Tampereen yliopisto

Waltteri Wiro

BIOJÄTTEEN ENSISIJAINEN HYÖDYNTÄMINEN MÄDÄTTEENÄ

Mädäteprojektin vaikutusten arviointi

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastajat: Hannele Auvinen
Marja Palmroth
Huhtikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Waltteri Wiro: Biojätteen ensisijainen hyödyntäminen mädätteenä
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikan DI-ohjelma
Huhtikuu 2024

Euroopan Unionin säätämä jätedirektiivi edellyttää jäsenmaiden kierrätysasteen nostamista vaiheittain vuoteen 2035, jolloin yhdyskuntajätteen kierrätysasteen tulisi olla vähintään 65 %. Valtakunnallisessa jätesuunnitelmassa on asetettu, että vuoteen 2030 mennessä yhdyskuntajätteen biohajoavan osan kierrätysasteen tulisi olla 65 %. Jotta tämä tavoite voidaan saavuttaa, tulee biojätteiden käsittelyn kapasiteettia lisätä. Biojätteen käsittelylle on Suomessa käytössä kaksi pääasiallista vaihtoehtoa, kompostointi ja anaerobinen mädätys. Sekä kompostoinnissa että anaerobisessa mädätyksessä orgaanista ainesta hajotetaan biologisesti. Mädätyksen etuna on, että se tuottaa ravinnepitoisen mädätteen lisäksi energiapitoista biokaasua.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää biojätteen käsittelyssä syntyvän mädätteen käsittelyvaihtoehtoja ja HSY:n Mädäte maatalouteen -kärkihankkeessa suunnitellun Ämmässuon biojätteen käsittelyprosessin tehostamisen vaikutuksia prosessin kestävyyteen ympäristöllisistä ja taloudellisista näkökulmista. Prosessimuutoksen taustalla oli tavoite käyttää biokaasulaitoksen koko kapasiteettia ohjaamalla biojäte mädätykseen ja mädäte maatalouskäyttöön lannoitteena kompostoinnin sijasta. Biokaasulaitoksen käyttöasteen noustessa saataisiin tuotettua lisää biokaasua. Vaikutusarviointi tehtiin kolmelle eri prosessivaihtoehdolle ja niiden tuloksia vertailtiin. Laskennat suoritettiin keräämällä tuloksia aiemmista tutkimuksista sekä tekemällä niiden pohjalta arviointeja vaikutuksista. Käytetty aineisto koostui HSY:n aiemmin teettämistä tutkimuksista ja raporteista.

Prosessimuutoksen hyötyjä kestävyyteen arvioitiin kestävyystarkastelulla. Tarkastelussa käytettyjä mittareita olivat kasvihuonekaasu- ja hajupäästöt, ravinteiden kierto, hiilen ja orgaanisen aineen kierto, biokaasu, kustannukset ja säästöt, sekä energiankulutus. Tulokset osoittivat, että prosessimuutoksen myötä biojäte saataisiin hyödynnettyä aiempaa paremmin ja että toteutumassa oleva prosessi olisi kaikista kestävin vaihtoehto. Nykyiseen prosessiin verrattuna toteutumassa olevalla prosessilla biokaasun tuotanto nousisi 109 %, ainehäviöt pienenisivät 73 %:sta 21 %:iin, kompostoinnin määrä laskisi 87 %, ja kasvihuonekaasu- ja hajupäästöt vähenisivät 86 %. Vaikka kaikkea biokaasusta tuotettua lämpöä ei saataisi hyödynnettyä, syntyisi säästöjä silti 12,1 €/t käsiteltyä biojätettä, mikä vastaa noin 650 000 euroa vuodessa. Tuotetulla lannoitteella saataisiin korvattua mineraalilannoitteita noin 870 tonnin edestä vuosittain. Kompostoinnin vähentyessä laitoksella vapautuu tilaa vanhalta kompostointilaitokselta ja jälkikypsytyskentältä muiden toimintojen käytettäväksi. Prosessimuutos on selkeästi kannattava ja se lisää prosessin kestävyyttä sekä ympäristön että talouden kannalta.

Avainsanat: Biojäte, biokaasu, anaerobinen mädätys, lannoite, kompostointi, kestävyystarkastelu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Waltteri Wiro: Utilizing biowaste primarily as digestate
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Environmental and Energy Engineering
April 2024

The waste directive enacted by the European Union demands member states to gradually increase their recycling rates by 2035. By then the recycling rate of municipal waste should be 65 %. According to the National Waste Plan the recycling rate for the biodegradable fraction of municipal waste should be 65 % by 2030. To achieve this goal, the biowaste treatment capacity should be increased. In Finland, there are two main options for treating biowaste: composting and anaerobic digestion. In both processes organic matter is decomposed biologically. The advantage digestion is that it produces nutrient-rich digestate as well as energy-rich biogas.

The aim of this study was to investigate the options for treating the digestate produced in biowaste treatment and the effects of optimizing the biowaste treatment process at Ämmässuo to the processes sustainability from environmental and economical perspectives. The process change aimed to utilize the full capacity of the biogas plant by directing biowaste to digestion and using the digestate as fertilizer for agricultural purposes instead of composting. Increasing the utilization rate of the biogas plant would result in additional biogas production. A sustainability assessment was done for three different process alternatives, and their results were compared. The calculations were based on data collected from previous studies and reports.

The benefits of the process change in terms of sustainability were evaluated through a sustainability assessment. The metrics used in the assessment included greenhouse gas and odor emissions, nutrient recycling, carbon and organic matter recycling, biogas production, costs and savings, and energy consumption. The results showed that with the process change, biowaste could be better utilized, and the proposed process would be the most sustainable option. Compared to the current process, the proposed process would increase biogas production by 109 %, reduce material losses from 73 % to 21 %, decrease composting by 87 %, and reduce greenhouse gas and odor emissions by 86 %. In the case, that not all the heat produced from biogas could be utilized, savings of 12,1 € per ton of processed biowaste would still be achieved, equivalent to approximately 650 000 € annually. The produced fertilizer could replace mineral fertilizers by approximately 870 tons annually. With the reduction in composting, space would be freed up at the old composting plant and post-maturing field for other activities. The process change is clearly profitable and enhances the sustainability of the process both environmentally and economically.

Keywords: Biowaste, biogas, anaerobic digestion, fertilizer, composting, sustainability analysis

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on toteutettu Helsingin seudun ympäristöpalveluiden toimeksiantona vuosina 2023-2024 osana Mädäte maatalouteen -kärkihanketta.

Haluan kiittää HSY:tä mielenkiintoisen tutkimusaiheen tarjoamisesta. Kiitos ohjaajilleni yliopistonlehtori Hannele Auviselle ja yliopistonlehtori Marja Palmrothille sekä HSY:n jätehuollon kehittämisinsinööri Linda Römanille ja Ämmässuon toimintovastaava Christoph Gareisille. Kiitos HSY:n jätehuollon rakennuttamisen tiimille tuesta työn aikana.

Lisäksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni kaikesta tuesta opintojen ja diplomityöurakan aikana.

Helsingissä, 10. huhtikuuta 2024

Waltteri Wiro

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTETYÖSSÄ

Opinnäytteessäni käytetyt tekoälytyökalut ja niiden käyttötarkoitukset on kuvailtu alla:

OpenAI ChatGPT 3.5: Käytettiin apuna lähteiden kääntämistyön nopeuttamiseksi. Kaikki tekoälyn antama teksti tarkastettiin ja muokattiin vielä opinnäytetyöhön ja tekstiyhteyteen sopivaksi.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien tekoälyllä tuotetut osat, ja hyväksyn vastuun mahdollisista julkaisueettisten normien rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto . . . 1
2. Biojätteen käsittely . . . 3
   2.1 Biojätteen koostumus . . . 3
   2.2 Mädätys . . . 4
      2.2.1 Mädätysprosessi . . . 4
      2.2.2 Mädätysprosessiteknologia . . . 5
      2.2.3 Mädätysprosessiin vaikuttavat tekijät . . . 8
      2.2.4 Biokaasu . . . 10
      2.2.5 Mädäte . . . 11
   2.3 Kompostointi . . . 11
      2.3.1 Kompostointiprosessi ja kompostointitekniikat . . . 11
      2.3.2 Kompostointiprosessiin vaikuttavat tekijät . . . 13
3. Biojätteen kierrätysprosessin kehittäminen . . . 15
   3.1 Mädätteen käsittely . . . 15
      3.1.1 Biojätteen käsittelyn ja mädätteen käsittelyn lainsäädäntö . . . 15
      3.1.2 Mädätteen lannoitekäyttö ja kompostointi . . . 16
   3.2 Biojätteen käsittelyprosessin ympäristövaikutukset ja taloudelliset vaikutukset . . . 18
      3.2.1 Kasvihuonekaasupäästöt . . . 18
      3.2.2 Hajut . . . 19
      3.2.3 Ravinteiden kierto . . . 20
      3.2.4 Hiilen ja orgaanisen aineen kierto . . . 21
      3.2.5 Biokaasu . . . 22
      3.2.6 Biojätteen käsittelyn energiankulutus . . . 22
   3.3 Biojätteen käsittelyvaihtoehtojen taloudelliset vaikutukset . . . 23
4. Materiaalit ja menetelmät . . . 24
   4.1 Biojätteen käsittely Ämmässuolla . . . 24
   4.2 Ämmässuon käsittelyprosessin muutokset . . . 26
   4.3 Kestävyystarkastelu . . . 28
      4.3.1 Massatase . . . 28
      4.3.2 Ainetase . . . 29
      4.3.3 Energiatase . . . 30
      4.3.4 Kasvihuonekaasupäästöt . . . 32
      4.3.5 Hajut . . . 35

4.3.6 Operointikustannukset 36
5. Tulokset ja tulosten tarkastelu 39
5.1 Prosessimuutosten vaikutus massataseeseen 39
5.2 Prosessimuutosten vaikutus ainetaseeseen 41
5.3 Prosessimuutosten vaikutus energiataseeseen 42
5.4 Prosessimuutosten vaikutus ympäristövaikutuksiin 45
5.4.1 Kasvihuonekaasupäästöt 45
5.4.2 Hajupäästöt 46
5.5 Prosessimuutosten vaikutus kustannuksiin ja säästöihin 47
5.6 Kiertotalousnäkökulma 48
6. Johtopäätökset 50
Lähteet 51

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CHP	Combined Heat and Power, lämmön ja sähkön yhteistuotanto
HSY	Helsingin seudun ympäristöpalvelut
VOC	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet

1. JOHDANTO

Vuonna 2020 erilliskerättyä biojätettä syntyi Suomessa yhteensä 494 000 tonnia ja yhdyskuntajätteen kierrätysasteen arvioitiin olevan 42 % (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry 2021; Tilastokeskus 2023). Iso määrä orgaanista jätettä voi vaikuttaa negatiivisesti ilmaan, veteen ja maaperän kuntoon ja vaikuttaa näin ruoka-, energia- ja vesivaroihin, jos sitä ei käsitellä oikein (Lin et al. 2018). Euroopan Unionin säätämä jätedirektiivi edellyttää jäsenmaiden kierrätysasteen nostamista vaiheittain vuoteen 2035, jolloin yhdyskuntajätteen kierrätysasteen tulisi olla vähintään 65 %. Valtakunnallisessa jätesuunnitelmassa on asetettu, että vuoteen 2030 mennessä yhdyskuntajätteen biohajoavan osan kierrätysasteen tulisi olla 65 % (Ympäristöministeriö 2022). Tämän tavoitteen saavuttamiseksi tarvitaan lisää biojätteen erilliskeräystä ja kapasiteettia biojätteiden käsittelylle.

Biojätteen käsittelylle on Suomessa käytössä kaksi pääasiallista vaihtoehtoa, kompostointi ja anaerobinen mädätys. Sekä kompostoinnissa että anarobisessa mädätyksessä orgaanista ainesta hajotetaan biologisesti. Kompostoinnissa prosessi tapahtuu aerobisissa olosuhteissa ja lopputuotteena syntyy kompostia, jota käytetään maanparannusaineena (Cerda et al. 2018). Anaerobisessa mädätyksessä syntyy puolestaan mädätettä sekä biokaasua, joka koostuu pääasiassa metaanista (CH_4) ja hiilidioksidia (CO_2). Mädäte jatkokäsitellään joko kompostoimalla tai tuottamalla siitä lannoitetta.

Helsingin seudun ympäristöpalvelut (HSY) suunnittelee Ämmässuon biojätteen käsittelyprosessin tehostamista, jotta se tuottaisi enemmän biokaasua. Hankkeen tarkoituksena on käyttää biokaasulaitoksen koko kapasiteettia ohjaamalla biojäte mädätykseen ja mädäte maatalouskäyttöön lannoitteena kompostoinnin sijasta. Tämä kasvattaa HSY:n uusiutuvan energian tuotantoa, vähentää biojätteen käsittelyn ympäristökuormaa, lisää biojätteen käsittelykapasiteettia ja mahdollistaa ravinteiden ja hiilen kierrätyksen maatalouskäytössä.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää HSY:n Ämmässuon biojätteen käsittelyprosessiin suunniteltujen muutosten vaikutukset prosessin kestävyyteen. Tutkinnan kohteena on ympäristölliset ja taloudelliset vaikutukset. Työ kokoaa nykyisen, suunnitellun ja toteutumassa olevan prosessin väliset erot ja vertailee niiden eroja keskenään. Työn tuloksia voidaan hyödyntää HSY:n käsittelyprosessin suunnittelussa sekä vertailuissa ja uusissa hankkeissa. Käsittelyn kohteena oleva prosessi on rajattu gate-to-gate menetel-

mällä. Tämä tarkoittaa, että tarkastelu alkaa biojätteen saapuessa laitokselle ja loppuu valmiiseen lannoitteeseen. Lannoitteen käyttöä ei tarkastella laskennallisesti, mutta sen mukanaan tuomia vaikutuksia ja hyötyjä tarkastellaan.

Tämän työn toisessa ja kolmannessa luvussa käsitellään tutkimuksen taustalla olevaa teoriaa mädätykseen, kompostointiin, biokaasuun ja lannoitteisiin liittyen sekä selvitetään mädätteen käsittelyn vaihtoehtoja ja niiden vaikutuksia kestävyyteen. Neljännessä luvussa esitellään tutkimuksen taustalla oleva hanke, käytetyt materiaalit ja menetelmät. Luvussa viisi käydään lävitse ja tarkastellaan tutkimuksen pohjalta saadut tulokset. Kuudennessa luvussa esitetään työn johtopäätökset.

2. BIOJÄTTEEN KÄSITTELY

Tässä luvussa käydään tarkastellaan biojätteen käsittelyn teoriaa. Tämä sisältää yleistä tietoa biojätteestä, käytössä olevista käsittelymenetelmistä sekä käsitellyssä syntyvistä tuotteista ja niiden hyödyntämisestä.

2.1 Biojätteen koostumus

Erilliskerätyllä biojätteellä tarkoitetaan kotitalouksissa syntyvän jätteen orgaanista osaa (Biosantech et al. 2013). Tähän lukeutuu ruoka-, puutarha- ja muut vastaavat orgaaniset jätteet. Erilliskerätyn kotitalousjätteen ensisijainen tarkoitus on kestävä jätehuolto, jätemäärän vähentäminen ja orgaanisen aineen kierrätys. Biojäte kuuluu yleisimpiin biokaasuntuotantoon raaka-aineisiin ja se on yhdyskuntajätteen suurin yksittäinen osa. Sitä syntyy myös maataloudessa sekä teollisuudessa (European Environment Agency 2020). Lisääntyvä kaupungistuminen ja kuluttaminen tarkoittavat jätemäärien kasvua ja vaativat toimivan jätehuollon ja keräyksen (Biosantech et al. 2013). Samalla kasvava yhdyskuntajätteen määrä lisää potentiaalia biokaasun tuotannolle.

Jotta mädätysprosessi toimisi optimaalisesti ja vältyttäisiin vierasaineiden aiheuttamilta haittavaikutuksilta, tulee raaka-aineen olla mahdollisimman puhdasta (European Environment Agency 2020). Puhtaus voidaan saavuttaa vain, jos biojäte erilliskerätään ja lajitellaan jo syntypaikallaan oikeaan jätelajiin. Erilliskeräys on osa jätehuollon systeemiä ja takaa tarvittavan laadun ja puhtauden anaerobisen mädätyksen optimaaliselle toiminnalle.

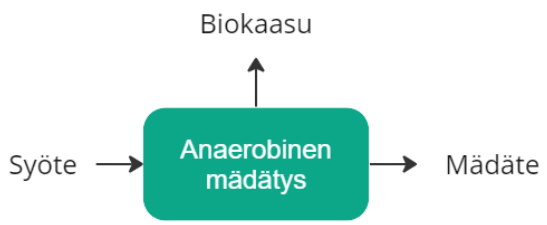
EU-28:ssa (28 Euroopan jäsenmaata välillä 2013-2020) syntyi vuonna 2017 yhteensä 86 miljoonaa tonnia yhdyskuntajätettä, josta 34 % oli biojätettä (European Environment Agency 2020). Biojätteen kierrätys on tärkeä askel kohti 65 % yhdyskuntajätteen kokonaiskierrätysastetta vuoteen 2035 mennessä. Ruokajätteen osuus kotitalouksien ja muiden vastaavien lähteiden biojätteestä on noin 60 %. Tästä syystä ennen kaikkea ruokajätteen syntymisen ehkäiseminen on äärimmäisen tärkeää. Ruokajäte on heterogeenistä ja materiaalin kosteuspitoisuus sekä orgaanisen aineen suhde tuhkaan ovat korkeita (Cerda et al. 2018). Lisäksi sillä on amorfinen fysikaalinen koostumus. Asuinkiinteistöjen biojäte on yleensä pakattu joko biohajoaviin muovi- ja paperipusseihin tai käärittynä sanomalehtiin, jotka päätyvät myös jätteen mukaan (Pirkkamaa 2014). Vuonna 2017 keskimäärin 43

% biojätteestä erilliskerättiin ja loput 57 % päätyivät sekajätteeseen ja jäivät kierrättämättä (European Environment Agency 2020).

2.2 Mädätys

2.2.1 Mädätysprosessi

Anaerobinen mädätys on monimutkainen ja vaiheittainen biologinen orgaanisen aineen muuntamisprosessi, jossa mikrobit hajottavat orgaanista materiaalia hapettomissa olosuhteissa (Stentiford ja Bertoli 2010; Swati ja Hait 2018). Mädätyksen avulla energia, ravinteet ja vesi saadaan otettua talteen jätteestä (Carliell-Marquet et al. 2018; Stentiford ja Bertoli 2010). Mädätys mahdollistaa biojätteessä olevien resurssien paremman hyödyntämisen, kun niitä voidaan käyttää metaanin ja lannoitteen tuotantoon (Gomez 2013). Tämä pätee erityisesti, kun sivuvirtoja ja jätettä käytetään mädätyksessä substraattina. Mädätyksen kaksi päätuotetta ovat energiaa sisältävä kaasu, jota kutsutaan biokaasuksi, ja ravinnepitoinen mädäte (Kuva 2.1.) (Stentiford ja Bertoli 2010). Biokaasu koostuu pääasiassa hiilidioksidista ja metaanista. Näiden kahden kaasun pitoisuudet biokaasussa riippuvat mädätetyn jätteen hapettumistilasta.



Kuva 2.1. *Anaerobisen mädätyksen massavirtakaavio.*

Johtuen rajoitetusti saatavilla olevasta energiasta ja anaerobisen mädätyksen aikana tapahtuvista erikoistuneista reaktioista, eri mikro-organismiryhmät toimittavat eri reaktioita prosessissa (Stentiford ja Bertoli 2010). Mädätyksessä on neljä eri vaihetta: hydrolyysi, asidogeneesi, asetogeneesi ja metanogeneesi (Braguglia et al. 2018). Ensimmäinen vaihe on hydrolyysi, jossa hydrolyyttiset bakteerit hajottavat raaka-ainetta yksinkertaisiksi sokereiksi, amino- ja rasvahapoiksi. Toinen vaihe on asidogeneesi, jossa hydrolyysissa syntyneet monomeerit muuttuvat lyhytketjuisiksi orgaanisiksi hapoiksi, alkoholeiksi, yhdessä vedyn ja hiilidioksidin kanssa. Syntyneet tuotteet vaihtelevat erityyppisten bakteerien ja olosuhteiden vaikutuksesta. Asidogeneesi on anaerobisen mädätyksen nopein vaihe, joten jos raaka-aineella ei ole puskurointikapasiteettia ja orgaaninen kuormitusaste on liian korkea, voi haihtuvien rasvahappojen kertyminen aiheuttaa pH:n tippumisen, mikä inhiboi metanogeeneja ja metaanintuotantoa viimeisessä vaiheessa (Nagao et al. 2012; C. Zhang et al. 2014). Kolmas vaihe on asetogeneesi. Siinä homoasetogeneettiset mikroorganismit pelkistävät vetyä ja hiilidioksidia etikkahapoksi (Braguglia et al. 2018). Aseto-

geeniset bakteerit voivat selviytyä vain, jos vetypitoisuus on hyvin alhainen, joten liiallinen vedyntuotanto asidogeneesissa voi inhiboida näitä bakteereja. Viimeisessä vaiheessa, metanogeneesissa, metaania tuotetaan anaerobisissa olosuhteissa hyödyntämällä edellisissä vaiheissa syntyneitä tuotteita, kuten vetyä ja asetaattia. Näiden monimutkaisten biologisten reaktioiden ketjun ja mädätysvaiheiden vahvan keskinäisen yhteyden takia orgaanisten aineiden anaerobinen mädätys perustuu herkkään tasapainoon, jonka muutokset voivat aiheuttaa epätasapainoa reaktorissa ja vähentää metaanintuotantoa. Reaktorin ylikuormituksen aiheuttama happamoituminen, joka tapahtuu haihtuvien rasvahappojen kerääntymisen seurauksena, on yksi yleisimmistä syistä prosessin heikentymiselle (Kawai et al. 2014; El-Mashad ja R. Zhang 2010; Nagao et al. 2012; Ventura et al. 2014). Tästä johtuen metanogeneesi on nopeutta rajoittava vaihe hiilihydraattirikkaan ruokajätteen mädätykselle (Braguglia et al. 2018). pH on yksi tärkeimmistä anaerobiseen mädätykseen vaikuttavista parametreistä, sillä prosessin mikro-organismit ovat herkkiä sen vaihteluille ja jokaisella vaiheella on sille eri herkkyys.

2.2.2 Mädätysprosessiteknologia

Anaerobista mädätystä käytetään monissa erilaisissa teknisissä sovelluksissa orgaanisen kiinteän jätteen käsittelyssä kaasun tuotantoon ja jätteen stabilointiin (Stentiford ja Bertoli 2010). Teknologiat soveltuvat monenlaisille orgaanisille aineksille, kuten jätevesilietteelle, yhdyskuntajätteen orgaaniselle kiinteälle jakeelle, vahvoille teollisuuden jätevesille, lannalle ja erityyppisten orgaanisten jätteiden seoksille. Anaerobisen mädätyksen hyötyjä ovat pieni tilantarve, vähentyneet hajupäästöt ja energiantuotanto (Lin et al. 2018). Huonoja puolia taas ovat suhteellisen hidas hajoaminen, systeemin epävakaus, suuri investointi ja mädätteen käsittely. Mädätysprosessit voidaan luokitella prossessin vaiheiden määrän, prosessilämpötilojen, kuiva-ainemäärän sekä substraatin syöttötavan perusteella (Gomez 2013).

Ennen kuin raaka-aineena käytetty biomassa pääsee mädätysreaktoriin, tulee se esikäsitellä prosessin optimoimiseksi ja suojelemiseksi (Stentiford ja Bertoli 2010). Esikäsittelyn tarve riippuu raaka-aineesta ja sen soveltuvuudesta prosessille. Esikäsittelyn tehtävä on tarpeettomien ja prosessia häiritsevien kohteiden, kuten muovipussien, poistaminen, biomassan koon pienentäminen ennen mädätystä ja tarvittaessa biomassan hygieeninen käsittely. Tarve orgaanisen jätteen esikäsittelylle riippuu kerätystä jätteestä ja prosessivaiheiden asettamista tarpeista. Esikäsittelyn on pystyttävä poistamaan kaikenlaiset väärin lajitellut esineet saapuvasta jätteestä.

