 | | Winkler et al. 2013 | |
|---------------------|--------------------------|-------|----------------------------|-------|---------------------|-------|
| Materiaali | Sekajäte+maissintähkät | | sekajäte | | yhdyskuntaliete | |
| Input | 100 | kg | 100 | kg | 100 | kg |
| Kiintoainepitoisuus | 40 % | TS | 67 % | TS | 25 % | TS |
| VS | 81 % | TS | 77 % | TS | | |
| LHV in | 2,4 | MJ/kg | 18,2 | MJ/kg | 7,7 | MJ/kg |
| Energiasisältö | 242 | MJ | 1815 | MJ | 1155 | MJ |
| Output | 26,7 | kg | 63,4 | kg | 26 | kg |
| Kiintoainepitoisuus | 59 % | TS | 82 % | TS | 55 % | TS |
| VS | 65 % | TS | 71 % | TS | | |
| LHV_out | 7.2 | MJ/kg | 21,1 | MJ/kg | 14,0 | MJ/kg |
| Energiasisältö | 191 | MJ | 1336 | MJ | 546 | MJ |
| Massan vähennys | 73 | kg | 37 | kg | 111 | kg |
| Haihtunut vesi | 49 | kg | 21 | kg | 63 | kg |
| Lämmönkulutus | 120 | MJ | 52 | MJ | 154 | MJ |