Useimmat biokaasulaitokset toimivat yhden vaiheen järjestelmällä, mikä tarkoittaa, että kaikki mikrobiologisen hajottamisen vaiheet tapahtuvat samassa reaktorissa (Bachmann 2013). Tämän prosessin vahvuudet ovat yksinkertainen käsittely ja alhaiset investointikustannukset. Kaksivaiheisessa prosessissa hydrolyysi tapahtuu erillään muusta proses-

sista, jolloin pH, lämpötila ja viipymä voidaan optimoida jokaiselle vaiheelle erikseen. Tämä mahdollistaa paremman hajoamisen ja sitä suositellaan paljon sokereita, tärkkelystä ja proteiineja sisältäville substraateille. Hydrolyyttisen vaiheen aikana helposti hajoavat aineet tuottavat paljon happoja, jotka inhiboivat metaanintuottoa yksivaiheisessa systeemissä.

Optimaaliset toimintaolosuhteet eri vaiheille eroavat, ja siksi vaiheittainen prosessiteknologia voi olla suotuisa (Stentiford ja Bertoli 2010). Yleensä käytetään enintään kahta vaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan asidogeneesi ja toisessa vaiheessa metaanogeneesi, muuntaen hapot metaaniksi. Optimaalisempien olosuhteiden saaminen eri prosesseille tarkoittaa monimutkaisempaa rakennetta ja yleensä myös vaikeampaa prosessin ohjausta. Sekä yksi- että kaksivaiheisia prosesseja käytetään, vaikka yksivaiheiset prosessit ovat yleisempiä. Vaiheistettuja prosesseja käytetään yhdessä vaiheittaisissa prosesseissa, missä biomassan happamoitumisen jälkeen se erotetaan kiinteään jakeeseen, jota käsitellään edelleen happamoitumisvaiheessa, ja nestemäiseen jakeeseen, jossa on paljon happoja ja joka ohjataan metaanogeneesivaiheeseen. Näin tehtäessä saadaan paljon suurempi metaanintuotantoaste. Vaiheistettuja prosesseja suositaan osana nopeaa vaiheittaista prosessia. Vain harvoissa laitoksissa vaiheet on erotettu, sillä vaiheiden erottaminen on vaikeaa ja se heikentää prosessin stabiiliutta.

Prosessivaiheiden määrän lisäksi teknologiat voidaan luokitella kuiva- ja märkäprosesseihin (Stentiford ja Bertoli 2010). Tämä jako perustuu kosteuspitoisuuteen biologisessa reaktorissa. Tällä hetkellä käytössä on kolme erityyppistä mädätysteknologiaa riippuen raaka-aineen kiintoainepitoisuudesta: märkä-, semikuiva- ja kuivaprosessi (Braguglia et al. 2018). Kuivamädätyksessä raaka-ainetta käsitellään panos- tai jatkuvatoimisessa prosessissa, mutta se saattaa aiheuttaa korkeampia kustannuksia. Kuivamädätyksen suosio johtuu reaktoreiden pienemmästä koosta ja jäteveden tuotannosta. Kuivaprosessissa kosteuspitoisuus on alle 75 %, ja biomassan ulkonäkö muistuttaa paksua lietettä (Stentiford ja Bertoli 2010). Märkäprosessissa kosteuspitoisuus on yli 90 %, ja biomassan ulkonäkö on nestemäinen. Semikuivan prosessin kosteuspitoisuus on kahden edellä mainitun väliltä (75-90 %) (Braguglia et al. 2018). Prosessin kosteuspitoisuuden valinta perustuu jätteen kosteuspitoisuuteen (Stentiford ja Bertoli 2010). Puutarhajätteitä käsitellään yleisesti kuivaprosesseilla, kun taas nestemäiset teollisuusjätteet vaativat märkäprosessin. Kuitenkin myös mädätteen hallinta ja ammoniakin inhibointi voivat vaikuttaa valintaan. Mikäli märkä jäännös voidaan hyväksyä lannoitteeksi maatalouteen, voidaan valita märkäprosessi. Jos mädäte on jätevettä, joka on käsiteltävä perinteisessä jätevedenpuhdistamossa, kuivaprosessi on suositeltava, koska siinä ei tuoteta tai tuotetaan vain hyvin vähän märkää mädätettä. Suuri typpipitoisuus jätteessä voi johtaa korkeisiin ja inhiboiviin ammoniakkipitoisuuksiin reaktorissa, ja koska vettä käytetään laimentamiseen märkäprosessissa, tällainen jäte on parasta käsitellä märkäprosessissa. Jos substraatin kuiva-ainepitoisuus ylittää 20 %, käytetään mädätykseen yleisesti kuivamädätystä (Go-

mez 2013). Kuivamädätyksessä substraattia ei sekoiteta vaan sen lävitse virtaa nestettä. Prosessin päätyttyä jälkeen reaktori avataan ja sieltä poistetaan mädäte. Kuivamädätyksessä raaka-ainetta käsitellään panos- tai jatkuvatoimisessa prosessissa, mutta se saattaa aiheuttaa korkeampia kustannuksia (Braguglia et al. 2018).

Panosreaktoreiden lisäksi voidaan käyttää tulppavirtausreaktoreita, joissa substraattia sekoitetaan hitaasti pyörivillä sekoittimilla, jolloin se etenee läpi pitkän horisontaalisen reaktorin (Gomez 2013). Tällöin saadaan ehkäistyä aineen liian nopea kulkeutuminen reaktorin läpi ja saadaan substraatti pysymään reaktorissa tarpeeksi pitkään hygienisoinnin saavuttamiseksi. Verrattuna kokosekoitettuun märkäprosessiin, tulppavirtausreaktori toimii yleensä myös korkeammilla kuiva-ainepitoisuuksilla per kuutiometriä reaktorin tilavuutta kohti. Kuivamädätyksessä massa ei virtaa samalla tavalla kuin märkämädätyksessä, joten se ei myöskään sekoitu yhtä hyvin (Stentiford ja Bertoli 2010). Tämän vuoksi sekoituksen tulee kattaa koko käsiteltävä massa. Ilman kunnollista sekoittamista kaasu voi myös jäädä kuivaprosesseissa biomassaan, joten kaasun vapauttamiseksi tarvitaan hyvin varovaista sekoittamista. Muita kuivamädätyksen yleisiä ongelmia ovat sedimentoituminen ja lämmön tasainen jakaantuminen koko massaan (Scholwin ja Nelles 2013). Lisäksi biokaasulaitoksilla, joissa on korkea kiintoainepitoisuus reaktorissa, on huomattu itsestään lämpenemistä. Tämä johtuu siitä, että anaerobinen hajoaminen on lievästi eksoterminen biologinen reaktio. Jo yhden celsiusasteen muutos voi vähentää mikrobiologista aktiivisuutta ja täten myös biokaasun saantia.

Vaiheiden määrän ja kuiva-ainepitoisuuden lisäksi reaktorit voidaan luokitella prosessilämpötilan mukaan eri luokkiin, psykrofiiliseen (10-25 °C), mesofiiliseen (25-45 °C) ja termofiiliseen (50-58 °C) (Bachmann 2013). Nämä lämpötilavälit eroavat toisistaan merkittävästi parametreiltään ja bakteerikannaltaan ja niiden valinnalla on iso merkitys mädätysprosessiin. Prosessilämpötilan valinta on tasapainottelua useiden tekijöiden välillä (Stentiford ja Bertoli 2010). Korkeampi lämpötila edistää nopeampaa biologista hajoamista, ja joitakin materiaaleja on helpompi käsitellä korkeassa lämpötilassa. Kuitenkin termofiilista prosessia on vaikeampi käyttää, ja suurempi lämmityksen sekä eristyksen tarve lisäävät käsittelyn kustannuksia. Joissakin maissa hygienisointivaatimus suosii termofiilisia prosesseja, koska mädätys voi olla osa hygienisointiprosessia, kun taas toiset maat vaativat erillisen hygienisoinnin, jolloin korkean lämpötilan hyöty on vähäisempi. Psykrofiiliset olosuhteet esiintyvät reaktoreissa, joissa ei ole lämmitystä (Bachmann 2013). Tällaisia reaktoreita voivat olla pienet yksityiskäytössä olevat reaktorit, mutta korkeaa tehokkuutta vaativille laitoksille ne ovat liian hitaita. Yleisimmin käytössä olevat reaktorit ovat mesofiilisia, sillä ne tarjoavat tyydyttävän viipymisajan, maltillisen energiankulutuksen ja stabiilin toiminnan (Braguglia et al. 2018). Termofiilisia lämpötiloja käytetään pääasiassa substraateille, joissa on hygieniariski, kuten ruokajätteillä (Bachmann 2013). Laitoksilla, joissa on käytössä useampi kuin yksi reaktori, termofiiliset ja mesofiiliset reaktorit voidaan yhdistää siten, että substraatti kulkee joko molempien tai vain toisen kautta riippuen pa-

togeeniriskistä ja mädätysasteesta. Jätettä on aina esilämmitettävä valitun prosessilämpötilan saavuttamiseksi (Stentiford ja Bertoli 2010). Yleensä lämmönvaihdin riittää siirtämään lämpöä lähtevästä mädätteestä saapuvaan jätteeseen. Termofiilisessä mädätyksessä tarvitaan enemmän lämmitystä, jolloin ylimääräinen lämpö kaasumoottoreista tai kaasun poltosta voidaan käyttää tähän tarkoitukseen.

2.2.3 Mädätysprosessiin vaikuttavat tekijät

Anaerobinen mädätys on herkkä muutoksille ja pienetkin heilahdukset tasapainotilasta saattavat vähentää prosessin tehokkuutta. Tämä tarkoittaa orgaanisen aineen heikompaa hajoamista ja vähäisempää biokaasun muodostusta. Mädätysprosessiin vaikuttavia tekijöitä on listattu taulukkoon 2.1.

Mädättyvyys on anaerobisen mädätyksen raaka-aineen tärkein parametri (Biosantech et al. 2013). Materiaalin mädättyvyys riippuu helposti mädättyvien yhdisteiden, kuten yksinkertaisten sokereiden, määrästä. Toisaalta se voi myös sisältää erilaisia heikosti hajoavia yhdisteitä, kuten lignoselluloosaa. Raaka-aineen koostumus määrittää hajoamiseen tarvittavan ajan ja siten viipymän reaktorissa. Matala molekyylipainoiset hiilihydraatit, haihtuvat rasvahapot ja alkoholit hajoavat tunneissa, proteiinit, hemiselluloosa ja lipidit päivissä, kun taas selluloosa vaatii viikkoja hajotakseen anaerobisissa olosuhteissa. Substraatit, jotka koostuvat rasvoista ja öljyistä ja joilla on korkea metaanintuottopotentiaali, vaativat pidemmän viipymän ja suuremman reaktoritilavuuden verrattuna hiilihydraatteja ja proteiineja sisältävään substraattiin. Syötteen hiili-typpisuhteen ollessa liian korkea, mikrobeille ei ole tarpeeksi typpeä tarjolla, minkä takia niiden toiminta heikkenee ja biokaasua syntyy vähemmän. Reaktoreita käytetään taloudellisista syistä lyhimmällä viipymällä ja suurimmalla metaanin tuotolla. Aina mädätys ei ole teknisesti mahdollista, esimerkiksi raaka-aineen suuren puutarhajätepitoisuuden kanssa sen sisältämän ilman happea hajoamattoman ligniinin vuoksi (European Environment Agency 2020). Tämän takia syöte ja käytetty teknologia tulee valita tarkasti.

Kalsium, magnesium, natrium ja kalium voivat suurissa pitoisuuksissa inhiboida prosessia, mutta pienissä määrissä ne tehostavat sitä (Stentiford ja Bertoli 2010). Optimaalisen prosessitehon saavuttamiseksi tarvitaan monia mikroravinteita, erityisesti nikkeli ja kobolti ovat tärkeitä anaerobisten organismien kasvulle. Lämpötila vaikuttaa syötteen viskositeettiin, mikä puolestaan vaikuttaa pumppaamisen ja sekoittamisen helppouteen, ja diffuusiokykyyn, sekä määrittää, minkälaiset mikrobit kulloinkin kukoistavat reaktorissa.

Yleisiä inhibiittoreita ovat muun muassa pesuaineet, antibiootit, suolat ja pH:n vaihtelua aiheuttavat aineet (Stentiford ja Bertoli 2010). Raaka-aineesta ja keräämistavasta riippuen syöte voi sisältää erilaisia vierasaineita, joita ovat kaikki maatumattomat ainekset, kuten metallit, hiekka, muovit, ja lasi (Biosantech et al. 2013). Päästessään reaktoriin ne voivat aiheuttaa häiriöitä normaaliin toimintaan. Yleisiä ongelmia ovat hiekan sedi-

Taulukko 2.1. *Mädätysprosessiin vaikuttavat tekijät.*

Vaikuttaja	**Merkitys**
Biojätteen koostumus	Vaikuttaa merkittävästi mädätysprosessin suunnitteluun ja tehokkuuteen sekä metaanintuottopotentiaaliin. (Biosantech et al. 2013)
Ravinteet	Toimiakseen kunnolla mädätysprosessi vaatii riittävästi ravinteita, kuten typpeä, fosforia ja kaliumia. (Stentiford ja Bertoli 2010)
Lämpötila	Vaikuttaa sekä fysikokemiallisiin muuttujiin että mikrobiologisiin prosesseihin, tulee olla tasainen. (Stentiford ja Bertoli 2010)
Hiili-typpisuhde	Optimaalinen välillä 20:1-30:1. (Dioha et al. 2013)
Inhibiittorit	Reaktiiviset inhibiittorit reagoivat mikrobisolun funktionaalisenryhmän kanssa tehden sen täysin toimintakyvyttömäksi, kun taas ei-reaktiiviset häiritsevät mikrobien toimintaa niitä kuitenkaan tappamatta. (Stentiford ja Bertoli 2010)
Ilma	Prosessissa ei saa olla ilmaa tai happea, jotta anaerobiset bakteerit pystyvät toimimaan. (Biosantech et al. 2013)
pH	Optimaalinen välillä 6,8-7,2. (Cioabla et al. 2012)
Sekoittaminen	Mädätteen sekoittaminen on tärkeää, jotta substraatti, mikro-organismit ja lämpö leviävät tasaisesti reaktorissa. (Biosantech et al. 2013)
Syötteen mädättyvyys	Suora vaikutus metaanintuotantoon ja se kertoo, kuinka hyvin substraatti hajoaa mädätyksessä. (Biosantech et al. 2013)
Epäpuhtaudet	Päästessään reaktoriin voivat aiheuttaa häiriöitä normaaliin toimintaan. (Biosantech et al. 2013)
Viipymäaika	Kun viipymäaika on pitkä, saadaan parempi tulos orgaanisen aineen hajotuksessa sekä tuotetun biokaasun määrässä. Viipymäajan ollessa liian lyhyt voi reaktori ylikuormittua, mikä vähentää biokaasuntuottoa ja syötteen hajoamista. Tyypillisesti käytetty viipymä on Suomessa 12-30 vrk. Mesofiilisille prosesseille suositus on 21 vrk. (Pirkkamaa 2014)
Ammoniakki	Toimii inhibiittorina, erityisesti syötteen typpipitoisuuden ollessa korkea ja hiili-typpisuhteen ollessa matala (X. Wang et al. 2014).

mentoituminen reaktorin pohjalle, mikä pienentää käytettävissä olevaa reaktoritilavuutta, vaahtoamisen aiheuttama prosessihäiriö, faasien erottuminen ja kelluvat kerrokset, tai laitteiston, kuten pumppujen vaurioituminen metallien ja muiden epäpuhtauksien takia. Märkäprosesseissa epäpuhtaudet erotellaan monimutkaisilla esikäsittelymenetelmillä. Tulppavirtaus- ja kuivaprosesseissa epäpuhtaudet voidaan poistaa myös mädätyksen jälkeen. Sekoittaminen auttaa vapauttamaan kaasukuplat mädätteestä ja estää kelluvien

tai laskeutuvien kerrosten muodostumisen (Bachmann 2013). Sekoitus tapahtuu jokaiselle laitokselle erikseen määritettävissä jaksoissa.

2.2.4 Biokaasu

Bakteerit käyttävät orgaanista ainesta muodostaakseen biokaasua ilmatiiviissä mädätysreaktorissa (Gomez 2013). Reaktorissa olevat bakteerit ovat samankaltaisia märehtijöiden esimahoista löytyvien bakteereiden kanssa. Biokaasu on CO_2-neutraali biopolttoaine ja sitä voidaan käyttää samoihin tarkoituksiin kuin maakaasua (Kaparaju ja Rintala 2013). Biokaasun kalorimetriarvo vaihtelee välillä 19,7-23,3 MJ/m^3 (Petersson ja Wellinger 2009; Rasi et al. 2007). Biokaasun energiasisältö on merkittävä ja ylittää yleensä anaerobisen mädätyksen vaatiman energiamäärän (Stentiford ja Bertoli 2010). Kuten maakaasussa, biokaasun pääkomponentti, joka määrittää kaasun energiapitoisuuden, on metaani (CH_4). Anaerobisesti mädätetyn jätteen biokaasu sisältää yleensä 55–65 % CH_4:ää ja 35–45 % CO_2:ta. Ammoniakki (NH_3), divetysulfidi (H_2S) ja lukuisat haihtuvat orgaaniset yhdisteet muodostavat yleensä alle 1 % biokaasusta.

Biokaasun tuotannossa tapahtuu yleisesti vaihtelua (Bachmann 2013). Tuotannon vaihtelun aiheuttaman ennustamattomuuden minimoimiseksi ja jatkuvan syötön takaamiseksi muunninyksikköön, biokaasu kerätään ja säilötään väliaikaisesti. Tämän puskurikapasiteetin avulla voidaan tasata epäsäännöllistä energiankulutusta. Varastointitilan tulee olla ilmatiivis ja sen tulee kestää painetta, UV-säteilyä, lämpötilan vaihtelua ja voimakkaita sääilmiöitä. Ali- ja ylipaineen havaitsemiseksi varastointitilassa tulee olla sensorit.

Biokaasua voidaan käyttää sähkön ja lämmön tuotantoon tai se voidaan jalostaa biometaaniksi liikenteen käyttöön tai kaasuverkkoon syötettäväksi (Carliell-Marquet et al. 2018). Ennen kuin biokaasu voidaan muuntaa sähköksi, tulee vesihöyryllä kyllästetty biokaasu puhdistaa rikinpoistolla ja kuivaamisella (Kaparaju ja Rintala 2013). Rikinpoiston ja kuivauksen jälkeen biokaasua voidaan käyttää sähkön ja lämmön yhteistuotantoon siihen tarkoitetulla voimalaitoksella (combined heat and power (CHP)) tai se voidaan polttaa lämmön tuottamiseksi. CHP-laitoksilla sähköä tuotetaan polttamalla palavaa polttoainetta (maakaasu tai biokaasu) ja lämpö kerätään talteen lämmöntalteenottoyksiköllä syntyneistä pakokaasuista. Tämä lämpö voidaan muuttaa termaaliseksi energiaksi, yleisesti höyryn tai kuuman veden muodossa. Lämmöksi muuntamisen hyötysuhde on tyypillisesti 75-85 % (Krich et al. 2005). Nykyaikaisten CHP-yksiköiden kokonaishyötysuhde on 85-90 %, mikä tarkoittaa, että vain 10-15 % energiasta menee hukkaan (Kallio 2010). Sähköntuotannon hyötysuhde on kuitenkin ainoastaan 40 %, mikä on hyvin alhainen ja sähköä voidaan tuottaa vain 2,4 kWh yhdestä kuutiosta biokaasua (Deublein ja Steinhauser 2008). Siksi on tärkeää, että lämmön käyttökohde on lähellä laitosta (Kaparaju ja Rintala 2013).

2.2.5 Mädäte

Mädäte, joka on biokaasun tuotannon mädätetty poiste, koostuu raaka-aineista, joista on poistettu biokaasu anaerobisessa mädätyksessä, eikä se hajoa lisää anaerobisissa olosuhteissa (Seadi et al. 2013). Mädätteen koostumus on siis riippuvainen raaka-aineen koostumuksesta ja laadusta. Helposti saatavilla olevien mikro- ja makroravinteiden sekä orgaanisten aineiden sisällön pitoisuuksista johtuen mädäte on arvokas lannoite ja maanparannusaine, jota voidaan käyttää raa'an eläinlannan tavoin. Käyttöä lannoitteena pidetään kestävimpänä tapana hyödyntää mädätettä, sillä näin siitä on hyötyä yhteiskunnalle ja ympäristölle, ja sen avulla saadaan vähennettyä fossiilisten resurssien, kuten mineraalisen fosforin, tarvetta.

Riippuen mädätteen käyttötarkoituksesta ja sille asetetuista vaatimuksista voidaan sitä käyttää sellaisenaan tai sitä voidaan jalostaa mädätteen käsittelyllä (Seadi et al. 2013). Tunnetuin menetelmä yksinkertaisuutensa ja halvan hintansa vuoksi on mädätteen erottelu nestemäiseen ja kiinteään jakeeseen dekantterilingolla tai ruuvipuristinerottimilla. Mädätteen säilytys, kuljetus, käsittely ja levitys lannoitteena aiheuttavat merkittäviä kustannuksia maanviljelijöille verrattuna lannoitteen arvoon johtuen sen suuresta tilavuudesta ja alhaisesta kuiva-ainepitoisuudesta.

Mikäli mädätteessä on fyysisiä epäpuhtauksia, kuten näkyviä muovinpalasia kierrätyspusseista, lannoitteen laatu heikkenee ja sen yhteiskunnallinen hyväksyttävyys voi vähentyä (Seadi et al. 2013). Tietyt epäpuhtaudet ovat haitallisia myös ympäristölle. Parhaiten biojätteeseen päätyvien epäpuhtauksien määrää voidaan minimoida keräämällä biojätteet erilliseen biohajoavaan pussiin. Hajoamattomat aineet voidaan myös erottaa substraatista seulojen ja muiden fyysisten erottimien avulla. Ruokajätteen käsittelystä syntynyt mädäte soveltuu maatalouteen lannoitteeksi hyvän ravinnepitoisuutensa, käytettävyytensä ja bioturvallisuutensa vuoksi (Tampio 2016).

2.3 Kompostointi

2.3.1 Kompostointiprosessi ja kompostointitekniikat

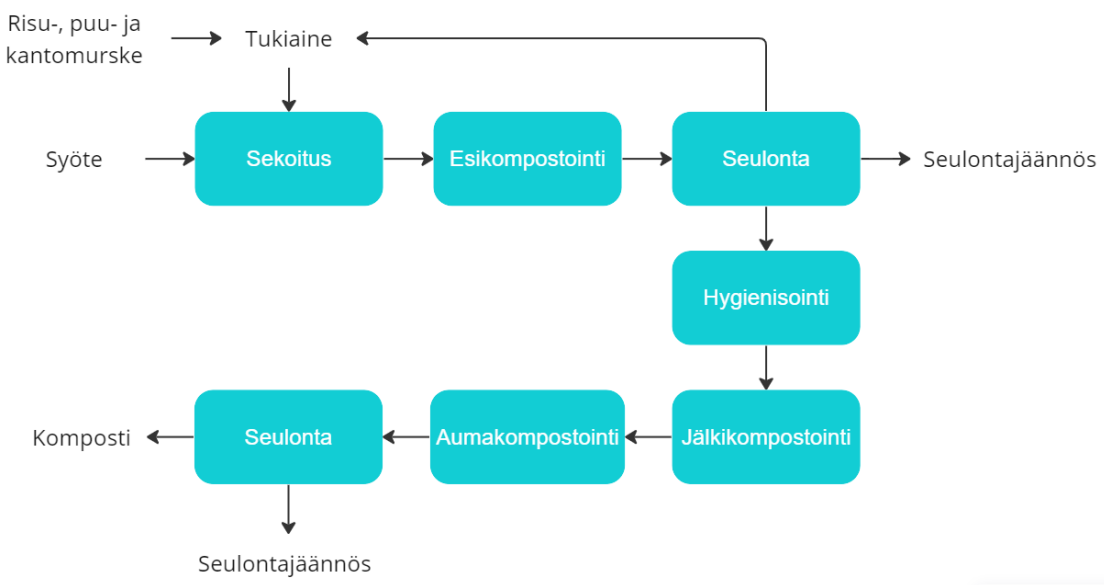
Kompostointi on kiinteän orgaanisen aineen aerobista hajottamista, jonka tavoitteena on hajottaa orgaanista ainetta nopeasti ja hygienisoida se (Stentiford ja Bertoli 2010; Swati ja Hait 2018). Kompostoinnissa mikrobit muuntavat ja stabiloivat aerobisesti heterogeenista orgaanista ainesta aerobisissa olosuhteissa (Stentiford ja Bertoli 2010). Kompostoinnin hyviä puolia ovat nopea hajoaminen, matala investointikustannus ja kompostin käyttäminen maanparannusaineena (Lin et al. 2018). Huonoja puolia ovat suuri tilantarve, haju- ja kasvihuonekaasupäästöt, syntyvät suotovedet ja energiankulutus. Kompostointi on eksoterminen reaktio eli se vapauttaa energiaa (Stentiford ja Bertoli 2010). Osa tästä ener-

giasta (noin 50-60 %) menee mikro-organismien käyttöön ja loput hukataan lämpönä. Tämä hukkalämpö voi nostaa massan lämpötilaa. Kompostissa esiintyvät mikro-organismit koostuvat bakteereista, sädesienistä ja sienistä. Mikrobit tuottavat hapellisissa olosuhteissa vettä, hiilidioksidia, haihtuvia yhdisteitä, humuspitoista maanparannusainetta, eli kompostia, sekä lämpöä (Albers et al. 2003). Raaka-aineiden tulee olla sellaisia, että mikrobit pystyvät niitä hyödyntämään energiaksi ja uusien mikrobisolujen synnyttämiseksi. Kompostoinnin mikrobikoostumus vaihtelee voimakkaasti kompostointivaiheesta toiseen. Mikrobiologian näkökulmasta kompostointi on jaksottainen prosessi johtuen mikrobiyhteisöjen peräkkäisestä kehittymisestä (Stentiford ja Bertoli 2010). Kompostointiprosessiin osallistuvat mikro-organismit ovat yleensä läsnä jo lähtömateriaalissa. Inokulaattia tarvitaan vain, jos lähtömateriaalissa ei ole tarpeeksi mikro-organismeja.

Kompostoinnin ensimmäinen vaihe on mesofiilinen ja aloittaa helposti hajoavan orgaanisen aineen aerobisen hajoamisen (Stentiford ja Bertoli 2010). Se on on nopea prosessi, jossa vapautuu paljon lämpöä, mikä samalla nostaa kompostin lämpötilaa ja nopeuttaa hajoamista. Muutaman päivän kuluttua tämä johtaa termofiiliseen vaiheeseen. Termofiilisen vaiheen tunnusmerkki on korkeat lämpötilat tuoreen raaka-aineen sekoituksen jälkeen (Swati ja Hait 2018). Ilman kontrollia lämpötila voi nousta jopa yli 70 °C:een (Stentiford ja Bertoli 2010). Korkealla lämpötilalla saadaan eliminoitua jätteessä olevat taudinaiheuttajat. Kontrolloidussa kompostointiprosessissa tämä vaihe on rajattu lämpötilaltaan ja kestoltaan, jotta saavutetaan optimaalinen tasapaino stabilisaation ja hygienisaation välille. Kolmas vaihe eli kypsytys sisältää sekä hitaasti hajoavien molekyylien mineralisaation että lignoselluloosayhdisteiden kostutuksen. Tämä vaihe voi kestää viikkoja riippuen lähtömateriaalin koostumuksesta. Mikrobisessa muokkauksessa syntyneet välimetaboliitit voivat tehdä kompostista fytotoksista. Aivan prosessin lopussa tämä fytotoksisuus katoaa ja kompostista tulee kasveille soveltuvaa. Kuvassa 2.2. on esimerkki kompostointiprosessista.

Kompostointitekniikat voidaan jakaa auma- ja reaktorikompostointiin (Stentiford ja Bertoli 2010). Aumakompostoinnissa kompostoitava materiaali kootaan pitkiksi aumoiksi kovalle alustalle. Aumakompostointi voi tapahtua joko avoaumassa tai suljetussa aumassa. Aumoja voidaan ilmastaa kääntämällä niitä koneellisesti tai käyttämällä koneellista ilmastusta. Kääntämisen tarkoituksena on tehdä kompostista huokoista ja tasalaatuista kosteuden ja lämpötilan tasaamisella optimaalisen lopputuotteen varmistamiseksi. Tällöin aumoihin ei myöskään pääse muodostumaan anaerobisia taskuja, joissa syntyisi metaanipäästöjä. Aumakompostoinnin suurimmat heikkoudet ovat tilantarve, pitkä käsittelyaika (noin vuosi), prosessin epätasaisuus, tuotteen vaihteleva laatu ja hajuhaitat (Pirkkamaa 2014). Tämän takia aumakompostointia käytetään vähintään 6 kuukautta kestävässä biojätteen käsittelyn jälkikypsytyksessä ja laitoksen huollosta tai kapasiteetin puutteesta johtuen.

Verrattuna aumakomposteihin, reaktorikompostoreissa on vain vähän ilmatilaa kompostin yläpuolella, mikä vähentää puhdistettavien kaasujen määrää (Stentiford ja Bertoli 2010).



Kuva 2.2. *Esimerkki koko kompostointiprosessista.*

Lisäksi kompostin ilmastusta ja olosuhteita on helpompi ohjata. Reaktorikompostointiin käytetään muun muassa tunneli- ja rumpukompostointia ja sitä käytetään erityisesti jätevesilietteen, yhdyskuntajätteen ja eläinten lannan käsittelyyn. Tunnelikompostointi tapahtuu yleensä teräsbetonisessa tunnelissa, jossa tukiaineen kanssa sekoitettu biojäte hajoaa ilmastuksella luoduissa optimaalisissa olosuhteissa (Pirkkamaa 2014). Tunnelivaihetta voi myös seurata ilmastetussa hallissa suoritettava jälkikypsytysjakso, jonka jälkeen massa siirretään aumoihin.

2.3.2 Kompostointiprosessiin vaikuttavat tekijät

Kompostoinnin syötteen koostumus ja ominaisuudet, kuten ravinteiden saatavuus ja ravinnetasapaino, sekä kompostointitekniikan tehokkuus ja kesto vaikuttavat prosessin toimivuuteen (Stentiford ja Bertoli 2010). Prosessin parametrit, kuten pH, ilmastusaste, hiilityppisuhde ja huokoisuus, tulee asettaa käsiteltävän jätteen ominaisuuksien mukaan (Cerda et al. 2018). Virheet alkujärjestelyissä, täyteaineen lisäämisessä ja prosessinohjauksessa voivat johtaa hajupäästöihin, lisääntyneisiin ympäristövaikutuksiin ja matalalaatuiseen kompostiin. Tyypillisessä kompostointilaitoksessa käsitellystä biojätteestä hajoaa noin 60 % (Krogmann 1994). Syötteellä, jolla on alhainen hajoamisaste, voi olla riittämätön itselämpeneminen, erityisesti kylminä vuodenaikoina (Stentiford ja Bertoli 2010).

Optimaalinen kosteuspitoisuus on syötteestä riippuvaista ja vaihtelee välillä 40-70 % (Stentiford ja Bertoli 2010). Jos kosteuspitoisuus on alle 12-25 %, biologinen aktiivisuus on hyvin vähäistä. Optimaalisesta kosteuspitoisuudesta korkeammat kosteuspitoisuudet vähentävät hapen saatavuutta, mikä suosii anaerobista hajoamista ja hajuhaittojen muodostumista. Yleensä syötteet ovat taipuvaisia olemaan liian märkiä. Kuivan täyteaineen,

kuten puulastujen, silputun kuoren, sahanpurun tai kierrätetyn kompostin lisääminen on yleinen käytäntö alkuperäisen kosteuspitoisuuden alentamiseksi, mikä voi kuitenkin lisätä kompostimassaa merkittävästi.

Tärkein osa kompostoinnissa on riittävä hapen määrä, minkä vuoksi ilmastus on kriittistä (Cerda et al. 2018). CH_4 hapettuu kulkeutuessaan materiaalin läpi kompostissa (Swati ja Hait 2018). Hapettuminen on vahvasti kytköksissä hapen saatavuuteen. Säännöllinen kääntäminen vähentää CH_4-päästöjä, mutta lisää N_2O- ja NH_3-päästöjä. Kääntäminen lisää mikrobien hapensaantia niiden altistuessa hapelle, ja lisää huokoisuutta. Lisäksi lyhyempi kompostointiaika vähentää CH_4-päästöjä. Myös hyvin toimivassa kompostointiprosessissa esiintyy anaerobisia alueita, mikä muuttaa mikrobien käyttämiä metabolia-reittejä, jolloin voi syntyä kaasumaista typpeä ja ammoniakkia, vetykaasua tai rikkivetyä (Albers et al. 2003).

3. BIOJÄTTEEN KIERRÄTYSPROSESSIN KEHITTÄMINEN

Tässä luvussa käsitellään biojätteen anaerobisessa mädätyksessä syntyvän mädätteen käsittelyn vaihtoehtoja ja vaikutuksia prosessiin ja sen kestävyyteen. Vaikutukset voidaan luokitella ympäristövaikutuksiin sekä taloudellisiin vaikutuksiin tai molempiin.

3.1 Mädätteen käsittely

Mädätteessä olevien ravinteiden ja orgaanisen aineen kierrätys takaisin maaperään nähdään kestävimpänä tapana käyttää mädätettä (Seadi et al. 2013). Mädäte ja mädätejakeet voidaan käyttää lannoitteena, kompostituotantoon, maanparannusaineena, uudelleenmädätykseen, energiantuotantoon tai jopa eläinten ruokana. Mädätteen soveltuvuus jokaiseen käyttötarkoitukseen riippuu vahvasti sen koostumuksesta, laadusta ja paikallisesta ravinnetilanteesta.

3.1.1 Biojätteen käsittelyn ja mädätteen käsittelyn lainsäädäntö

Laissa säädetään biojätteen kierrätysasteesta, ilmastotavoitteista sekä mädätteen sopivuudesta lannoitevalmitukseen. Suomen valtakunnallisen jätesuunnitelman vuoteen 2027 tavoitteiden mukaan vuoteen 2030 mennessä ruokahävikki tulisi puolittaa, biojätteen kierrätysasteen tulisi nousta 65%:iin ja kierrätyslannoitevalmisteiden käytöllä tulisi korvata neitseellisiä lannoitevalmisteita entistä enemmän (Ympäristöministeriö 2022). Kierrätysastetta nostetaan lisäämällä erilliskeräystä kunnissa. Vuonna 2022 voimaan astui vähintään viiden huoneiston asuinkiinteistöjen biojätteen erilliskeräys ja sama tapahtuu kaikille asuinkiinteistöille yli 10 000 asukkaan taajamissa heinäkuussa 2024. Biojätteen erilliskeräyksen voi korvata kiinteistökompostoinnilla. Erilliskeräyksen lisäys nostaa kerätyn biojätteen määrää, jolloin tarve biojätteen käsittelylle myös kasvaa.

Ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi biokaasun tuotannon tulee kasvaa merkittävästi, jotta erityisesti liikenteen fossiilisia polttoaineita saadaan korvattua ja Suomen energiaomavaraisuutta saadaan nostettua (Ympäristöministeriö 2022). Nykyinen biokaasun vuosituotanto on noin 0,9 TWh, mutta tavoitteisiin pääsemiseksi yli sata uutta biokaasulaitosta tulisi rakentaa 2030 mennessä. Biojätteen käsittelylaitoksille on tarvetta elintarviketeolli-

suuden ja maatalouden lähettyvillä. On myös tarvetta uusille kehittyneille biojätteen käsittelymenetelmille ja niiden käyttöönotolle.

Uusien käsittelylaitosten lisäksi jo olemassa olevien laitosten kapasiteetti tulisi pystyä hyödyntämään täysin. 1990-luvulla rakennettu kompostointikapasiteetti alkaa olla osin elinkaarensa päässä ja kompostointilaitokset ovatkin jäämässä biokaasulaitosten jälkikäsittelylaitoksiksi (Ympäristöministeriö 2022). Uusia energiakäyttöä parempia hyödyntämismenetelmiä tulisi kehittää etusijajärjestyksen noudattamiseksi. Lisäkapasiteetin tarve yhdyskuntajätteen biologiselle käsittelylle on noin 290 000-370 000 tonnia. Nykyiset biokaasulaitokset eivät toimi vielä täydellä kapasiteetilla, joten uusien laitosten kapasiteetin tarve voi olla vähäisempi.

Lannoitevalmistelain (711/2022) mukaan lannoitevalmisteiden tulee olla turvallisia ja käyttötarkoitukseen sopivia, eikä niiden käyttöohjeiden mukaisesta käytöstä saa aiheutua vaaraa ihmisille, eläimille, kasveille tai ympäristölle. Maa- ja metsätalousministeriön asetuksen (MMMa) lannoitevalmisteista (964/2023) mukaan orgaanisen lannoitteen on sisällettävä vähintään yhtä pääravinnetta (N, P, K) 1,0 massaprosenttia. Pääravinteiden kokonaispitoisuuden on oltava yhteensä vähintään 2 massaprosenttia.

MMMa 964/2023:ssa määrätään myös, että erilliskerättyä biojätettä käytettäessä lannoitevalmistukseen, tulee se lämpökäsitellä vaarallisten kasvipatogeenien leviämisen ennaltaehkäisemiseksi. Kompostoinnilla ja mädätyksellä on omat vaatimuksensa lämpötilan ja palakoon suhteen, joilla saadaan varmistettua patogeenien eliminointi. Syntyvän kompostin ja mädätteen tulee täyttää tietyt stabiilisuuskriteerit, joita ovat muun muassa hiilidioksidintuotto, hapenottokyky ja kasvivaste. Lisäksi tuotteiden tulee täyttää tietyt rajat patogeenien, kuten *Salmonellan* ja *E. Colin*, suhteen.

3.1.2 Mädätteen lannoitekäyttö ja kompostointi

Mädätteen käsittelyä voidaan lähestyä kahdesta näkökulmasta (Seadi et al. 2013). Ensimmäisessä mädätteestä tuotetaan standardoitua biolannoitetta (kiinteä tai nestemäinen), jolloin mädätteen laatu ja markkinoitavuus nousevat. Toisessa ravinteet ja orgaaninen aine erotetaan jätevedestä, joka ohjataan jäteveden käsittelyyn. Usein molemmat toimenpiteet tulee suorittaa kestävän mädätteen käsittelyn saavuttamiseksi. Ensimmäinen vaihe jokaisessa mädätteen käsittelyprosessissa on erottelu korkean ja alhaisen kuiva-ainepitoisuuden jakeeseen. Molempia jakeita voidaan käyttää lannoitteena ilman jatkokäsittelyä. Erottelu jakaa suurimman osan fosforista kuiva-aineeseen ja typen nestemäiseen jakeeseen, mikä helpottaa ravinteiden annostelua oikeissa suhteissa. Ruuvipuristinerottimia käytetään yleisesti keskikokoisilla ja suurilla biokaasulaitoksilla, joissa mädätteessä on paljon kuituja. Jakeiden erottelun jälkeen kuiva-ainejaetta voidaan käsitellä kompostoimalla tai kuivaamalla.

Nestemäinen jae voidaan levittää pelloille korkeatyppipitoisena lannoitteena ilman käsittelyä (Seadi et al. 2013). Se voidaan myös syöttää takaisin anaerobiseen mädätykseen. Verrattuna kiinteään lannoitteeseen, nestejaetta on vaikeampi käyttää sen korkean ammoniumionikonsentraation vuoksi (H. Wang et al. 2020; Xia ja Murphy 2016).

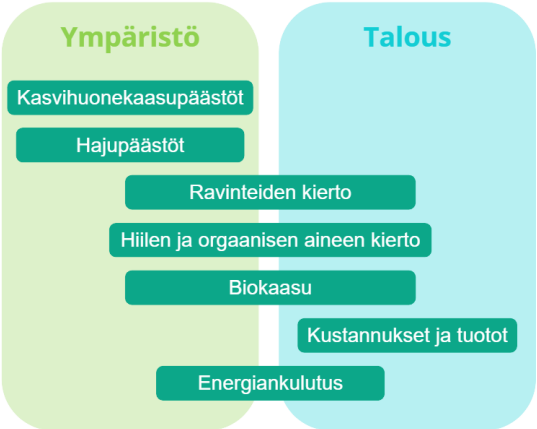
Taloudelliset näkökohdat vaikuttavat merkittävästi käsittelymenetelmien valintaan, sillä erotus johtaa aina rejektin muodostumiseen, mikä voi olla hyvin kallista eliminoida ja sisältää orgaanista materiaalia yhdessä erotellun materiaalin kanssa (Stentiford ja Bertoli 2010). Erotusjärjestelmien erotustehokkuus vaihtelee, ja väärin sijoitetun materiaalin erottamisen tarve ja hinta on tasapainotettava orgaanisen materiaalin menetyksen kanssa.

Lannoitekäytön lisäksi mädäte voidaan ohjata kompostointiprosessiin (European Environment Agency 2020). Tällöin mädäte sekoitetaan muun kompostin syötteen kanssa yhteen ennen varsinaisen kompostointiprosessin alkamista. Biojätteen käsittelylaitoksella kompostointi vie enemmän tilaa mädätteen lannoitekäyttöön verrattuna, sillä kompostiseos kootaan isoihin aumoihin joko ulos tai sisätiloihin. Kompostointiajat ovat pitkiä, minkä takia aumat pysyvät pitkään paikoillaan ennen kuin lopputuote on valmista. Ulkona olevat avoaumat ovat merkittävä kasvihuonekaasu- ja hajupäästöjen lähde. Lisäksi Suomen kylmän talven vuoksi koko aumakompostointiprosessi on käytännössä pysähdyksissä lämpötilan ollessa liian matala mikrobien toimintaa varten. Kompostointi vaatii myös enemmän energiaa erityisesti ilmastuksen ja työkoneiden operoinnin vuoksi.

Monesti biojätteen käsittelylaitoksilla on käytössä sekä mädätys- että kompostointiprosessi. Jos mädäte käsitellään kompostoimalla, voi kompostoinnin kapasiteetti rajoittaa käsiteltävän mädätteen määrää ja täten myös mädätettävän syötteen määrää. Mädäte on kosteampaa kuin laitokselle tuotava biojäte, minkä vuoksi kompostointiin tulee lisätä merkittävä määrä myös tukiainetta, jolloin käsiteltävän kompostin määrä kasvaa entisestään. Tämä kompostoinnin luoma kapasiteettiraja tulee ottaa huomioon mädätteen käsittelymenetelmää valittaessa, jotta laitosta voidaan operoida maksimiteholla. Monia mädätyslaitoksia ajetaan vajaalla teholla prosessin optimoinnin puutteen myötä. Lisääntyvä biojätteen erilliskeräys tarkoittaa, että myös biojätteen käsittelylle syntyy lisätarvetta. Uusiin käsittelylaitoksiin investoimista voidaan vähentää, jos jo olemassa olevien laitosten koko kapasiteetti saadaan paremmin hyödynnettyä. Muita syitä prosessimuutokselle voivat olla halu tuottaa lisää biokaasua, jolloin laitoksen tuottavuus paranee lisääntyneen energiantuotannon, lannoitteen tuotannon ja näiden myynnin seurauksena. Lisäksi prosessin kasvihuonekaasu- ja hajupäästöjen vähentäminen voivat olla syinä kompostoinnista pois siirtymiseen.

3.2 Biojätteen käsittelyprosessin ympäristövaikutukset ja taloudelliset vaikutukset

Biojätteen käsittelyprosessin aiheuttamat vaikutukset voidaan luokitella kahteen luokkaan, jotka ovat ympäristö ja talous. Vaikutukset voivat kuulua joko vain toiseen tai molempiin luokkiin. Vaikutusten jakautuminen on esitetty kuvassa 3.1.



Kuva 3.1. *Biojätteen käsittelyn vaikutukset jaoteltuna ympäristöllisiin ja taloudellisiin vaikutuksiin.*

Vaikutuksista kasvihuonekaasu- ja hajupäästöt ovat ainoat täysin ympäristövaikutuksiin kuuluvat ja kustannukset ja tuotot puolestaan talouteen kuuluva. Loput vaikutuksista kuuluvat molempiin vaikutusluokkiin.

3.2.1 Kasvihuonekaasupäästöt

Biojätteen käsittelyprosessissa syntyy kasvihuonekaasupäästöjä kaikissa vaiheissa, mutta päästöjen määrät eroavat toisistaan merkittävästi. Käsittelylaitosten päästölähteitä ovat poistoilmankäsittely, lämmön ja sähkön yhteistuotanto, nestemäisen mädätteen käsittelyjärjestelmä, mädätteen käsittelyyn käytetyt avoimet kompostointiaumat ja biokaasun varastointi (Swati ja Hait 2018). Vuoden 2016 alussa Suomessa astui voimaan valtioneuvoston asetus (331/2013, kaatopaikka-asetus), jonka myötä biojätteen kaatopaikkasijoitus loppui ja nykyään sekajäte poltetaan. Nykyään biojäte erilliskerätään ja sen lämpöarvo on huono, minkä takia sitä ei haluta polttaa vaan hyödyntää muita menetelmiä käyttäen (European Environment Agency 2020). Kiertotaloudessa biojäte ohjataan käsittelymenetelmiin, joissa jätettä hyödynnetään arvokkaiden resurssien, kuten ravinteiden, orgaanisen aineen ja energian lähteenä.

Mädätykselle ja kompostoinnille tehtyjen elinkaarianalyysien mukaan mädätyksellä on merkittävästi pienemmät kasvihuonekaasupäästöt (Lin et al. 2018). Mädätyksen suurin etu on fossiilisten energianlähteiden korvaaminen biokaasulla. Mädätyksen päästöt syn-

tyvät pääasiassa mädätteeseen jäävän orgaanisen aineen varastoimisesta väärin siten, että mädätteessä vielä syntyvää metaania ei kerätä, ja maahan levityksestä lannoitteena tai maanparannusaineena. Kompostoinnissa taas kasvihuonekaasu- ja hajupäästöt syntyvät pääasiassa kompostointiprosessin aikana. Erityisesti aumakompostointi tuottaa merkittävän määrän kasvihuonekaasupäästöjä (Swati ja Hait 2018). Koska anaerobinen mädätys tapahtuu suljetuissa reaktoreissa, päästöt ilmaan ja veteen ovat vähäisiä tai näkyvät vain epäsuorina päästöinä (Stentiford ja Bertoli 2010). Päästöt voivat olla: ilmapäästöt biokaasun muuntamisesta, päästöt vuodoista ja kiinteiden aineiden käsittelystä, päästöt ilmaan, veteen tai maaperään mädätteestä (ellei sitä pidetä tuotteena) tai reaktorinesteestä kuivauksen jälkeen. Mädätyslaitosten päästöt vastaanotto- ja esikäsittelyprosesseissa ovat vähemmän merkityksellisiä, kun taas lietteen erottaminen kiinteään ja nestemäiseen vaiheeseen johtaa merkittäviin kasvihuonekaasupäästöihin (Swati ja Hait 2018). Anaerobisen mädätyksen kasvihuonekaasupäästöt voidaan minimoida prosessin asianmukaisella operoinnilla ja käsittelemällä mädäte (Lin et al. 2018).

Prosessista tai energian käyttölaitteesta vapautuva metaani tulisi kerätä, koska ilmakehään päästetty metaani on merkittävä kasvihuonekaasu, joka edistää ilmaston lämpenemistä noin 25 kertaa enemmän kuin hiilidioksidi (Stentiford ja Bertoli 2010). Kaasumoottoreiden aiheuttamat tahattomat metaanipäästöt ovat yksi suurimpia metaanipäästöjen lähteitä prosessissa ja ne voivat olla jopa 6 % tuotetusta metaanista (Dumont et al. 2013). Biokaasun muuntamisesta aiheutuvat ilmapäästöt riippuvat raakabiokaasun laadusta, mahdollisesta esikäsittelystä (veden, vetysulfidin poistaminen jne.) ja itse polttoprosessin tyypistä ja laadusta (Stentiford ja Bertoli 2010). Lisäksi poistokaasun mahdollinen puhdistaminen voi vähentää todellisia päästöjä. Myös biokaasun säilytyksestä aiheutuvat päästöt voivat olla 0,5-11 % tuotetusta metaanista (Dumont et al. 2013). Metaanin talteenotto tapahtuu yleensä laitoksella soihduttamalla ja peittämällä jälkivarastointisäiliöt muodostuvan jäännöskaasun keräämiseksi (Stentiford ja Bertoli 2010). Jälkivarastoinnin biokaasutuotannon on havaittu muodostavan 5–25 % laitosten kokonaisbiokaasutuotannosta (Angelidaki et al. 2005). Tuotetun biokaasun määrä on energiasisällöltään merkittävä. Tyypillisesti noin 70 % mädätykseen syötetyn jätteen energiasisällöstä muuntuu biokaasuksi.

3.2.2 Hajut

Hajupäästöt ovat kompostointiprosessin luonnollisia sivutuotteita riippumatta lähtöaineista tai prosessin tilasta ja niitä syntyy erityisesti aumakompostoinnin yhteydessä (Stentiford ja Bertoli 2010). Hajut ovat ympäristöön pääseviä prosessipäästöjä, jotka aiheuttavat sosiaalista huolta, mikä monesti johtaa laitoksen sulkemiseen tai hajuja ehkäisevien menetelmien käyttöönottoon (Colon et al. 2012). Ihmiset ovat huolissaan biokaasutuotannon vaikutuksista, kuten hajupäästöistä, melusta ja ei-toivotuista maiseman muutoksis-

ta (Bachmann 2013). Yksi hajujen päälähteistä on haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC) (Maulini-Duran et al. 2014; Scaglia et al. 2011). VOC:ta on raportoitu syntyvän merkittävästi paljon ruokajätettä sisältävää biojätettä kompostoitaessa (Cerda et al. 2018; Scaglia et al. 2011). Ilmapäästöt mädätyslaitoksista voivat haista voimakkaasti, ellei kaikkea kiinteitä aineita käsitellessä syntynyttä poistoilmaa kerätä ja poisteta biofiltterin tai korkean piipun kautta (Stentiford ja Bertoli 2010).

Typpiyhdisteistä peräisin olevat hajupäästöt ovat pääosin peräisin ammoniakista, jonka syntyminen johtuu ruokajätteen alhaisesta hiilityppisuhteesta (Cerda et al. 2018; Zang et al. 2016). Ammoniakin vapautuminen riippuu kompostin pH:sta ja lämpötilasta ja se suosii termofiilisiä ja vahvasti emäksisiä olosuhteita (Pagans et al. 2006). Ammoniakkipäästöt kontaminoivat ilmakehää ympäristöpäästöinä ja vähentävät typen määrää lopullisessa kompostissa (Colón et al. 2012). Toinen hajupäästöjen tärkeä typpiyhdiste on trimetyyliamiini, joka esiintyy yleensä suuren kokoluokan laitoksissa (Wei et al. 2017). Tässä yhdisteellä on alhainen hajukynnys, mistä johtuen sillä on merkittävä vaikutus hajupäästöihin (Tsai et al. 2008).

Hajuongelmien ratkaiseminen biokaasulaitoksista vaatii paljon ilmanpuhdistusta; ongelma-aineiden pitoisuudet ovat alhaiset, mutta monenlaisia hajuja aiheuttavia aineita on läsnä (Stentiford ja Bertoli 2010). Lisäksi monien hajua aiheuttavien aineiden pitoisuustasot ovat matalat. Siksi hajuongelmien ratkaisu alkaa hajunmuodostusriskin vähentämisestä ylläpitämällä jätteen hyvää ja tasaisesti toimivaa käsittelyä. Raakajätteen ei tulisi pysyä käsittelemättömänä pitkiä ajanjaksoja, ja prosesseja on pidettävä hyvin hallinnassa. Hajuongelmariskialueet on erotettava muista alueista, jotta haisevan ventilaation määrä pysyy alhaisena. Seuraava askel on hajun rajaaminen ympäristön suojelemiseksi. Monissa tapauksissa jäte toimitetaan suljettuun rakennukseen, prosessit suoritetaan suurelta osin suljetuissa säiliöissä, ja rakennusten tai säiliöiden ilman käsitellään kokonaan.

3.2.3 Ravinteiden kierto

Biojätteen käsittelyprosessissa syntyvän mädätteen ja kompostin käyttäminen auttaa palauttamaan biojätteessä olleet ravinteet takaisin maaperään (Stentiford ja Bertoli 2010). Biologisesti käsitelty jäte sisältää useita kasvien makroravinteita, pääasiassa typpeä ja fosforia, jonkin verran kaliumia sekä vaihtelevia määriä hivenravinteita, kuten booria, kuparia, rautaa, mangaania, molybdeeniä ja sinkkiä. Ravinteiden määrät ja suhteet eivät vastaa hyvin laadittua kemiallista lannoitetta, mutta maaperä saa yleensä lisäravinteita muista lannoitteista kasvien tuotantoa varten. Prosessoidun orgaanisen kiinteän jätteen sekoittamisella maaperään on yleensä positiivisia vaikutuksia kasvien kasvuun ja satoon, ja voi edistää ekologisten ja taloudellisten toimintojen palauttamista heikentyneillä mailla. Korkealaatuisen kompostin ja mädätteen käyttäminen korvaamaan typpi, fosfori- ja kaliumlannoitteiden käyttöä vähentää ympäristövaikutuksia, kun mineraalilannoitteiden val-

mistukseen käytettävien raaka-aineiden, veden ja energian käyttö vähenee (Cerda et al. 2018; Lin et al. 2018). Vuosittain 134 000 tonnia typpeä ja 44 000 tonnia fosfaattia jää Euroopassa hyödyntämättä sekajätteeseen joutuneessa biojätteessä (European Environment Agency 2020).

Fosforin kierrätys nähdään erittäin tärkeänä, sillä se on uusiutumaton luonnonvara, jonka varannot ovat hupenemassa. Euroopan Komissio on asettanut fosforin kriittisten raaka-aineiden listalle, mistä johtuen sen kierrättäminen on erityisen tärkeää (EC 2017; European Environment Agency 2020). Lannoitekäytön myötä fosfori päätyy yleensä kiinteään biojätteeseen, kuten ruokajätteeseen, eläinten lantaan, lietteisiin ja ruokakasvibiomassaan. Tästä syystä fosforin kierrätys biojätteestä auttaa vähentämään uusiutumattomien lähteiden käyttöä sekä vesien eutrofikaatiota valuntojen vähentyessä (Huang et al. 2017). Saapuvan jätteen typpi on pääasiassa orgaanista proteiinien typpeä (Stentiford ja Bertoli 2010). Vain pieni osa typestä häviää kaasuna, ja mädätteessä noin puolet on ammoniumia ja puolet orgaanista typpeä. Tämä tarkoittaa sitä, että suuri osa mädätteessä olevasta typestä on helposti kasveille saatavilla, mutta se voi myös haihtua ammoniakkina, jos sitä ei käsitellä oikein.

Vaikka jätteiden kierrätys maatalouden käyttöön auttaa sulkemaan ravinteiden kiertoa, kotitalousjätteiden käyttö saattaa aiheuttaa ympäristöongelmia jätteessä olevien aineista (esim. kotitalouskemikaalit, torjunta-aineet, pesuaineet jne.) tai ravinteiden epätasapainosta johtuen, erityisesti jos ne aiheuttavat mahdollisia pilaantumisongelmia ja vaikuttavat haitallisesti maaperän toimintoihin (Stentiford ja Bertoli 2010). Jätteen levittämistä maahan säännellään useimmissa maissa ihmisten terveyden, ympäristön ja maan toiminnallisuuden suojelemiseksi ei-toivottujen kemiallisten aineiden, kuten metallien (esim. kadmium ja lyijy), myrkyllisten orgaanisten kemikaalien, kuten polyklooratut bifenyylit, rehevöittäjien (esim. nitraatti) ja patogeenien, kuten bakteerien (esim. Escherichia coli) ja virusten, esim. hepatiitti A -viruksen (Epstein 2003) varalta. Jätteen käyttöä maaperässä valvotaan sääntelytoimenpiteillä jätteen levittämisen määrästä (vuotuiset ja enimmäismäärät) ja laadusta (ominaisuudet, saastepitoisuus). Muita toimenpiteitä ovat hyvien hallintokäytäntöjen käyttö maahan levittämisessä (esim. levitysajankohta, suojavyöhykkeiden perustaminen).

3.2.4 Hiilen ja orgaanisen aineen kierto

Hiili ja orgaaninen aines ovat maaperän laadun, hedelmällisyyden ja terveyden kannalta välttämättömiä (Cioabla et al. 2012). Maaperän laadun heikentyessä alkaa hiili hajota, jolloin hiilidioksidia vapautuu ilmakehään (Gerke 2022). Koska maaperä on suurin hiilinielu, sen heikentyminen vaikuttaa merkittävästi ilmakehän hiilidioksidipitoisuuteen. Tämän takia hiilen palauttaminen takaisin maaperään lannoitteen tai kompostin muodossa on erittäin tärkeää. Anaerobisessa mädätyksessä menetetään vähemmän hiiltä kuin kom-

postoinnissa (Lin et al. 2018). Mädätysprosessin rejektissä poistuva orgaaninen hiili on yleensä kiinnittynyt vierasaineisiin (Stentiford ja Bertoli 2010). Hiiltä löytyy myös poistetuista muoviesineistä. Mädätykseen saapuvasta hiilestä noin 45 % poistuu metaanina, 30 % hiilidioksidina ja 25 % pidättyneenä ja liuenneena mädätteeseen.

Energiataseen lisäksi hiilitase on tärkeä indikaattori arvioitaessa uusiutuvista materiaaleista tuotetun energian ja polttoaineen kestävyyttä (Gomez 2013). Biokaasutuotannon hiilijalanjäljen elinkaariselvityksessä tulisi ottaa huomioon hiilidioksidiekvivalentit laitoksen rakentamiselle ja operoimiselle, raaka-aineelle, hallitsemattomille metaanipäästöille sekä mädätteen levittämiselle pelloille.

3.2.5 Biokaasu

Käyttämällä anaerobisessa mädätyksessä tuotettua biokaasua fossiilisista lähteistä peräisin olevien polttoaineiden ja energianlähteiden käyttöä saadaan vähennettyä, mikä johtaa myös pienempiin kasvihuonekaasupäästöihin (Stentiford ja Bertoli 2010). Biokaasun sisältämät metaani ja hiilidioksidi ovat kasvihuonekaasuja, joista metaani hajoaa poltettaessa hiilidioksidiksi ja vedeksi vähentäen näin sen ympäristövaikutuksia. Koska metaani on noin 25 kertaa vahvempi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi (Tilastokeskus 2016), tulee sen vuotaminen prosessista ilmakehään estää ympäristövaikutusten minimoimiseksi.

3.2.6 Biojätteen käsittelyn energiankulutus

Biojätteen käsittelylaitoksilla kuluu energiaa sähkön, lämmön ja polttoaineen muodossa (Scholwin ja Nelles 2013). Kun biokaasulaitoksen tärkein tehtävä on sähköntuotanto, on toiseksi suurin energiankuluttaja CHP-yksikkö. Se ei kuluta lainkaan lämpöä, vaan se on lämmön päätuottaja koska pakokaasujen ja jäähdytysvesisyklin hukkalämmöt kerätään talteen. Saksalaisista biokaasulaitoksista kerättyjen tietojen mukaan tyypillinen CHP-laitoksen sähkönkulutus on välillä 7,5-15 KWh per MWh tuotettua biokaasua. Jäähdytysvesikierron sähkön tarve voi nostaa yksikön kulutusta merkittävästi. Tämän lisäksi sähköverkon häviöt siirron aikana tulee ottaa huomioon.

On tärkeää ylläpitää fermentaatioprosessin lämpötilaa tasaisena niin, että se pysyy 1 celsiusasteen sisällä, jotta vältetään prosessin biologisen tasapainon suuremmat muutokset (VDI 2011). Laitoksen toimintaan tarvittava energia on noin 10 % biokaasusta saadusta energiasta, jos sähkön lisäksi kaasun polton lämpö saadaan hyödynnettyä (Stentiford ja Bertoli 2010). Mädätysprosessin ollessa termofiilinen suurempi määrä energiaa tarvitaan reaktorisäiliön lämmittämiseen. Mädätyslaitos käyttää myös energiaa sähkön (pumput, tuulettimet, sekoittimet jne.), polttoaineiden (diesel kuorma-autoille ja koneille) ja lämmön (riippuen sähköstä ja polttoaineesta) muodossa. Suurin energiankulutus syntyy reaktoreiden lämmittämisestä.

Kompostoinnissa sähkönkulutus syntyy seulontalinjojen murskainsekoittimista ja kuljettimista sekä ilmapuhaltimista (Kantoluoto 2020). Lämpöä kuluu sekä prosessi-ilman että seulonta-alueen lämmitykseen. Polttoainetta kuluu pyöräkuormaajien siirtäessä biojätettä ja kompostia vaiheiden välillä.

Prosessinohjaus kuluttaa tyypillisesti vain vähän energiaa (Scholwin ja Nelles 2013). Laitoksen infrastruktuurin energiankulutus on myös yleensä alhainen, mutta jos toimistoja ja vierailijatiloja käytetään säännöllisesti tai prosessi vaatii paljon valaistuja tiloja, voi kulutus nousta merkittävästi. Tästä syystä paikalliset tekijät tulee ottaa huomioon prosessinohjauksen ja infrastruktuurin energiankulutusta arvioitaessa.

3.3 Biojätteen käsittelyvaihtoehtojen taloudelliset vaikutukset

Taloudelliset näkökohdat ovat biojätteen käsittelyssä olennaisia, sillä sen operoiminen taloudellisesti kannattavasti on yleisesti ottaen haastavaa (Stentiford ja Bertoli 2010). Oikeudelliset vaatimukset hajuista ja melusta yhdessä työympäristövaatimusten kanssa lisäävät haastavuutta. Anaerobisella mädätyksellä on korkeampi investointihinta, mutta pienempi käyttöhinta kuin kompostoinnilla (Lin et al. 2018). Kompostoinnin tuotot syntyvät yleensä kompostoinnin myynnistä. Anaerobisen mädätyksen tuotot syntyvät biokaasun tai biokaasusta saatavan energian sekä mädätteen myynnistä. Vaikka mekaaninen esikäsittely lisää spesifistä pinta-alaa ja täten biokaasun tuotantoa, on se usein biomassan käsittelyn kallein vaihe suuren sähkönkulutuksen vuoksi (Bochmann ja Montgomery 2013).

Kompostointi vie käsittelylaitoksilla merkittävästi tilaa sekä sisällä että ulkona. Jos jätettä ohjataan enemmän mädätykseen ja mädäte käsitellään muuten kuin kompostoimalla, vapautuu laitoksilla tilaa muihin toimintoihin, jolloin prosessin kustannukset vähenevät ja mahdollisuus uudelle tuottoisalle toiminnalle avautuu.

Käsitellyn biojätteen maahan levittämisen taloudelliset kustannukset voivat olla merkittävä este uudelleenkäytölle (Stentiford ja Bertoli 2010). Kustannuksiin saattaa liittyä valvonta- ja sääntelytoimenpiteitä, maksuja, veroja jne., jotka voivat ylittää taloudelliset hyödyt. Lisäksi useimmat orgaaniset jätteet ovat tilavuudeltaan suuria ja painavia, mutta laadultaan alhaisia lannoitteita muuttuvalla koostumuksella ja usein korkealla vesipitoisuudella. Niitä ei siten voida kuljettaa kauas ennen kuin kuljetuskustannukset ylittävät lannoitteen arvon. Kuljetuksesta aiheutuvat fossiilipolttoaineista peräisin olevat CO_2-päästöt tulisi myös ottaa huomioon päätöksenteossa jätteen uudelleenkäyttösuunnitelmissa. Monesti jätehuoltoon liittyvillä laitoksilla ei ole maatalous- ja metsämaata taloudellisesti käytännöllisten kuljetusetäisyyksien päässä.

4. MATERIAALIT JA MENETELMÄT

Tässä työssä tarkasteltiin biojätteen käsittelyprosessiin tehtävien muutosten vaikutuksia prosessin kestävyyteen. Tarkastelu tehtiin ympäristöllisten ja taloudellisten vaikutusten näkökulmista.

4.1 Biojätteen käsittely Ämmässuolla

Tämän työn kohteena oli Helsingin seudun ympäristöpalveluiden (HSY) Ämmässuon biojätteen käsittely. HSY on Espoon, Helsingin, Kauniaisten ja Vantaan perustama kuntayhtymä, joka tuottaa pääkaupunkiseudun vesi- ja jätehuollon palveluita sekä tietoa seudusta ja ympäristöstä. HSY käsittelee biojätettä Ämmässuon ekoteollisuuskeskuksessa anaerobisen mädätyksen ja kompostoinnin avulla. Laitoksessa on esikäsitellyn biojätteen säilöntävarasto, nestemäisen syötteen säiliö ja syöttölaitteet mädätykseen. Mädätyksen syöttölaitteina toimivat syöttöruuvi tai vaihtoehtoisesti mäntäpumppu. Lisäksi laitoksessa on kaksi mesofiilista kuivamädätysreaktoria, mädätteen poistolaitteisto kahdella tyhjiölaitteella ja putki-/ruuvikuljettimet kompostointilaitokseen. Laitteistoon kuuluu myös biologinen rikinpoistolaitteisto, kaasusysteemi kondensaatin poistolla, kaasupuskuri, soihtu, kaasun pumppausasema sekä putket CHP 2:een, ja poistoilman keräyslaitteisto. Mädätysprosessissa syntyvä mädäte sekoitetaan esikäsittelyn ylitteen, tukiaineen ja kompostointiprosessin palautuskierron kanssa, joka sitten käsitellään tunnelikompostoinnilla. Tunnelikompostoinnissa käytössä oleva kapasiteetti rajaa kuivamädätyksen mahdollista käyttöastetta. Biojätteen käsittelyprosessin lähtötietoja on esitetty taulukossa 4.1.

Vuosina 2013-2015 kompostointilaitoksen esikäsittely muutettiin soveltumaan mädätysprosessin tarpeisiin, ja ilmanpuhdistus, seulonta ja tunnelikompostinnin muutoksia lisättiin. Tällä hetkellä laitos sisältää biojätteen vastaanoton ja esikäsittelyn, tunneleiden täytön, tunnelikompostoinnin, seulontalinjan, hygenisointitunneleita ja poistoilman puhdistuksen (biopesuri ja -suodatin). Vanhaa kompostointilaitosta käytetään nykyään hygienisoidun biojätteen jälkikompostointiin. Laitos sisältää vastaanoton ja esisekoituksen, tunnelin täytön pyöräkuormaajalla, tunnelikompostoinnin ja poistoilman puhdistuksen (happopesuri ja biosuodatin). Biojätteen käsittelyyn tarkoitettujen hallien lisäksi Ämmässuolla on tukiaineen kuivaushalli. Sitä käytetään tukiaineen säilytykseen ja kuivaukseen ennen uudelleenkäyttöä kompostointiprosessissa. Hallien lisäksi prosessille on varattu tilaa myös ul-

Taulukko 4.1. *Biojätteen käsittelyprosessin lähtötietoja.*

Muuttuja	**Arvo**
Käsittelymäärä 2023	47 000 t
Käsittelymäärä 2026	54 000 t
Käsittelymäärä 2030	>60 000 t
Vastaanotetun biojätteen kuiva-ainepitoisuus	30 %
Mädätysrekatorien lukumäärä	2 kpl
Mädätysreaktorin nettotilavuus	1 800 m^3/reaktori
Mädätysreaktorin käyttötilavuus	1 500 m^3/reaktori
Mädätysreaktorin nimelliskapasiteetti	22 000 t/a/reaktori
Mädätysreaktorin nykyinen käyttöaste	11 500 t/a/reaktori
Kompostointilaitoksen nimelliskapasiteetti	50 000 t/a
Kompostointitunneleiden lukumäärä	12 kpl
Hygienisointitunneleiden lukumäärä	3 kpl
Jälkikompostointitunneleiden lukumäärä	9 kpl

koa kompostointikenttää varten. Biojätteelle ja jätevesilietteelle tarkoitetun eteläisen kompostointialueen koko on 6,7 hehtaaria ja sitä käytetään pääasiallisesti biojätteen kompostointiin ja seulotun kompostin varastointiin. Jos vanhaa kompostointilaitosta käytetään jätevesilietteen kompostointiin, käytetään kompostointikenttää myös siihen tarkoitukseen.

Vastaanotettu biojäte esikäsitellään kahdella esimurskaimella, minkä jälkeen se joko seulotaan ruuviseulalla siten, että alite kuljetetaan biojätteen säilöntävarastoon metallinerotuksen jälkeen ja ylite varastoidaan vastaanottoalueelle, tai täytetään suoraan kompostointitunneleihin. Hieno biojäte varastoidaan mädätyslaitoksella ja syötetään ruuvikuljettimilla mädätysreaktoreihin. Kahta mädätysreaktoria käytetään rinnakkain ja niiden nykyinen käyttöaste on vain hieman yli puolet niiden täydestä kapasiteetista, minkä takia biokaasun tuotanto on suunniteltua alhaisempi ja viipymäaika reaktorissa merkittävästi suunniteltua pidempi. Biokaasu säilötään kaasupuskuriin ja sieltä se pumpataan CHP 2 -kaasumoottoriin H_2S:n ja terpeenien poiston jälkeen. Huollon tai häiriön yhteydessä biokaasu soihdutetaan. Biokaasuprosessissa syntyvä mädäte syötetään kompostointilaitokseen tunnelikompostoitavaksi.

Automaattinen tunneleiden täyttölaitteisto täyttää tunnelit, jonka jälkeen ovet suljetaan ja kompostointiprosessi alkaa. Nopeamman prosessin käynnistymisen ja kuivumisen takaamiseksi ilmastusilma esilämmitetään. Tunnelikompostoinnin jälkeen tunnelit tyhjennetään ja materiaali siirretään pyöräkuormaajalla seulontalinjalle, missä syöte erotellaan kolmeen jakeeseen, joista kaikkein hienoin jatkokäsitellään kompostoinnin toisessa vaiheessa hygienisointitunnelissa. Loput syötteestä päätyy joko suoraan tukiainehalliin tai käy ensin metallinerotuksen kautta. Hygienisoitu komposti kuljetetaan pyöräkuormaajalla vanhalle

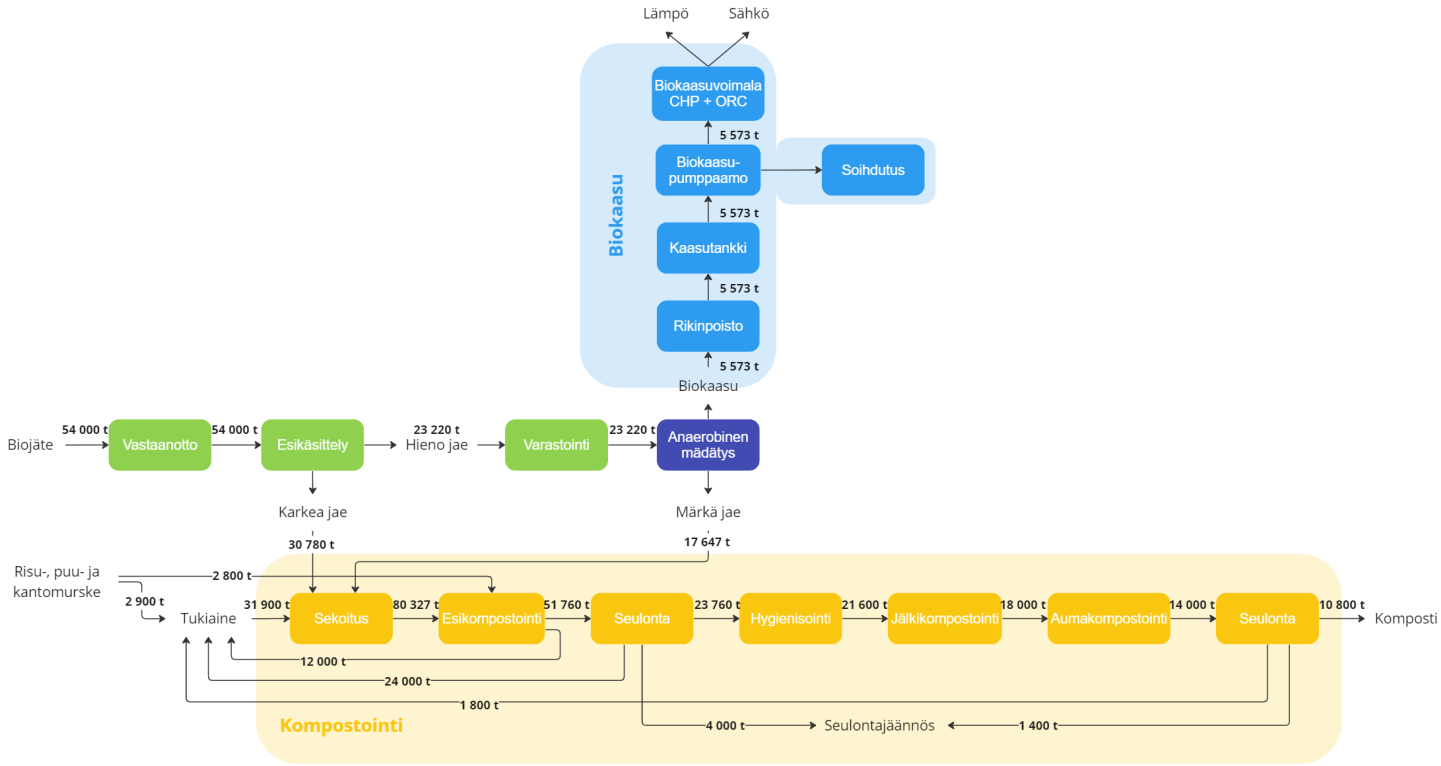
kompostointilaitokselle ja syötetään jälkikompostointitunneleihin. Jälkikompostoinnin jälkeen komposti siirretään kompostointikentälle ja kootaan aumoiksi. Koska kompostointikentällä ei ole keinotekoista ilmastusta, käännetään ja mahdollisesti kosteutetaan aumat kolmen viikon välein. Aumakompostoinnin päätteeksi komposti seulotaan ja seulonnan ylite kierrätetään tukiaineeksi.

4.2 Ämmässuon käsittelyprosessin muutokset

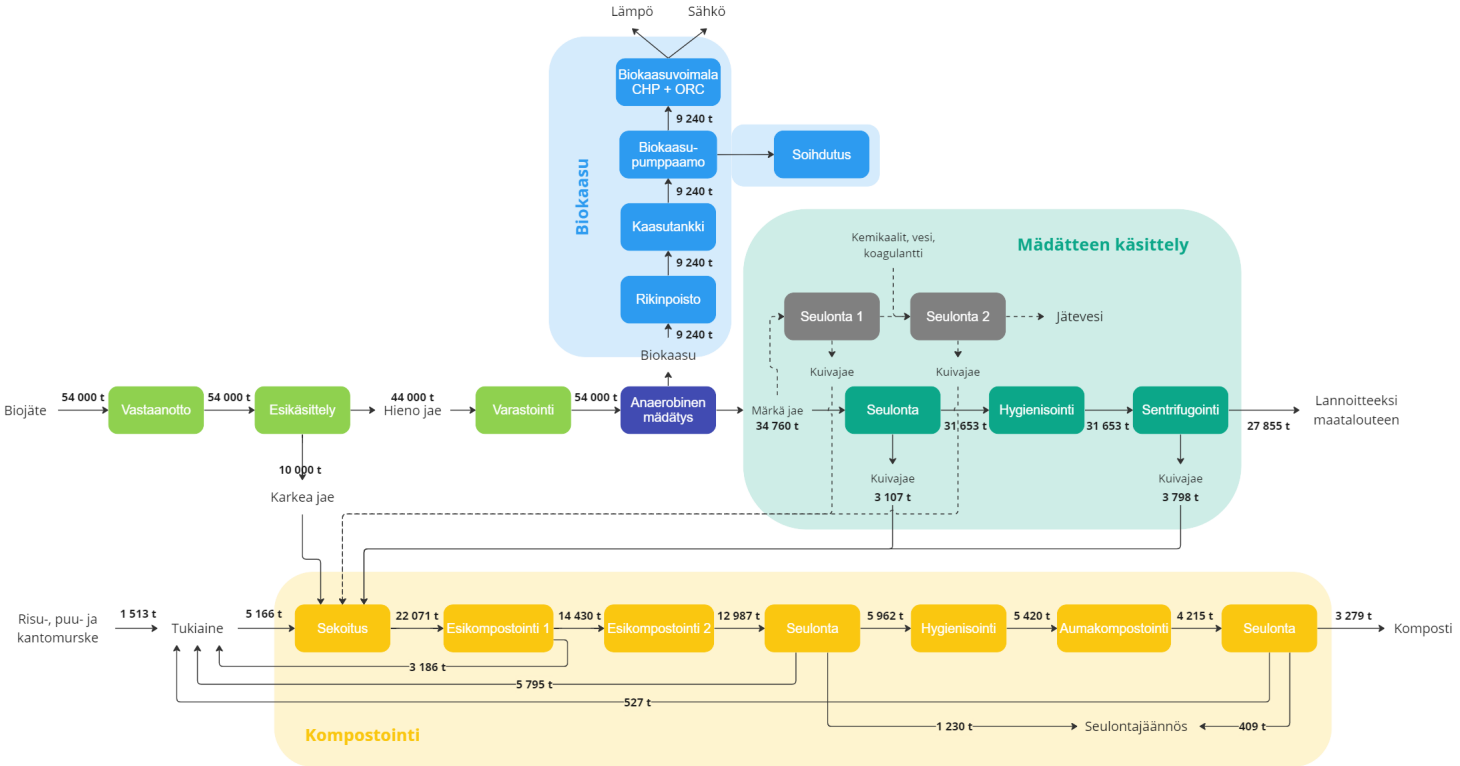
Nykyistä biojätteen käsittelyprosessia halutaan uudistaa, jotta biokaasulaitosta saadaan hyödynnettyä paremmin ja tuotettua enemmän biokaasua. Tunnelikompostoinnin kapasiteetti on nykyisellään jo lähes täysin käytössä, mistä johtuen biokaasulaitoksen käyttöastetta ei voida nostaa. Biokaasulaitoksen käyttöasteen nostamiseksi tulee kompostoinnissa olevasta pullonkaulasta päästä eroon. Tämä voidaan saavuttaa käsittelemällä biokaasuprosessissa syntyvä paljon kosteutta sisältävä mädäte kompostoinnin sijasta tekemällä siitä lannoitetta maatalouden käyttöön. Kuvassa 4.1 on esitetty nykyisen ja suunnitellun prosessin vuokaaviot massataseiden lähtöarvojen kanssa.

Biojätteen esikäsittelyyn käytettäviä murskaimia täytyy sopeuttaa uuteen prosessiin murskauksen lopputuotteen pienentämiseksi. Ämmässuolla tehtyjen murskaustestien perusteella murskaus onnistuu odotettua paremmin, jolloin jopa 94 % biojätteestä voisi päätyä mädätykseen suunnitellun 81 %:n sijasta. Murskaustesteissä ylite, jota syntyi 6 % kokonaismassasta, oli pääasiassa muovia, joten tässä työssä oletettiin, että ylite ei päätyisi kompostointiin vaan olisi seulontajäännös ja käsiteltäisiin mahdollisesti energiakäytössä.

Mädätteen käsittely alkaa maataloudessa mädätteen käyttöä häiritsevän karkean aineen erottamisella nestejakeesta ruuvipuristinerottimella. Nestejakeen kuiva-ainepitoisuus on 13-15 % ja kiintojakeen 50-55 %. Nestejakeessa on paljon ravinteita kun taas kiintojae sisältää aineen, joka ei läpäissyt seulaa, ja myös hienoainesta, joka on jäänyt puristuskakkuun. Erotuksen jälkeen nestejae hygienisoidaan tunnin ajan, minkä jälkeen se olisi valmista käytettäväksi lannoitteena, mutta levittämisen kannalta optimaalisemman kuiva-ainepitoisuuden saavuttamiseksi nestejae sentrifugoidaan vielä lopuksi. Sentrifugoinnissa erottunut kiintoaine poistetaan, jolloin nestejakeen lopulliseksi kuiva-ainepitoisuudeksi saadaan alle 10 %. Ruuvipuristinerottimessa ja sentrifugoinnissa syntyvät kiintojakeet ovat määrältään vähäiset ja kuiva-ainepitoisuudeltaan moninkertaiset mädätteeseen verrattuna ja ne käsitellään kompostoimalla. Lisäksi prosessiin lisätään kuivaus vaihtoehtoisena käsittelytapana mädätteelle lannoitteen markkinoiden ailahtelun varalta.



(a) *Nykyinen*



(b) *Suunniteltu*

Kuva 4.1. *Nykyisen ja suunnitellun käsittelyprosessin vuokaaviot ja massataseiden lähtöarvot.*

4.3 Kestävyystarkastelu

Kestävyystarkastelussa arvioitiin prosessimuutoksen vaikutuksia ympäristöllisiin ja taloudellisiin tekijöihin, joita olivat kasvihuonekaasu- ja hajupäästöt, ravinteiden kierto, hiilen ja orgaanisen aineen kierto, biokaasu, kustannukset ja säästöt, sekä energiankulutus. Tulokset laadittiin laskemalla massatase, ainetase, energiatase, kasvihuonekaasupäästöt, hajupäästöt ja kustannukset. Lisäksi tuloksia arvioitiin kiertotalouden näkökulmasta. Laskennat suoritettiin keräämällä tuloksia aiemmista tutkimuksista sekä tekemällä niiden pohjalta arviointeja vaikutuksista. Käytetty aineisto koostui HSY:n aiemmin teettämistä tutkimuksista ja raporteista. Pääasiallisena lähteenä käytettiin RAB Consultingin vuonna 2022 laatimaa raporttia (RAB 2022) ja laskennat suoritettiin Excelillä. Kestävyystarkastelu suoritettiin kolmelle eri prosessivaihtoehdolle, jotka olivat nykyinen, suunniteltu ja toteutumassa oleva prosessi. Nykyisellä prosessilla tarkoitetaan tilannetta, jossa prosessiin ei tehtäisi muutoksia ja mädäte ohjattaisiin jatkossakin kompostointiin. Suunnitellulla prosessilla tarkoitetaan RAB:n raportin laskentaan pohjautuvaa prosessia, jossa noin 81 % biojätteestä menisi mädätykseen ja mädäte menisi mädätteen käsittelyyn. Toteutumassa olevalla prosessilla tarkoitetaan tilannetta, jossa 94 % biojätteestä menisi mädätykseen ja mädäte menisi mädätteen käsittelyyn. Lisäksi esikäsittelyn ylite ei menisi lainkaan kompostointiin.

4.3.1 Massatase

Massatase tehtiin prosessin massavirtojen muutosten havainnollistamiseksi ja tuotteiden ja rejektien määrän selvittämiseksi. Massataseen laskennassa käytettiin lähtötietoina RAB:n raporttia, jossa massatase oli laskettu sekä nykyisen että suunnitellun prosessin tiedoilla vuodelle 2026. RAB:n suunnitellun prosessin massataseesta puuttuneet massavirrat arvioitiin käyttäen nykyisen prosessin massataseen määriä ja suhteita. Toteutumassa olevan prosessin massatase laskettiin RAB:n laskelmien pohjalta käyttäen eri arvoja. Lähtötiedot esitettiin kuvassa 4.1.

Massatase sisältää vaiheet biojätteen vastaanotosta biokaasun hyödyntämiseen, valmiiseen lannoitteeseen sekä valmiiseen kompostiin. Massataseen arvot oli laskettu olettaen, että käsiteltävän biojätteen määrä olisi 54 000 tonnia vuodessa. Nykyisessä prosessissa anaerobiseen mädätykseen menisi 23 220, suunnitellussa 44 000 ja toteutumassa olevassa 50 760 tonnia vuodessa. Toteutumassa olevan prosessin massatasetta laskiessa tehtiin oletus, että käsiteltävän massan muutos on suhteellisesti sama kuin suunnitellussa prosessissa, esimerkiksi tuotetun biokaasun määrän ja seulontajäännösten suhteen. Oletus tehtiin, sillä laskelmat ovat suuntaa antavia, sillä tulevan prosessin tarkkoja arvoja on vaikea ennustaa täydellisesti. Esimerkiksi uudessa prosessissa kompostointiin päätyvä osa on kuivempaa, jolloin kuiva-ainetta ei tarvittaisi yhtä paljon. Mädätteen käsittelytavan lisäksi massataseiden erona on se, että nykyisessä prosessissa tukiainetta menee

suoraan esikäsittelyyn, kun taas uudessa prosessissa näin ei enää ole.

Prosessin päävaiheiden lisäksi seulonnan ylitteiden ja tukiaineen sisäinen kierto prosessissa oli laskettu vain nykyiselle prosessille. Suunnitellun ja toteutumassa olevan prosessin vastaavat arvot laskettiin käyttäen samoja suhteita, esim. kompostoinnin viimeisen seulonnan ylitteestä 43,7 % menee tukiainehalliin ja loput on rejektiä.

4.3.2 Ainetase

Ainetaseet laskettiin ainevirtausten ja -häviöiden arvioimiseksi. Lähtötietoina käytettiin HSY:n tekemiä ainetaselaskelmia vuodelle 2022 sekä tämän pohjalta tehtyjä arvioita vuodelle 2026. Vuoden 2026 arviot pohjautuivat suunnitellun prosessin arvoihin, joten niitä käytettiin sellaisenaan. Nykyisen prosessin arvot laskettiin käyttäen vuoden 2022 tietoja ja toteutumassa olevan prosessin käyttäen vuoden 2026 arvoja. Laskennan lähtötiedot on esitetty taulukoissa 4.2 ja 4.3.

Taulukko 4.2. *Ainetaseen lähtötiedot nykyiselle prosessille vuodelta 2022.*

	Parametri	määrä	kuiva-aine		vesi	orgaaninen aines		hiili	typpi		fosfori	
	Suure		pitoisuus	määrä	määrä	pitoisuus	määrä	määrä	pitoisuus	määrä	pitoisuus	määrä
	Yksikkö	t		t	t		t	t		t		t
Kompostointiin	Biojäte	27 800	30 %	8 340	19 500	85 %	7 090	3 937	2,7 %	225	0,4 %	33,3
	Mädäte	20 700	13,8 %	2 850	17 800	59 %	1 680	935	6,1 %	174	0,74 %	21,1
	Jätevesiliete	467	29 %	133	334	59 %	79	44	3,8 %	5,1	3,1 %	4,1
	Puuhake	3 500	65 %	2 270	1 220	95 %	2 160	1 200	0,14 %	3,2	0,01 %	0,2
	Risuhake	1 500	41 %	607	892	46 %	282	156	0,8 %	4,9	0,1 %	0,6
	Yhteensä	53 900		14 200	39 700		11 300	6 270		412		59
Kentälle	Tuore komposti	18 000	50 %	9 000	9 000	55 %	4 950	2 750	2,7 %	243	0,5 %	45
Myyty	Kypsä komposti	10 700	63 %	6 730	3 950	52 %	3 500	1 940	2,4 %	161	0,9 %	61
	Biokaasu	4 820		4 800	22		4 820	2 070				

Taulukko 4.3. *Ainetaseen lähtötiedot suunnitellulle ja toteutumassa olevalle prosessille.*

	Parametri	määrä	kuiva-aine		vesi	orgaaninen aines		hiili	typpi		fosfori	
	Suure		pitoisuus	määrä	määrä	pitoisuus	määrä	määrä	pitoisuus	määrä	pitoisuus	määrä
	Yksikkö	t		t	t		t	t		t		t
Syöte	Biojäte	54 000	30 %	16 200	37 800	85 %	13 800	7 650	2,7 %	437	0,4 %	64,8
Mädätykseen	Biojäte	44 000	30 %	13 200	30 800	85 %	11 200	6 230	2,7 %	357	0,4 %	52,8
Mädätekäsittelyyn	Mädäte	34 800	16 %	5 670	29 100	62 %	3 510	1 950	2,7 %	153	0,4 %	22,7
Kompostointiin	Biojäte	10 000	30 %	3 000	70 000	85 %	2 550	1 420	2,7 %	81	0,4 %	12
	Seulonnan kuivajae	3 100	50 %	1 550	1 550	70 %	1 090	603	2,0 %	31	0,4 %	6,2
	Ohennuksen kuivajae	3 800	35 %	1 330	2 470	57 %	758	421	2,8 %	37,5	0,4 %	5,3
	Puuhake	5 170	65 %	3 360	2 470	95 %	3 190	1 770	0,14 %	4,7	0,01 %	0,3
	Yhteensä	22 100		9 240	12 800		7 580	4 210		154		24
Myyty	Kypsä komposti	3 280	63 %	2 070	1 210	52 %	1 070	597	2,40 %	50	0,90 %	19
	Mädäte	27 900	10 %	2 790	25 100	65 %	1 810	1 010	7,0 %	195	0,9 %	25
	Biokaasu	9 240		7 530	1 710		7 710	3 260				
	Yhteensä	40 400		12 400	28 000		10 600	4 860		245		44

Ainetaseet sisälsivät kokonaismäärän lisäksi kuiva-aineen, veden, orgaanisen aineksen, hiilen, typen ja fosforin. Aineiden pitoisuuksien oletettiin pysyvän samana, mutta kussakin vaiheessa käsiteltävät ja syntyvät määrät saatiin massataseista. Nykyiselle prosessille laskettiin syötetyn biojätteen kokonaismäärä ja mädätykseen menevän biojätteen määrä

tuotteiden ainemäärien selvittämiseksi. Myydyn biokaasun ainesisältö laskettiin vertaamalla mädätykseen menevän syötteen ja mädätteen välisiä erotusta. Tuloksena käytettiin kunkin aineen häviöitä, jotka saatiin vertaamalla myytyä määrää syötetyn biojätteen sekä puu- ja risuhakkeen määrään. Häviöt kertovat prosessin resurssitehokkuudesta ja siitä, kuinka hyvin biojätteessä olevat aineet saadaan takaisin kiertoon.

4.3.3 Energiatase

Energiatase laskettiin käyttäen Kantoluodon opinnäytetyössä (Kantoluoto 2020), ja RAB:n raportissa saatuja arvoja. Arvot pohjautuvat käsittelylaitoksen energiankulutukseen vuonna 2018. Massatase vuonna 2018 oli hyvin samanlainen RAB:n vuoden 2026 arvion kanssa, minkä takia Kantoluodon saamia tuloksia käytettiin sellaisenaan nykyisen prosessin vuoden 2026 arvioon. Lisäksi laskettiin energiankulutukset suunnitellulle ja toteutumassa olevalle prosessille. Laskelmissa huomioidut energiankulutukset olivat sähkö, lämpö ja polttoaine. Energiataseessa otettiin huomioon kompostointilaitoksen, vanhan kompostointilaitoksen, biokaasulaitoksen, biokaasupumppaamon, biokaasuvoimalan, tukiainehallin, jälkikypsytyskentän sekä mädätteen käsittelyn energiankulutukset. Energiankulutuksen lähtötiedot on esitetty taulukossa 4.4.

Taulukko 4.4. *Energiankulutuksen laitoskohtaiset lähtötiedot (Kantoluoto 2020).*

Laitos	**Sähkö (MWh)**	**Lämpö (MWh)**	**Polttoaine (l)**
Kompostointilaitos	4 550	12 900	55 200
Biokaasulaitos	423	835	
Vanha kompostointilaitos	718	1 252	15 200
Biokaasupumppaamo	143		
Biokaasuvoimala	520		
Viherjätekenttä			37 000
Jälkikypsytyskenttä			17 700
Tukiainehalli 2019	88	698	10 100
Yhteensä	6 400	15 700	135 000

Suunnitellun ja toteutumassa olevan prosessin laskennoissa jätettiin vanha kompostointilaitos kokonaan huomiotta, sillä uuden prosessin toteutuessa sitä alettaisiin käyttää kompostoinnin sijaan muita toimintoja varten. Biokaasulaitoksen sähkönkulutuksen oletettiin kasvavan samassa suhteessa käsiteltävän määrän kanssa. Biokaasupumppaamon ja -voimalan sähkönkulutusten oletettiin nousevan tuotetun kaasun määrän kasvaessa samassa suhteessa. Suunnitellussa prosessissa laskettiin tukiainehalli vielä mukaan pienentäen kulutuksia samassa suhteessa kuin prosessissa käytettävän tukiaineen määrä vähenisi, mutta toteutumassa olevalle prosessille määrän arvioitiin olevan joko niin pieni

tai täysin olematon, että hallin kulutusta ei enää laskettu mukaan. Sama pätee jälkikypsytyskentälle.

Kantoluodon laskelmissa kompostointilaitoksen sähkönkulutus jaettiin laitekohtaisesti ja tätä laitejakoa käytettiin myös suunnitellun ja toteutumassa olevan prosessin laskelmissa. Kaikkien muiden laitteiden kulutusta, paitsi esikäsittelyn murskain-sekoittimen ja esikäsittelylinjaston, muutettiin samassa suhteessa, kuin kyseisessä vaiheessa käsiteltävän massan määrä muuttui. Käsiteltävän määrän muutokset saatiin massataseesta. Kompostoitavan massan määrän pienentyessä kompostointilaitoksella voitaisiin suorittaa kaksi kompostointikierrosta, mutta sähkön- ja lämmönkulutusta laskettaessa laskettiin vain yhden kompostointivaiheen kulutus, sillä käsiteltävä massa olisi uudessa prosessissa kuivempaa ja kypsempää. Käsittelylinjaston lisäksi muihin laitteistoihin ja tiloihin kuluvan sähkön määrä pidettiin samana. Mädätteen käsittelyn sähkönkulutus saatiin RAB:n raportista ja sen oletettiin pysyvän samana käsittelymäärän muutoksista huolimatta. Sähkönkulutuksen lähtötiedot on esitetty taulukossa 4.5.

Taulukko 4.5. *Sähkönkulutuksen lähtötiedot (Kantoluoto 2020). *(RAB 2022).*

Kompostointilaitos	MWh
Esikäsittely	
Murskain-sekoitin	121
Tunnelintäyttölaite	42
Esikäsittelylinjasto	131
Yhteensä	294
Kompostointi	
Kompressori	62
Konehuone	2 660
Yhteensä	2 780
Jälkikäsittely	
Tuuliseula	39
Murskain	111
Seulontalinjasto	131
Yhteensä	281
Ilmanpuhdistus	
Biopesuri	876
Yhteensä	876
Sähkönkulutus yhteensä	4 230
Mädätteen käsittely	3 220 *

Kompostointilaitoksen lämmönkulutus jaettiin ORC-jäähdytykseen, sosiaali- ja hallitilojen lämmitykseen, prosessilämpöön ja seulonta-alueen lämmitykseen. Jäähdytyksen ja tilo-

jen lämmityksen oletettiin pysyvän samana, mutta prosessilämpöä pienennettiin taas samassa suhteessa kuin käsiteltävä massa muuttui. Seulonta-alueen lämmityksestä oletettiin puolien menevän prosessilämpöön, joten sitä vähennettiin samassa suhteessa, ja puolien pysyvän samana. Kompostointilaitoksen lämmönkulutuksen lähtötiedot on esitetty taulukossa 4.6.

Taulukko 4.6. *Kompostointilaitoksen lämmönkulutuksen lähtötiedot (Kantoluoto 2020).*

	MWh
ORC-jäähdytys	2505
Sosiaali- ja hallitilojen lämmitys	809
Prosessilämpö	7457
Seulonta-alueen lämmitys	2100
Yhteensä	12871

Lisäksi laskettiin tuotetusta biokaasusta saatava energia CHP-laitoksen hyötysuhteen ollessa 0,75. Tuotetun biokaasun määrä saatiin massataseista. Lähtötiedot on esitetty taulukossa 4.7.

Taulukko 4.7. *Tuotetun biokaasun lähtötiedot (RAB 2022).*

	Biokaasu (m^3)	Biokaasu (GWh)
Nykyinen	4240696	24,7
Suunniteltu	7699955	44,8

Ämmässuon pyöräkuormaajat käyttävät polttoaineenaan kevyttä polttoöljyä, jonka lämpöarvo on 42,5 MJ/l (Bioenergianeuvoja 2024) .Kompostointilaitoksen polttoaineenkulutus jaettiin esikäsittelyyn, tunnelikompostointiin ja seulontaan. Esikäsittelyn polttoaineenkulutuksen oletettiin pysyvän samana, kun taas tunnelikompostoinnin ja seulonnan oletettiin vähenevän samassa suhteessa kuin käsiteltävän massan määrä väheni, ottaen kuitenkin huomioon kahden kompostointikierroksen vaatiman työn.

4.3.4 Kasvihuonekaasupäästöt

Kasvihuonekaasupäästöjen arviointiin käytettiin Ollilan vuonna 2021 HSY:lle tekemää opinnäytetyössä (RAB 2022) saatuja tuloksia. Laskennassa otettiin huomioon kolme tärkeintä kasvihuonekaasua, jotka ovat hiilidioksidi, dityppioksidi sekä metaani. Kullekin kaasulle laskettiin vuoden aikana päästöinä syntyvät hiilidioksiekvivalentit. Päästölähteitä olivat kompostointilasitoksella seulonnan karkea ylite ja väliylite, kompostointiaumat, kompostointilaitoksen piipun kautta poistuvat päästöt ja pyöräkuormaajien aiheuttamat päästöt. Kompostointiprosessissa syntyviä hiilidioksidipäästöjä ei laskettu kasvihuonekaasupäästöiksi, sillä ne ovat peräisin luonnollisesta biologisesta hajoamisprosessista. Biokaa-

sun hyödyntämisessä syntyvät hiilidioksidipäästöt ovat samaan tapaan peräisin biologisesta hajoamisprosessista, mistä johtuen niitä ei yleensä lasketa mukaan kasvihuonekaasupäästöihin. Tässä työssä päätettiin kuitenkin ottaa ne laskentaan mukaan havainnollistamaan kokonaisvaikutusta. Mädätteen käsittelyssä syntyvien päästöjen oletettiin olevan merkityksettömän pieniä. Laskennoissa käytetyt lähtötiedot on esitetty taulukossa 4.8.

Taulukko 4.8. *Kasvihuonekaasupäästöjen laskennan lähtötiedot (Ollila 2021).*

Muuttuja	**Arvo**
Seulonnan määrä (t)	13 405
Aumakompostoinnin määrä (t)	8 172
Kompostointilaitoksen käsittelymäärä (t)	50 651
Karkean ylitteen pinta-ala (m^2)	427
Väliylitteen pinta-ala (m^2)	230
Yhden auman pinta-ala (m^2)	762
Ilmanvirtausnopeus kasoissa ja aumoissa (m/s)	3
Huuvan pohjan pinta-ala/suuaukon pinta-ala	114
Viipymä aumoissa (vrk)	130
Auman kääntöjen lukumäärä (kpl)	5
Käännön vaikutuksen kesto (vrk)	4
CO_2 moolimassa (g/mol)	44,01
N_2O moolimassa (g/mol)	44,013
CH_4 moolimassa (g/mol)	16,04
Yksikönmuunnoskerroin ((mol*mg)/(g*m^3*ppm))	0,0409
Kompostointilaitoksen pohjoisen piipun tilavuusvirta (m^3/s)	10
Kompostointilaitoksen eteläisen piipun tilavuusvirta (m^3/s)	16
Kevyen polttoöljyn lämpöarvo (MWh/l)	0,00998
Kevyen polttoöljyn päästökerroin (g CO_2/kWh)	261,72
Biokaasun hiilidioksidipäästöt	**Arvo**
Biokaasun CO_2-pitoisuus (%)	40
CO_2 tiheys (kg/m^3)	1,87
CH_4 tiheys (kg/m^3)	0,68
C moolimassa (g/mol)	12,011

Laskennoissa käytettiin vuonna 2023 Ämmässuolla osana innovaatiotyötä (Jääskeläinen et al. 2023) mitattujen arvojen pohjalta ilmanvirtausnopeuden arviota, kun taas Ollilan työssä käytettiin alle 1 m/s arvoja. Ylitekasojen ja aumojen pinta-alan arvioitiin muuttuvan samassa suhteessa määrän kanssa laskennan yksinkertaistamiseksi. Lisäksi käytettiin

Ollilan käyttämää arviota, että vain 25 % kasan pinta-alasta on osallisena päästöjen syntymiseen. Aumojen tietoina käytettiin Ollilan työssä käytettyjä arvoja. Kasvihuonekaasupäästöjen pitoisuuksina käytettiin Ollilan työssä mitattuja keskimääräisiä arvoja, jotka on esitetty taulukossa 4.9.

Taulukko 4.9. *Kasvihuonekaasupäästömittausten keskiarvot (Ollila 2021).*

Mittauskohde	**CO_2 (ppm)**	**N_2O (ppm)**	**CH_4 (ppm)**
Karkea ylite	1 207	0,5	8,3
Väliylite	625	0,2	3,6
Auma, ei-käännetty	3 834	0,7	59
Auma, käännetty	14 200	45	68
Pohjoinen piippu	4 661	4,8	97
Eteläinen piippu	3 191	3,2	62

Päästöjen laskemiseksi tuli selvittää paljonko kasoista ja aumoista poistuu virtaavan ilman mukana kasvihuonekaasuja vuodessa. Ylitteiden päästöjen laskenta aloitettiin laskemalla tilavuusvirta *q* kertomalla ilmanvirtausnopeus *v* päästöä aiheuttavalla pinta-alalla *A* kaavan 4.1 avulla.

$$q(\frac{m^3}{s}) = v(\frac{m}{s}) \cdot A(m^2) \tag{4.1}$$

Pitoisuuden mittaukset tehtiin huuvalla, jonka putken suun pinta-ala on pienempi sen pohjan pinta-alaan verrattuna. Huuvan sisällä syntyy mitattaessa painetta, mistä johtuen ilmannopeus huuvasta mitattuna on suurempi kuin mitä se olisi ilman huuvaa. Siksi huuvan vaikutus täytyy ottaa huomioon laskennoissa käyttäen huuvan pohjan pinta-alan (0,89 m^2) suhdetta putken suun pinta-alaan (0,0078 m^2) kaavan 4.2 mukaisesti.

$$0,89m^2 \div 0,0078m^2 = 114 \tag{4.2}$$

Tuloksena saatu massavirta on vuotuinen päästömäärä. Massavirrat laskettiin jokaiselle kasvihuonekaasulle molemmissa ylitteissä.

Aumojen päästöt laskettiin käyttäen samoja kaavoja 4.1 ja 4.2, mutta aumojen käännöt otettiin huomioon päästöjä lisäävänä tekijänä. Massavirrat laskettiin erikseen sekä ei-käännetylle että käännetylle ja summattiin lopuksi yhteen. Viipymät laskettiin käännetylle kertomalla kääntöjen määrä niiden vaikutusten kestolla ja ei-käännetylle vähentämällä kääntöjen viemä aika kokonaisviipymästä. Ylitekasoja oli vain yhdet kappaleet molempia, mutta aumoja laskettaessa tuli ottaa huomioon niiden kokonaislukumäärä.

Kompostointilaitoksen päästöt laskettiin käyttäen samoja kaavoja kuin ylitteiden ja aumojen laskennoissa. Tilavuusvirtoja ei laskettu erikseen vaan niiden arvioitiin pysyvän sama-

na. Ollilan työssä mitattuja pitoisuuksia muutettiin samassa suhteessa kuin käsiteltävän massan määrä muuttuisi. Pitoisuuden ja tilavuusvirran tulona saatiin massavirta. Pyöräkuormaajien kuluttaman polttoaineen määrät ja lämpöarvot saatiin energiataseesta. Nämä arvot kerrottiin kevyen polttoaineen päästökertoimella. Polttoaineen päästöissä huomioitiin vain syntyvät hiilidioksidipäästöt. Kokonaispäästöjä laskettaessa dityppioksidi- ja metaanipäästöt muunnettiin hiilidioksidiekvivalenteiksi käyttäen kertoimia 298 dityppioksidille ja 25 metaanille (Tilastokeskus 2016).

Biokaasun hiilidioksidipäästöt laskettiin käyttäen biokaasun hiilidioksidi- ja metaanipitoisuuksia sekä tiheyksiä määrien selvittämiseksi. Biokaasun sisältämän metaanin oletettiin palavan kokonaan puhtaasti hiilidioksidiksi ja vedeksi. Metaanista syntyvä hiilidioksidi laskettiin yhteen biokaasussa jo olleen hiilidioksidin kanssa, jolloin saatiin kokonaishiilidioksidipäästöt.

4.3.5 Hajut

Hajupäästöt laskettiin aumoille, kompostointilaitokselle sekä vanhalle kompostointilaitokselle. Aumojen hajupäästömittaukset saatiin samasta innovaatiotyöstä kuin kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa käytetty ilmanvirtausnopeus. Mittaukset oli tehty kahdelle eri ikäiselle aumalle ja mittauksia otettiin kahden viikon välein. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 4.10.

Taulukko 4.10. *Aumojen hajumittausten tulokset (Jääskeläinen et al. 2023).*

Mittausajankohta	**Auma B81K**	**Auma B80R**
12.-13.10.2023 (GE_E/m^3)	210	880
26.10.2023 (GE_E/m^3)	3010	880
9.11.2023 (GE_E/m^3)	530	50

Näiden tulosten pohjalta arvioitiin keskiarvo aumojen päästämän ilman hajupitoisuudelle. Mittaushetkistä saatiin auman hajupäästöt sen ollessa 1, 3, 5, 7 ja 9 viikon ikäinen. Näiden viikkojen keskiarvon oletettiin olevan päästöjen keskiarvo koko auman olemassa olon ajan. Laskelmat on tehty hyvin karkeasti sillä todellisuudessa hajumäärät vaihtelevat aumasta toiseen ja kääntöjen vaikutusta on vaikea laskea täsmällisesti. Tässä työssä keskityttiin erojen vertaamiseen ja osoittamiseen, mistä johtuen pitoisuudesta käytettiin karkeaa arviota. Todellisuudessa uuden prosessin myötä komposti on kypsempää, mikä tarkoittaa myös vähemmän hajupäästöjä. Hajupitoisuus kerrottiin aumojen pinta-alalla, aumojen määrällä, ilmanvirtausnopeudella sekä aumojen viipymällä.

Uuden ja vanhan kompostointilaitoksen hajupäästöt laskettiin käyttäen vuonna 2023 laitosten piipuista mitattujen päästöjen keskiarvoja käyttäen. Hajupäästöjen keskiarvot olivat 1 640 GE_E/m^3 kompostointilaitokselle ja 57 GE_E/m^3 vanhalle kompostointilaitokselle.

Kompostointilaitoksen piippujen virtaamina käytettiin kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa käytettyjä virtaamia. Vanhan kompostointilaitoksen virtaama, 36 832 m^3/vrk saatiin HSY:n hajupäästömittauksista. Kompostointilaitoksen hajupäästöjen oletettiin muuttuvan samassa suhteessa kuin käsiteltävän massan määrä muuttuisi. Nykyisessä prosessissa puolet vanhasta kompostointilaitoksesta on kompostoinnin käytössä, mutta hajupäästöjen ollessa hyvin pieniä kompostointilaitokseen ja aumoihin verrattuna, kaikki hajupäästöt allokoitiin kompostoinnille. Uudessa prosessissa vanhaa kompostointilaitosta ei käytetä enää lainkaan kompostointiin, jolloin kompostoinnin hajupäästöjäkään ei enää synny. Hajupäästöt laskettiin kertomalla ilman hajupitoisuus piippujen virtaamilla ja muuntamalla tulos vuosittaiseksi arvoksi.

4.3.6 Operointikustannukset

Operointikustannukset laskettiin RAB:n rapotissa esitetyn arvion pohjalta. RAB:n laskelmissa laskettiin mädätteen käsittelyn kustannukset sekä prosessimuutoksista johtuvat säästöt verrattuna nykyiseen prosessiin. Säästöistä oli tehty kaksi eri laskelmaa, joista toisessa tuotettu lämpöenergia saataisiin hyödynnettyä kokonaan alueen muihin toimintoihin ja uuteen projektiin ja toisessa osa lämpöenergiasta menisi hukkaan. Kustannusten lähtötiedot on esitetty taulukoissa 4.11. ja 4.13. Säästöjen lähtötiedot on esitetty taulukossa 4.12.

Taulukko 4.11. *Ylläpidon ja poistojen kustannusten lähtötiedot (RAB 2022).*

Kuluminen ja varaosat			Lähtökohta	
Mekaaniset laitteet	0,05	kerroin investoinneista	5 180 000	€/a
Sähkölaitteet	0,02	kerroin investoinneista	730 000	€/a
Odottamattomat	0,015	kerroin investoinneista	1 250 000	€/a
Muut				
Rakennusten ylläpito	0,01	kerroin investoinneista	2 430 000	€/a
Laboratoriokustannukset	0,5	€/t	27 900	€/a
Ulkoinen ylläpito	1	€/t	34 800	€/a
Poistot	Vuodet	Korko		
Rakentaminen, infrastruktuuri, ylinen	30	3 %	2 430 000	€/a
Mekaaniset laitteet	15	3 %	5 180 000	€/a
Sähkölaitteet	15	3 %	730 000	€/a
Odottamattomat	15	3 %	1 250 000	€/a
Prosessisuunnittelu, hyväksynnät, kilpailutus jne.	15	3 %	1 250 000	€/a

Taulukko 4.12. *Laitoskohtaisten säästöjen lähtötiedot (RAB 2022).*

Kompostointilaitoksen muutokset			
Vähemmän puumurskaa tukiaineena	-17	€/t	
Vähemmän seulonnan rejektiä	-60	€/t	
Vähemmän tarvetta pyöräkuormaajalle kompostointilaitoksella	-62	€/h	
Vähemmän tarvetta pyöräkuormaajalle aumoilla	-62	€/h	
Vähemmän seulonnan ylitteen jälkikäsittelyä	-29,4	€/t	
Vähemmän aumojen kääntämistä	-2,8	€/t	
Vähemmän kompostin loppuseulontaa	-14,3	€/t	
Vähemmän kompostin markkinointia	-18,5	€/t	
			kWh/t
Vähemmän lämpöenergiaa kompostointiprosessiin (lämpö käytetään)	-75	€/MWh	120
Vähemmän lämpöenergiaa kompostointiprosessiin (lämpö hukkaan)	0	€/MWh	120
Vähemmän sähköä komposointiin	-83,5	€/MWh	42,8
Vähemmän sähköä ilmanpuhdistukseen	-83,5	€/MWh	14,1
Vähemmän sähköä seulontaa	-83,5	€/MWh	5
Vanhan kompostointilaitoksen muutokset			
Vähemmän tarvetta pyöräkuormaajalle	-62	€/h	
			kWh/t
Vähemmän lämpöenergiaa kompostointiprosessiin (lämpö käytetään)	-75	€/MWh	60
Vähemmän lämpöenergiaa kompostointiprosessiin (lämpö hukkaan)	0	€/MWh	60
Vähemmän sähköä kompostointiin	-83,5	€/MWh	33
			kg/t
Vähemmän rikkihappoa	-0,4	€/kg	4,2
Biokaasulaitoksen ja energiantuotannon muutokset			kWh/t
Lisääntyneen syötemäärän tarvitsema lämpöenergia (lämpö käytetään)	75	€/MWh	30
Lisääntyneen syötemäärän tarvitsema lämpöenergia (lämpö hukkaan)	0	€/MWh	30
Hygienisoinnin lämmön myynti (lämpö käytetään)	-75	€/MWh	
Hygienisoinnin lämmön myynti (lämpö hukkaan)	0	€/MWh	
Sähkön kokonaishyötysuhde	40	%	
Sähkön kulutus laitoksella	6	%	
Lämmön kokonaishyötysuhde 40 % (lämpö käytetään)	-75	€/MWh	
Lämmön kokonaishyötysuhde 40 % (lämpö hukkaan)	0	€/MWh	
Toisen kaasumottorin ylläpito	17,05	€/h	

Taulukko 4.13. *Energiankulutuksen ja työn kustannusten lähtötiedot (RAB 2022).*

Erotuspuristin	3	kWh/t syötettä
Ruuvikuljettimet (10 kW)	7,5	kW, kun käytössä
Vedenpoistopuristin	3	kWh/t syötettä
Ruuvikuljettimet (20 kW)	14	kWh/t syötettä
Sentrifugi	2	kWh/t syötettä
Pumput (erotus + hygienisaatio)	2	kWh/t syötettä
Sekoittajat (hygienisaatio)	10	kW, kun käytössä
Sekoittaja (välivarasto 1)	1,5	kW, kun käytössä
Sekoittaja (välivarasto 2)	1,5	kW, kun käytössä
Sekoittaja (3000 m^3 säiliö)	5,2	kW, kun käytössä
Sekoittaja (5600 m^3 säiliö)	9	kW, kun käytössä
Sähkön syöttötariffin perushinta	83,5	€/MWh
Hygienisaation lämmöntarve	22	kWh/t hygienisoitu
Biokaasu hygienisaatioon	50	€/MWh
Valtionapu lannoitteen kuljetukseen	20	€/m^3
Rekka mädätesäiliöiden siirtämiseen	85	€/h
Rekka mädätesäiliöiden siirtämiseen	200	h/a

Näiden laskelmien pohjalta laskettiin kustannukset ja säästöt molemmille vaihtoehdoille, kun lämpö saadaan hyödynnettyyä kokonaan ja kun osa menee hukkaan, toteutumassa olevalle prosessille. Laskelmat suoritettiin käyttäen massataseessa laskettujen eri vaiheiden käsittelymääriä ja lähtötiedoissa esitettyjen vaikutusten avulla. Säästöt sisälsivät myös sähkön myynnistä saatavat tuotot. Tuloksena saatiin paljonko yhden biojäte tonnin käsittelyn kustannukset muuttuvat.

5. TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

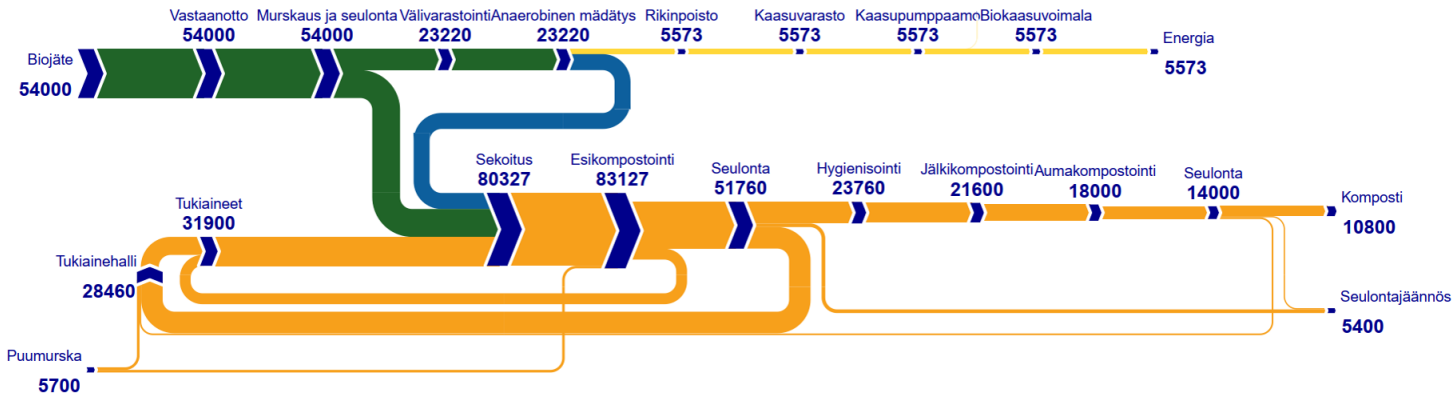
5.1 Prosessimuutosten vaikutus massataseeseen

Tässä työssä tarkasteltiin prosessivaiheiden ja tuotteiden määrien muutoksia prosessivaihtoehtojen välillä massataseen avulla. Massatase osoittaa, että toteutumassa olevassa prosessissa kompostoinnin tarve vähenisi noin 87 %:lla ja lopputuotteiden määrä verrattuna käsiteltävään kokonaismäärään kasvaisi 27 %:sta 79 %:iin mädätteen käsittelyn lisäämisen myötä (Kuva 5.1.).

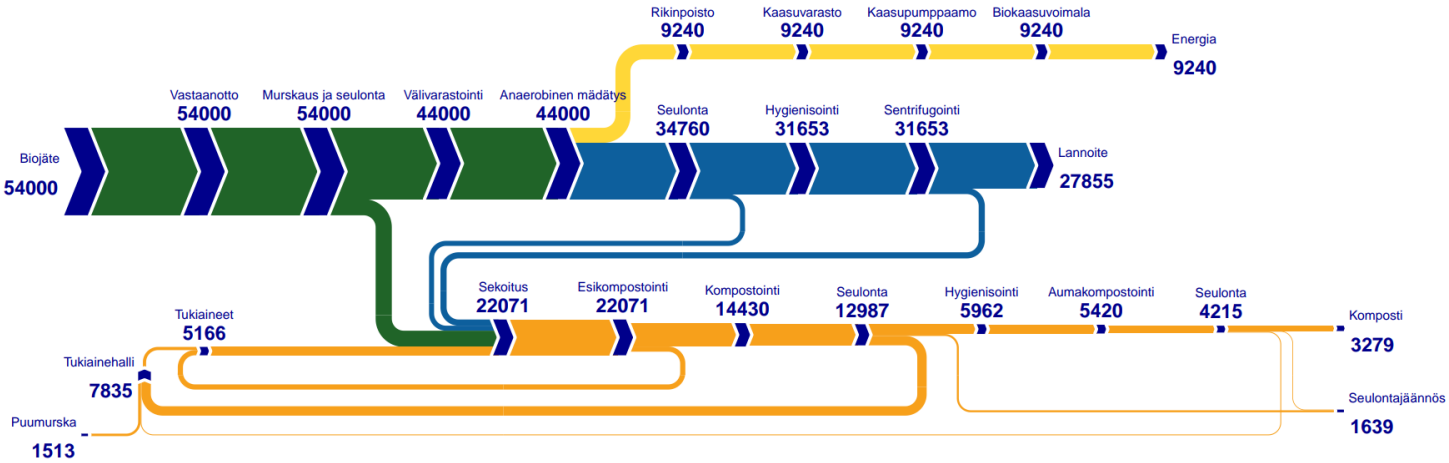
Ensimmäinen ero massataseiden välillä näkyy murskauksen ja seulonnan jälkeen, kun aiemmin yli puolet biojätteestä on mennyt suoraan kompostointiin, mutta suunnitellulla prosessilla vain noin 20 % ja toteutumassa olevalla prosessilla 0 % menisi kompostointiin. Mädätyksellä käsiteltävän määrän lisääntymisen seurauksena tuotettaisiin myös enemmän biokaasua. Nykyisellä prosessilla biokaasuntuotto olisi 5 573 tonnia vuodessa, suunnitellulla 9 240 tonnia vuodessa ja toteutumassa olevalla 10 660, mikä tarkoittaa noin 91 %:n kasvua nykyiseen prosessiin verrattuna.

Suunnitellussa prosessissa tuotettaisiin mädätteen käsittelyllä lannoitetta 27 855 tonnia vuodessa ja toteutumassa olevassa prosessissa 32 135 tonnia vuodessa. Kompostoinnilla käsiteltävän massan määrä vähenisi suunnitellulla prosessilla noin 73 % ja toteutumassa olevalla prosessilla noin 87 % nykyiseen verrattuna. Samoin tuotetun kompostin määrä vähenisi suunnitellulla prosessilla 70 % ja toteutumassa olevalla 86 %.

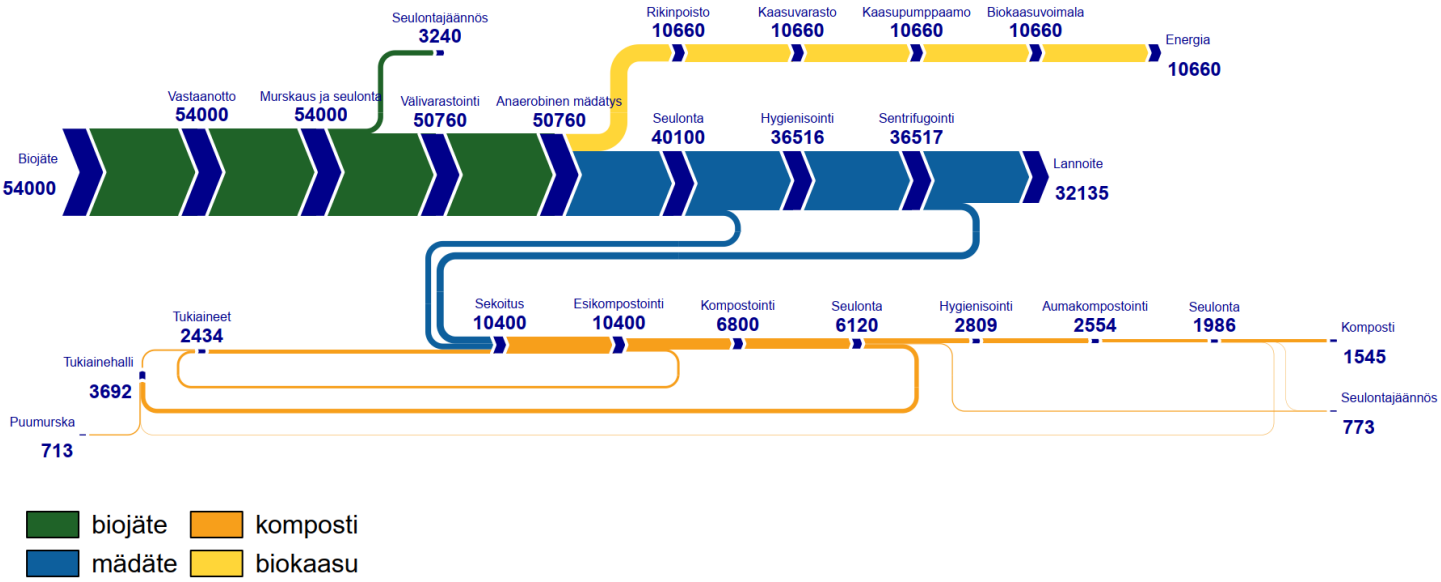
Vaikka mädätteen käsittely vähentää syntyvän kompostin määrää, kasvaa tuotteiden suhde merkittävästi verrattuna nykyiseen prosessiin. Nykyisellä prosessilla tuotteiden määrä olisi 27 % käsitellystä biojätteestä. Suunnitellulla ja toteutumassa olevalla prosessilla suhteet olisivat puolestaan 68 % ja 79 %. Tämä johtuu siitä, että kompostoinnissa ainetta hajoaa ja haihtuu paljon ja vain noin 13 % kompostointiin tulevasta kokonaismassasta päätyisi valmiiksi kompostiksi, kun taas mädätteen käsittelyssä noin 80 % käsiteltävästä massasta päätyisi lopputuotteeksi. Lisäksi huomioitavaa on, että kompostoinnissa tarvittavan tukiaineen määrä vähenisi suunnitellulla prosessilla 85 % ja toteutumassa olevalla 93 % nykyiseen prosessiin verrattuna, mikä tarkoittaa myös tukiainehallin käytön vähenemistä.



(a) *Nykyinen*



(b) *Suunniteltu*

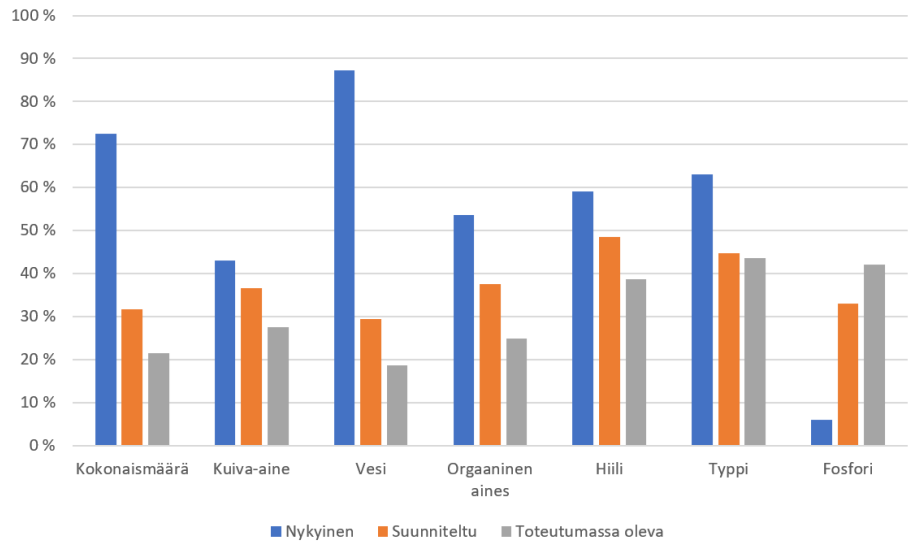


(c) *Toteutumassa oleva*

Kuva 5.1. *Massataseet prosessivaihtoehdoille.*

5.2 Prosessimuutosten vaikutus ainetaseeseen

Kuten massataseista huomattiin, suunnitellulla ja toteutumassa olevalla prosessilla saadaan hyödynnettyä biojätettä paremmin nykyiseen prosessin verrattuna. Tuloksista nähdään, että nykyisen prosessin kokonaishäviöt ovat 73 %, suunnitellun prosessin 32 % ja toteutumassa olevan 21 % (Kuva 5.2.). Eri aineiden hyödyntämisasteet ja häviöt laskettiin ainetaseiden avulla.



Kuva 5.2. *Ainehäviöt prosesseissa.*

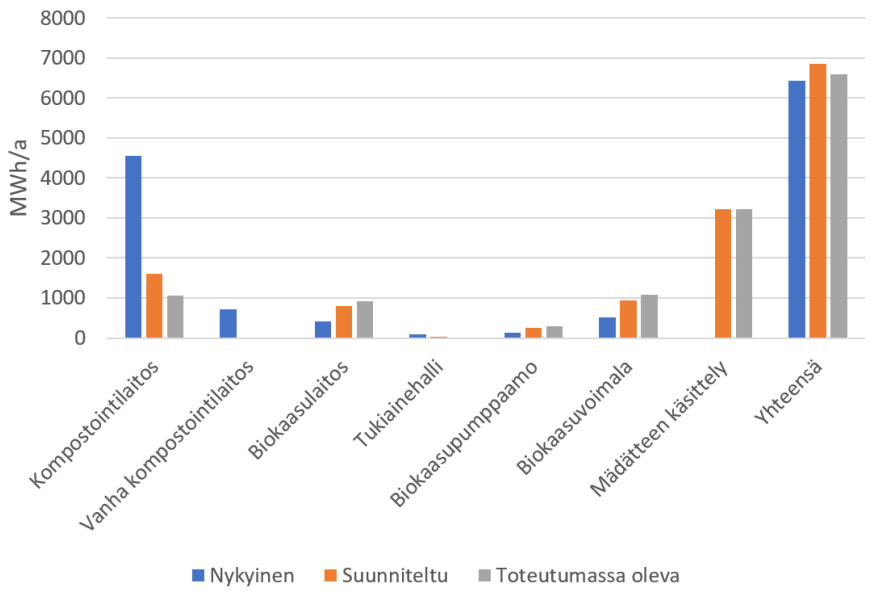
Lähes kaikilla aineilla suunnitellun ja toteutumassa olevan prosessin häviöt pienenevät verrattuna nykyiseen prosessiin. Ainoa kategoria, jossa häviöt suurenevat on fosfori. Suurimmat muutokset tapahtuvat kokonaismäärässä ja veden määrässä. Toteutumassa olevassa prosessissa kuiva-aineen häviö olisi 28 %, kun se saataisiin hyödynnettyä lannoitteena, biokaasuna ja kompostina. Orgaanista ainesta häviää sen hajotessa kompostoinnissa, mutta biokaasuksi muuttuessaan se lasketaan tuotteeksi. Hiilen hävikki laskee nykyisen prosessin 59 %:sta toteutumassa olevan 39 %:iin. Hiilen palauttaminen kiertoon ja erityisesti maaperään on tärkeää, jotta viljelyyn käytettävä maaperä hiilipitoituus saadaan pysymään korkeana, mikä takaa sen hyväkuntoisuuden (Gerke 2022). Maaperä on myös suuri hiilinielu, jossa hiili pysyy pitkään. Vaikka hiilen häviöt ovat pienemmät suunnitellulle ja toteutumassa olevalle prosessille, johtuu se pääasiassa lisääntyneestä biokaasun tuotannosta. Lannoitteessa ja kompostissa olevan hiilen määrä puolestaan pienenee suunnitellulla ja toteutumassa olevalla prosessilla.

Typen häviöt pienenevät nykyisen ja toteutumassa olevan prosessin välillä 19 prosenttiyksikköä. Typpi päätyy suurimmaksi osaksi lannoitteeseen, mikä takaa sen ravinnepitoisuuden. Typen ollessa tärkeä ravinne kasvien kasvulle, on ensisijaisen tärkeää, että se saadaan palautettua kiertoon mahdollisimman tehokkaasti. Fosforin pitoisuuden tuotteissa oletettiin pysyvän samana prosessivaihtoehtojen välillä. Todellisuudessa fosforin pi-

toisuus tuotteissa kasvaisi prosessimuutoksen myötä, mistä johtuen tulosten perusteella fosforin häviöt kasvavat (Gareis 2024).

5.3 Prosessimuutosten vaikutus energiataseeseen

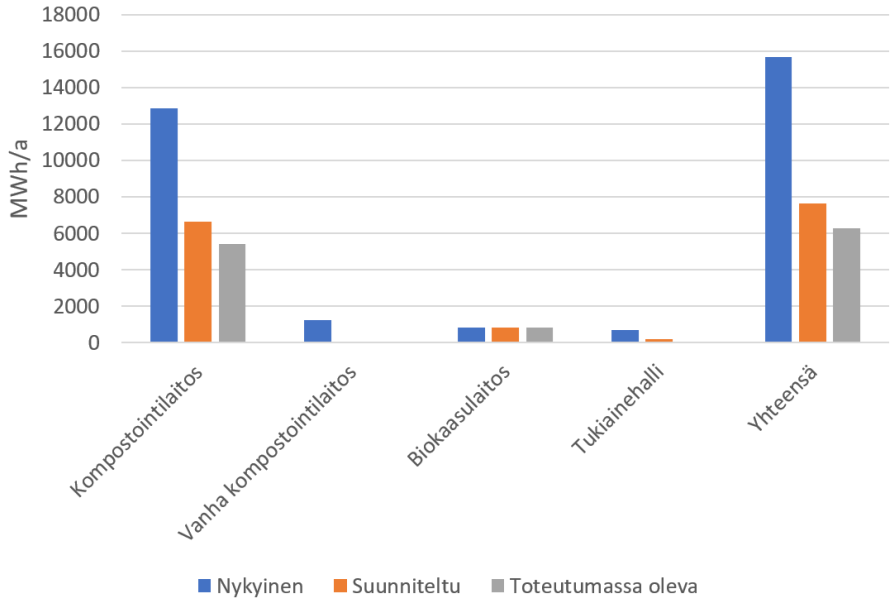
Kuten massa- ja ainetaseet, myös energiankulutukset muuttuvat merkittävästi vaihtoehtojen välillä. Kokonaissähkönkulutus pysyy lähes samana, suunnitellun prosessin kulutuksen ollessa noin 6,5 % suurempi ja toteutumassa olevan 2,4 % suurempi nykyiseen prosessiin verrattuna (Kuva 5.3.).



Kuva 5.3. *Sähkönkulutus prosessien eri vaiheissa.*

Merkittävin ero on kompostointilaitoksen ja mädätteen käsittelyn kulutuksissa. Kompostointilaitoksen kulutus tippuu suunnitellulle ja toteutumassa olevalla prosessilla merkittävästi johtuen vähenevästä kompostoinnista. Ero on suunnitellulle noin 65 % ja toteutumassa olevalle noin 77 %. Mädätteen käsittelyä ei nykyisessä prosessissa ole, joten siitä aiheutuva sähkönkulutus syntyy vain suunnitellussa ja toteutumassa olevassa prosessissa. Kuten kuvaajasta nähdään, mädätteen käsittelyn kulutus on lähes yhtä paljon kuin kompostointilaitoksella kulutus vähenee. Kompostoitavan määrän vähentyessä vanhan kompostointilaitoksen tiloja ei tarvitse enää käyttää kompostointiin, kun kompostointi voidaan suorittaa uudella kompostointilaitoksella, mistä johtuen sen energiankulutusta ei huomioida suunnitellun ja toteutumassa olevan prosessin laskennoissa. Biokaasulaitoksen kulutus kasvaisi käsittelymäärän kasvaessa ja biokaasupumppaamon ja -voimalan kulutukset nousisivat lisääntyneen biokaasun tuotannon myötä. Tukiainehallin käytön vähenemisen myötä myös sen sähkönkulutus laskee suunnitellulla ja toteutumassa olevalla prosessilla. Kuvaajasta nähdään kuinka nykyisen prosessin sähkönkulutus on painottunut kuvaajan vasemmalla puolella oleville vaiheille, kun taas suunnitellulla ja toteutumassa olevalla prosessilla painopiste on selkeästi oikealla puolella olevilla vaiheilla.

Toisin kuin sähkön kokonaiskulutuksissa, lämmönkulutuksissa nähdään selkeä ero prosessivaihtoehtojen välillä. Tuloksista nähdään, että suunnitellun prosessin kulutus vähenee noin 51 % ja toteutumassa olevan noin 60 % nykyiseen prosessiin verrattuna (Kuva 5.4.). Vertailtaessa kuvaa 5.4. kuvaan 5.3. huomataan, että ne näyttävät hyvin samalta. Erityisesti vanhan kompostointilaitoksen ja tukiainehallin kulutusten muutos on lähes identtinen.

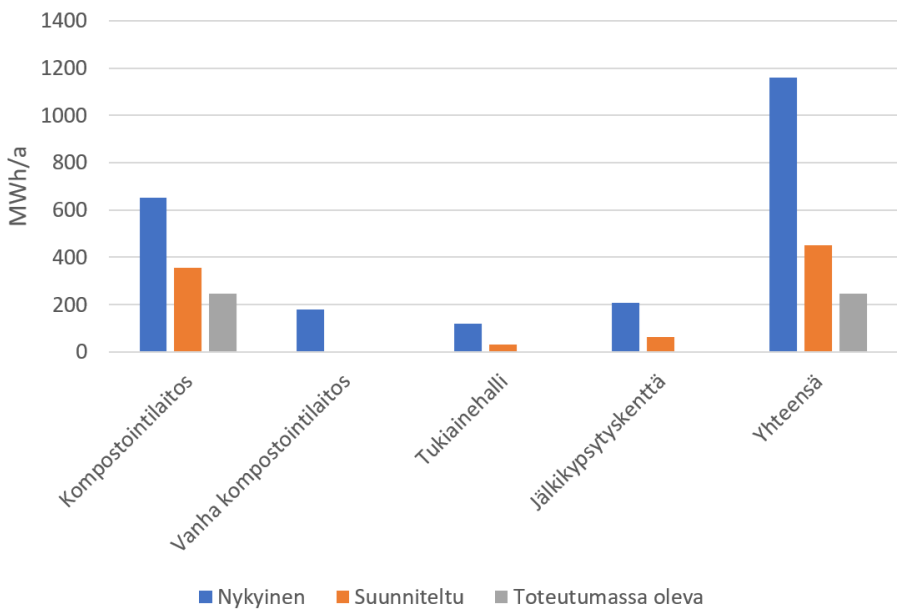


Kuva 5.4. *Lämmönkulutus prosessien eri vaiheissa*

Helpoiten nähtävä muutos on kompostointilaitoksen kulutuksessa. Sähkönkulutukseen verrattuna muutokset eivät ole aivan yhtä suuria. Suunnitellulla prosessilla kompostointilaitoksen lämmönkulutus vähenee noin 48 % ja toteutumassa olevalla noin 58 %. Tämä johtuu pienenevästä prosessilämmön tarpeesta käsittelymäärien vähentyessä. Muutoksista huolimatta suurin osa lämmöstä kuluu kompostointilaitoksella ja vain pieni osa muissa vaiheissa.

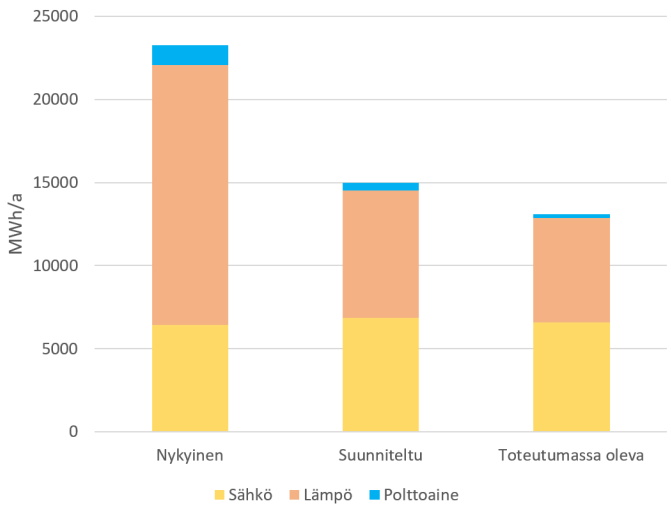
Samaan tapaan kuin lämmön kokonaiskulutuksilla, prosessivaihtoehtojen polttoaineen kokonaiskulutusten erot on selvästi nähtävissä. Suunnitellun prosessin kulutus laskee noin 61 % ja toteutumassa olevan noin 79 % (Kuva 5.5.)

Taas kuvasta huomataan, että suunnitellun prosessin kulutus vähenee noin 45 % ja toteutumassa olevan noin 62 %. Muuta huomioitavaa on, että toteutumassa olevan prosessin ainoa kulutus syntyy kompostointilaitoksella vanhan kompostointilaitoksen, tukiainehallin ja jälkikypsytyskentän toimintojen siirtyessä muuhun käyttöön. Polttoaineenkulutus syntyy pyöräkuormaajilla tehtävästä työstä, mistä voidaankin päätellä, että kompostoinnissa käsiteltävän massan määrä ja sen siirtämiseen tarvittava työ vähenee merkittävästi.



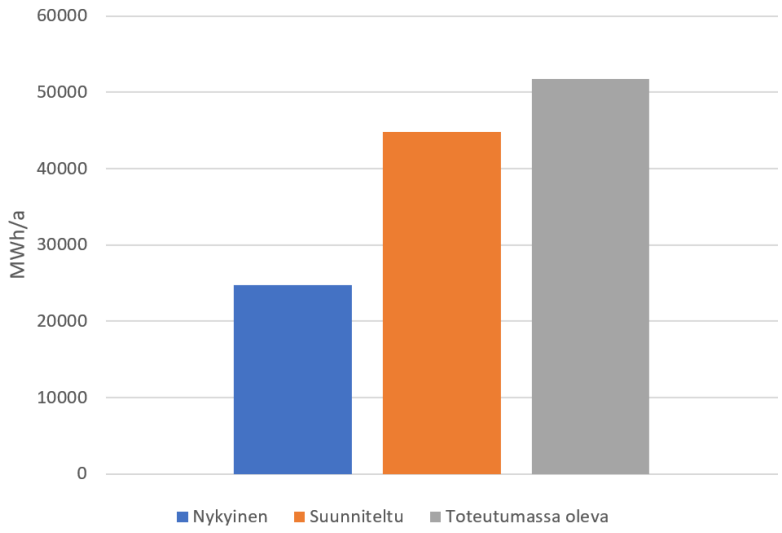
Kuva 5.5. *Polttoaineenkulutus prosessien eri vaiheissa.*

Kokonaisenergiankulutukset vähenevät suunnitellulle prosessille noin 36 % ja toteutumassa olevalle noin 44 % nykyiseen prosessiin verrattuna (Kuva 5.6.). Polttoaineenkulutus on vain pieni osa kokonaiskulutusta verrattuna sähköön ja lämpöön, joten suuret muutokset vaikuttavat kokonaisuuteen vain vähän. Merkittävin muutos prosessien välillä syntyy lämmönkulutuksesta.



Kuva 5.6. *Kokonaisenergiankulutukset prosessivaihtoehdoille.*

Energiankulutuksen lisäksi tulee huomioida tuotetun biokaasun määrä ja energiasisältö. Nykyiseen prosessiin verrattuna suunnitellun prosessin biokaasun tuotanto kasvaisi noin 82 % ja toteutumassa olevan noin 109 % (Kuva 5.7.). Kussakin prosessissa tuotettu energiamäärä on suurempi kuin prosessin kuluttama energia, mutta nykyisen prosessin tapauksessa vain 6 %. Suunnitellulle prosessille vastaava arvo olisi noin 207 % ja toteutumassa olevalle noin 411 %.



Kuva 5.7. *Biokaasuntuotanto prosessivaihtoehdoille*

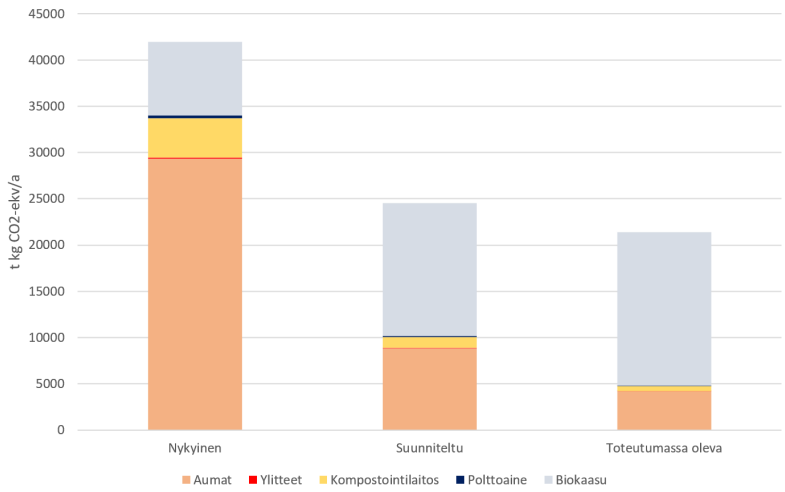
Biokaasun tuotannon lisääminen oli koko prosessiuudistuksen takana oleva lähtökohta, mistä johtuen sen kasvaminen toteutumassa olevassa prosessissa on erityisen tärkeää. Tuloksissa on otettu jo huomioon CHP-laitoksen hyötysuhde 0,75, joten tulokset ovat tuotetun energian kokonaismääriä. Kulutettu ja tuotettu energia eivät vertaudu aivan yksi yhteen johtuen muun muassa polttoaineen tarpeesta ja sähkön ja lämmön eri suhteista kulutuksessa ja tuotannossa, mutta yleisenä vertailuna voidaan todeta, että toteutumassa oleva prosessi on merkittävästi energiatehokkaampi nykyiseen prosessiin verrattuna.

5.4 Prosessimuutosten vaikutus ympäristövaikutuksiin

5.4.1 Kasvihuonekaasupäästöt

Samaan tapaan kuin muissakin laskennoissa nähdään tuloksista, että kasvihuonekaasupäästöt vähenevät suunnitellulla prosessilla 42 % ja toteutumassa olevalla prosessilla 49 % (Kuva 5.8.). Kun biokaasun päästöjä ei oteta huomioon olisivat luvut vastaavasti 30 % suunnitellulle ja 86 % toteutumassa olevalle prosessille.

Suurin kasvihuonekaasujen päästölähde on kompostointiprosessin aumat. Aumoista vapautuu hajoamisen myötä kasvihuonekaasuja ja viipymäajat ovat pitkiä. Aumoja tulee kääntää säännöllisesti ja varmistaa näin, että aerobiset olosuhteet säilyvät läpi kompostin suurten metaanipäästöjen välttämiseksi. Koska aumat ovat pihalla, ei niiden päästöjä pystytä jälkikäsittelemään. Aumojen päästöt vähenevät, kun aumoissa käsiteltävän kompostin määrä vähenee. Nykyiseen prosessin verrattuna suunnitellun prosessin päästöt aumoista vähenevät noin 70 % ja toteutumassa olevan noin 85 %. Kompostointilaitoksen päästöt pienenevät lähes samassa suhteessa ollen 73 % ja 87 %.

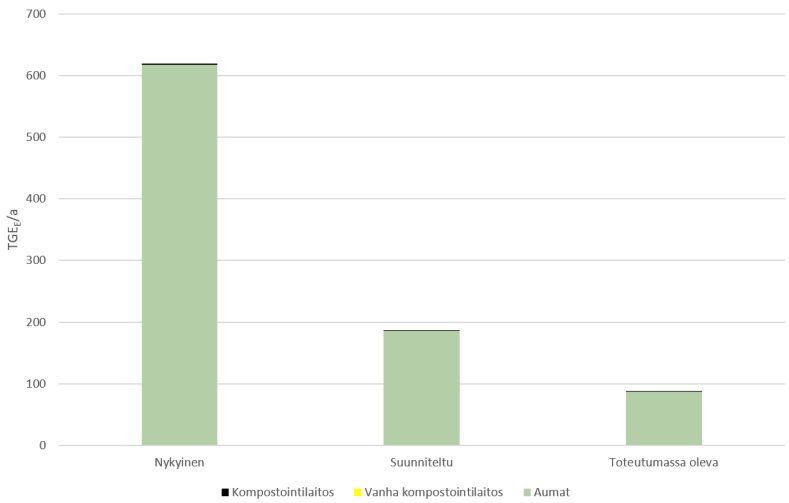


Kuva 5.8. *Prosessivaihtoehtojen kasvihuonekaasupäästöt.*

Ylitteistä ja polttoaineenkulutuksesta syntyvät päästöt ovat lähes olemattomia aumojen ja kompostointilaitoksen päästöihin verrattuna (yhteenlaskettuna <1 % kokonaispäästöistä). Laskennoissa on otettu huomioon myös biokaasun energiahyödyntämisestä syntyvät hiilidioksidipäästöt osoittamaan niiden suuruus verrattuna muihin päästöihin. Biokaasun aiheuttamat päästöt kasvavat samassa suhteessa, kuin biokaasun määrä lisääntyy. Biokaasun huomioon ottaminen tasoittaakin prosessivaihtoehtojen välisiä eroja, mutta ei muuta keskinäistä järjestystä. Todellisuudessa biokaasun päästöjen vertailemiseksi tulisi ottaa myös huomioon sen korvaamien polttoaineiden ja energianlähteiden päästöt.

5.4.2 Hajupäästöt

Kasvihuonekaasupäästöjen tapaan hajupäästöt vähenisivät suunnitellulla prosessilla noin 70 % ja toteutumassa olevalla noin 86 % (Kuva 5.9.). Kuvasta nähdään suoraan, että lähes kaikki hajupäästöt syntyvät aumoista.

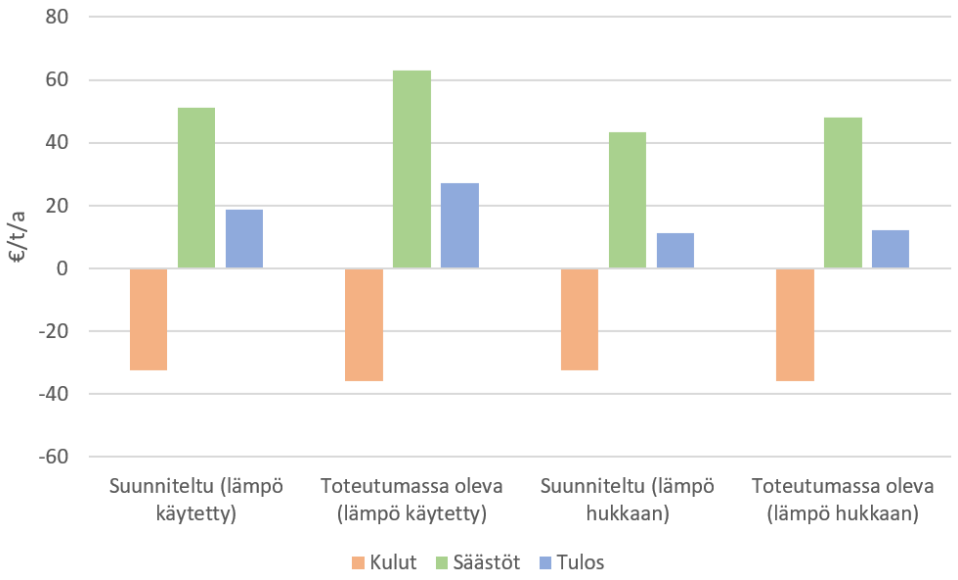


Kuva 5.9. *Prosessivaihtoehtojen hajupäästöt.*

Aumojen päästöihin verrattuna kompostointilaitoksen ja vanhan kompostointilaitoksen päästöt ovat häviävän pieniä. Ulkona pitkään olevista aumoista leviää helposti hajua ympäristöön. Aumoissa käsiteltävän kompostin määrän vähentyessä, vaikuttaa se myös suoraan hajupäästöihin. Hajupäästöjen laskeminen ja arvioiminen tarkasti on kuitenkin haastavaa muuttuvien olosuhteiden, käsiteltävän massan laadun ja mittausten epävarmuuden myötä.

5.5 Prosessimuutosten vaikutus kustannuksiin ja säästöihin

Muiden tulosten tapaan myös taloudellinen tarkastelu puoltaa prosessimuutoksen paremmuutta. Kun osan tuotetusta lämmöstä oletetaan jäävän käyttämättä, suunnitellun prosessin säästöt olisivat noin 11,1 euroa per tonnia käsiteltyä biojätettä ja toteutumassa olevan noin 12,1 euroa per tonnia käsiteltyä biojätettä (Kuva 5.10.). Tämä vastaa suunnitellulla prosessilla noin 600 000 euroa vuodessa ja toteutumassa olevalla noin 650 000 euroa vuodessa. Molempien prosessien säästöille laskettiin kaksi vaihtoehtoa, joista toisessa lämpö saadaan hyödynnettyä kokonaisuudessan ja toisessa ylitse jäävä lämpö jäisi käyttämättä.



Kuva 5.10. *Prosessivaihtoehtojen kustannukset, säästöt ja tulos.*

Kuvasta nähdään, että kaikilla vaihtoehdoilla säästöt ylittävät kustannukset. Toteutumassa olevalla prosessilla sekä kustannukset että säästö ovat suurempia suunniteltuun prosessiin verrattuna. Tämä johtuu lisääntyvästä mädätyksestä, mikä lisää kustannuksia, sekä pienenevästä kompostointimäärästä ja kasvavasta biokaasun tuotannosta, jotka kasvattavat säästöjä. Kasvava biokaasun tuotanto tarkoittaa myös lisääntynyttä sähköntuotantoa, minkä tuotot on laskettu säästöihin. Osan lämmöstä jäädessä käyttämättä säästöt pienenevät. Tässä laskelmassa ei ole otettu huomioon kompostin tai lannoitteen myymisestä saatavia tuottoja. Näiden huomioiminen lisäisi kuitenkin suunnitellun ja toteutumas-

sa olevan prosessin tuottoja myytävien loputuotteiden määrän kasvaessa. Taloudellisesta näkökulmasta toteutumassa oleva prosessi olisi siis kannattavin.

5.6 Kiertotalousnäkökulma

Prosessimuutoksen myötä mädätyksen kapasiteetti saataisiin nostettua maksimiin ja samalla kompostoinnilla käsiteltävä määrä vähenisi merkittävästi. Kaikki tulokset osoittavat, että prosessimuutos on kannattava. Biokaasua saadaan tuotettua enemmän ja tuotetulla lannoitteella saadaan palautettua ravinteet takaisin kiertoon. Biojäte saadaan kokonaisuudessaan paremmin kierrätettyä, kun häviöitä syntyy merkittävästi vähemmän. Sähkönkulutus pysyy lähes samana, mutta lämmön- ja polttoaineenkulutuksen pienentyessä, kokonaisenergiankulutus vähenee huomattavasti. Kompostoinnin ja erityisesti aumojen vähentyessä sekä kasvihuonekaasupäästöt että hajupäästöt pienenevät. Myös taloudellisesti sekä suunniteltu että toteutumassa oleva prosessi ovat kannattavia kustannusten ollessa säästöjä pienemmät.

Lisääntynyt biokaasun tuotanto tarkoittaa, että laitoksen energiaomavaraisuus paranee ja ylitse jäävää energiaa voidaan myydä eteenpäin. Tällöin biokaasulla saadaan korvattua mahdollisesti fossiilisilla polttoaineilla tuoetttua energiaa. Jos biokaasua ei käytettäisi lämmön ja sähkön yhteistuotantoon, voitaisiin siitä jalostaa biopolttoainetta liikenteen käyttöön. Tällöin tuotetulla biokaasulla saataisiin vähennettyä ajoneuvojen kasvihuonekaasupäästöjä jopa 60-80 % fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna (International Renewable Energy Agency 2018).

Samaan tapaan kuin biokaasulla saadaan korvattua fossiilisia polttoaineita, lannoitteella saadaan korvattua neitseellisistä raaka-aineista tuotettua lannoitetta. Toteutumassa olevalla prosessilaa tuotetaan vuodessa lannoitetta noin 32 000 tonnia. Lannoitteessa olevan typen määrän perusteella sen avulla pystyttäisiin vuosittain korvaamaan 870 tonnia maataloudessa yleisesti käytettävää YaraMila Y 1 -mineraalinnoitetta (Pirkkamaa 2021; Yara 2024). Lannoitteen käytöllä saadaan raaka-aineiden lisäksi korvattua lannoitteiden tuotannossa syntyviä päästöjä ja kulutuksia.

Mädätteen käsittelylaitos on ainoa rakentamista vaativa osa prosessimuutoksessa. Muiden laitosten käyttöaste pääasiassa pienenee ja osaa laitoksista ei tarvita enää lainkaan. Esimerkiksi vanhan kompostointilaitoksen tiloja ei tarvita enää lainkaan ja tukiainehallin ja jälkikäsittelykentän käyttö loppuu lähes täysin. Näiden laitosten ja alueiden vaikutuksia ei tällöin tarvitse enää huomioida biojätteen käsittelyssä. Tällöin vapautuu kapasiteettia, jota voidaan käyttää muihin toimintoihin, mikä voi lisätä koko Ämmässuon tuottavuutta.

Biojätteen käsittelyn käyttöasteen nostaminen ei ole kuitenkaan aivan suoraviivaista ja se tuo mukanaan uusia ongelmia. Käyttöasteen noustessa orgaanisen aineen luoma kuormitus reaktorissa kasvaa. Samalla typen määrä reaktorissa nousee, mikä voi haitata reak-

tiotasapainoa. Toteutumassa olevassa prosessissa mädätyksen käyttöaste on nimelliskapasiteettia suurempi, mikä voi aiheuttaa haasteita käytännön toteutuksessa. Jotta prosessin tasapaino ei muutu liikaa, tulee käyttöasteen nostaminen suorittaa hitaasti ja hallitusti. Oman haasteensa luo myös Suomen pitkä talvi. Talvella laitokselle saapuva biojäte on kylmempää kuin muina vuodenaikoina, mistä johtuen mikrobien toiminta hidastuu ja hydrolyysi ei ole päässyt alkamaan ennen laitokselle saapumista. Tällöin hajoamisreaktion käynnistyminen vie pidempään ja joko käsittelyaikoja täytyy pidentää tai mädäte tulee jättää raaemmaksi. Toteutumassa olevassa prosessissa reaktoria operoitaisiin maksimikapasiteetilla, mistä johtuen käsittelyaikojen pidentäminen ei välttämättä ole mahdollista. Mädätyksen kapasiteetin ollessa prosessimuutoksen jälkeen jo maksimissaan, biojätteen käsittelykapasiteetin lisääminen koko laitoksella johtaisin nopeasti joko mädätyksen viipymäajan lyhentämiseen, jolloin mädäte ei olisi yhtä kypsää, tai kompostoinnin määrän kasvattamiseen. Toimenpide-ehdotuksena käyttöasteen ja kylmyyden luomia haasteita sekä yleisesti käytännön toteutusta olisi hyvä tutkia.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tarkasteltiin Ämmässuon biojätteen käsittelyprosessin kehittämisen ympäristöllisiä ja taloudellisia vaikutuksia prosessin kestävyyteen. Kirjallisuuden perusteella mädätteen käsittelyn käyttäminen kompostoinnin sijaan vähentää ympäristövaikutuksia ja käsittelyn tilantarvetta. Prosessimuutoksen myötä kompostoinnin määrä vähenisi ja biokaasun tuotanto lisääntyisi. Lisäksi mädätteen käsittelyn lopputuotteena saataisiin maatalouden käyttöön sopivaa lannoitetta. Tulokset osoittavat prosessimuutoksen olevan kestävyyden kannalta parempi ratkaisu nykyiseen prosessiin verrattuna. Lähes kaikilla mittareilla suunnitellun ja toteutumassa olevan prosessin kulutukset ja päästöt laskivat ja lopputuotteiden määrät kasvoivat. Hankkeen tavoitteena on lisätä biokaasun tuotantoa ja prosessimuutoksen myötä se kasvaisi jopa 109 %. Samaan aikaan energiankulutus laskisi toteutumassa olevalla prosessilla noin 44 % lämmönkulutuksen aiheuttaessa suurimman muutoksen. Nykyisellä prosessilla tuotetun energian määrä olisi 6 % kulutusta suurempi, kun taas toteutumassa olevalla ero olisi yli 400 %.

Prosessimuutoksen myötä biojäte saadaisiin hyödynnettyä aiempaa tehokkaammin. Nykyisessä prosessissa syntyvien lopputuotteiden määrä käsitellyn biojätteen määrään verrattuna olisi 27 % ja toteutumassa olevalla 79 %. Kompostoinnin määrä vähenisi 87 %:lla nykyisen ja toteutumassa olevan prosessin välillä. Tämä väheneminen merkitsisi sitä, että vanhan kompostointilaitoksen tiloja ei enää tarvittaisi käsittelyprosessissa, mahdollistaen niiden käytön muissa toiminnoissa. Samoin jälkikypsytyskentältä vapautuisi tilaa aumojen vähentyessä, mikä laskisi myös toteutumassa olevan prosessin kasvihuonekaasupäästöjä sekä hajupäästöjä 86 % nykyiseen prosessiin verrattuna. Prosessimuutos toisi myös säästöjä operointikustannuksiin noin 12,1 €/t käsiteltyä biojätettä, kun oletetaan, että kaikkea lämpöä ei saada hyödynnettyä. Mädätteestä saatavalla lannoitteella saataisiin korvattua maataloudessa käytettyjä mineraalilannoitteita noin 870 tonnilla vuodessa.

Mädätyksen kapasiteetin äkillinen nostaminen voi horjuttaa reaktiotasapainoa, mistä johtuen muutos tehdään hallitusti. Toteutumassa olevassa prosessissa mädätyksen kapasiteetti ylittäisi nimelliskapasiteettinsa, mikä ei välttämättä ole todellisuudessa mahdollista. Myös lisääntyvän orgaanisen aineen luoma kuorma voi olla haitaksi mädätysprosessille. Jatkotutkimuksina kannattaisi selvittää käytännön totetuksen suorittamista ja haasteisiin vastaamista. Prosessimuutos on kuitenkin selkeästi kannattava ja se lisää prosessin kestävyyttä sekä ympäristön että talouden kannalta.

LÄHTEET

Albers, M., Helle, H., Varpula, T., Itävaara, M., Kapanen, A. ja Vikman, M. (2003). *Kompostointiprosessin monitorointi ja ohjaus. Kirjallisuusselvitys*.

Angelidaki, I., Boe, K. ja Ellegaard, L. (2005). Effect of operating conditions and reactor configuration on efficiency of full-scale biogas plants. *Water Science and Technology* 52 (1/2), s. 189–194.

Bachmann, E. S. A. N. (2013). 8 - Design and engineering of biogas plants. Toim. A. Wellinger, J. Murphy ja D. Baxter. The Biogas Handbook. Woodhead Publishing, s. 191–211.

Bioenergianeuvoja (2024). *Energia-arvot ja muuntokertoimet*. (viitattu: 4.2.2024). URL: https://www.bioenergianeuvoja.fi/faktaa/biopolttoaineiden-muuntokertoimia/.

Biosantech, T. A. S., Rutz, D., Janssen, R. ja Drosg, B. (2013). 2 - Biomass resources for biogas production. Toim. A. Wellinger, J. Murphy ja D. Baxter. The Biogas Handbook. Woodhead Publishing, s. 19–51.

Bochmann, G. ja Montgomery, L. F. R. (2013). 4 - Storage and pre-treatment of substrates for biogas production. Toim. A. Wellinger, J. Murphy ja D. Baxter. The Biogas Handbook. Woodhead Publishing, s. 85–103.

Braguglia, C. M., Gallipoli, A., Gianico, A. ja Pagliaccia, P. (2018). Anaerobic bioconversion of food waste into energy: A critical review. *Bioresource technology* 248. ID: 271433, s. 37–56.

Carliell-Marquet, C., Esposito, G., Hullebusch, E. D. van, Fermoso, F. G. ja Collins, G. (2018). *Anaerobic Digestion*. English. Frontiers Media SA.

Cerda, A., Artola, A., Font, X., Barrena, R., Gea, T. ja Sánchez, A. (2018). Composting of food wastes: Status and challenges. *Bioresource technology* 248. ID: 271433, s. 57–67.

Cioabla, A., Ionel, I., Dumitrel, G. ja Popescu, F. (2012). Comparative study on factors affecting anaerobic digestion of agricultural vegetal residues. *Biotechnol Biofuels* 5.39.

Colon, J., Cadena, E., Pognani, M., Barrena, R., Sanchez, A., Font, X. ja Artola, A. (2012). Determination of the energy and environmental burdens associated with the biological treatment of source-separated Municipal Solid Wastes. *Energy Environ. Sci.* 5 (2), s. 5731–5741.

Colón, J., Cadena, E., Pognani, M., Barrena, R., Sánchez, A., Font, X. ja Artola, A. (2012). Determination of the energy and environmental burdens associated with the biological treatment of source-separated Municipal Solid Wastes. *Energy Environ. Sci.* 5 (2), s. 5731–5741.

Deublein, D. ja Steinhauser, A. (2008). Biogas from waste and renewable resources: An Introduction. WILEY-VCH, Weinheim, s. 361–388.

Dioha, I., Ikeme, C., Nafi'u, T., Soba, N. ja M.B.S, Y. (2013). Effect of carbon to nitrogen ratio on biogas production. *International Research Journal of Natural Sciences* 1.3, s. 1–10.

Dumont, N. L. M., Luning, L., Yildiz, I. ja Koop, K. (2013). 11 - Methane emissions in biogas production. Toim. A. Wellinger, J. Murphy ja D. Baxter. The Biogas Handbook. Woodhead Publishing, s. 248–266.

EC, e. a. (2017). *Study on the review of the list of critical raw materials — final report*.

Epstein, E. (2003). Land application of sewage sludge and biosolids.

European Environment Agency (2020). *Bio-waste in Europe - turning challenges into opportunities*. (viitattu: 18.12.2023). URL: https://www.eea.europa.eu/publications/bio-waste-in-europe.

Gareis, C. (2024). Toimintovastaava, biokierrätys, Helsingin seudun ympäristöpalvelut - kuntayhtymä HSY, Espoo. Keskustelu. *HSY*.

Gerke, J. (2022). The Central Role of Soil Organic Matter in Soil Fertility and Carbon Storage. *Soil Systems* 6.2.

Gomez, C. D. C. (2013). 1 - Biogas as an energy option: an overview. Toim. A. Wellinger, J. Murphy ja D. Baxter. The Biogas Handbook. Woodhead Publishing, s. 1–16.

Huang, R., Fang, C., Lu, X., Jiang, R. ja Tang, Y. (2017). Transformation of Phosphorus during (Hydro)thermal Treatments of Solid Biowastes: Reaction Mechanisms and Implications for P Reclamation and Recycling. *Environmental Science & Technology* 51.18, s. 10284–10298.

International Renewable Energy Agency (2018). *Biogas for Road Vehicles - Technology Brief*. International Renewable Energy Agency, IRENA.

Jääskeläinen, A., Kupiainen, M. ja Louhenmaa, K. (2023). Kenttätoiminnan hajupäästöjen mittaus. *Energia- ja ympäristötekniikka, Raportti*. URL: https://biokierto.fi/wp-content/uploads/2019/06/Orgaanisen_jatteen_kerays_ja_kasittely_Suomessa.pdf.

Kallio, M. (2010). *VTT Report of Agriforenergy2, Jyväskylä, IEE/08/600/SI2.528577*.

Kantoluoto, N. (2020). Ämmässuon ekoteollisuuskeskuksen biojätteen käsittelyn massatase ja energiatase.

Kaparaju, P. ja Rintala, J. (2013). 17 - Generation of heat and power from biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants and fuel cells. Toim. A. Wellinger, J. Murphy ja D. Baxter. The Biogas Handbook. Woodhead Publishing, s. 404–427.

Kawai, M., Nagao, N., Tajima, N., Niwa, C., Matsuyama, T. ja Toda, T. (2014). The effect of the labile organic fraction in food waste and the substrate/inoculum ratio on anaerobic digestion for a reliable methane yield. *Bioresource technology* 157, s. 174–180.

Krich, K., Augenstein, D., Batmale, J., Benemann, J., Rutledge, B. and Salour, D. (2005). *Biomethane from dairy waste: A sourcebook for the production and use of renewable natural gas in California*. (viitattu: 19.12.2023). URL: http://www.biogas.psu.edu/pdfs/BiomethanefromDairysourcebook.pdf.

Krogmann, U. (1994). Kompostierung - Grundlagen zur Einsammlung und Behandlung von Bioabfällen unterschiedlicher Zusammensetzung (Composting - basics of collection and processing of biowastes of different compositions). Tohtorinväitöskirja. Technical University of Hamburg-Harburg.

Lin, L., Xu, F., Ge, X. ja Li, Y. (2018). Improving the sustainability of organic waste management practices in the food-energy-water nexus: A comparative review of anaerobic digestion and composting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89. ID: 271969, s. 151–167.

El-Mashad, H. M. ja Zhang, R. (2010). Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresource technology* 101.11, s. 4021–4028.

Maulini-Duran, C., Artola, A., Font, X. ja Sánchez, A. (2014). Gaseous emissions in municipal wastes composting: Effect of the bulking agent. *Bioresource technology* 172, s. 260–268.

Nagao, N., Tajima, N., Kawai, M., Niwa, C., Kurosawa, N., Matsuyama, T., Yusoff, F. M. ja Toda, T. (2012). Maximum organic loading rate for the single-stage wet anaerobic digestion of food waste. *Bioresource technology* 118, s. 210–218.

Ollila, V. (2021). Biojätteen käsittelyn vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt.

Pagans, E., Barrena, R., Font, X. ja Sánchez, A. (2006). Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature. *Chemosphere* 62.9, s. 1534–1542.

Petersson, A. and Wellinger, A. (2009). *Biogas upgrading technologies-developments and innovations, UEA Bioenergy Task 37*. (viitattu: 19.12.2023). URL: https://www.iea-biogas.net/_download/publi-task37/upgrading_rz_low_final.pdf.

Pirkkamaa, J. (2014). Orgaanisen jätteen keräys ja käsittely Suomessa. *Biolaitosyhdistyksen jäsenyritykset kiertotalouden toteuttajina*. URL: https://biokierto.fi/wp-content/uploads/2019/06/Orgaanisen_jatteen_kerays_ja_kasittely_Suomessa.pdf.

– (2021). *HSY:n biomädätepohjaisen lannoitevalmisteen hyödyntäminen maataloudessa*.

RAB (2022). *Agricultural Use of Digestate: Pre-Design and Technical Report*.

Rasi, S., Veijanen, A. ja Rintala, J. (2007). Trace compounds of biogas from different biogas production plants. *Energy* 32.8, s. 1375–1380.

Scaglia, B., Orzi, V., Artola, A., Font, X., Davoli, E., Sanchez, A. ja Adani, F. (2011). Odours and volatile organic compounds emitted from municipal solid waste at different stage of decomposition and relationship with biological stability. *Bioresource technology* 102.7, s. 4638–4645.

Scholwin, F. ja Nelles, M. (2013). 9 - Energy flows in biogas plants: analysis and implications for plant design. Toim. A. Wellinger, J. Murphy ja D. Baxter. The Biogas Handbook. Woodhead Publishing, s. 212–227.

Seadi, T. A., Drosg, B., Fuchs, W., Rutz, D. ja Janssen, R. (2013). 12 - Biogas digestate quality and utilization. Toim. A. Wellinger, J. Murphy ja D. Baxter. The Biogas Handbook. Woodhead Publishing, s. 267–301.

Stentiford, E. ja Bertoli, M. de (2010). *Solid Waste Technology and Management*. English. Toim. T. CHristensen. ID: 624741. Newark: John Wiley Sons, Incorporated. Luku 9 - Biological Treatment, s. 513–682.

Suomen Biokierto ja Biokaasu ry (2021). *Tiedote: Suomessa petrattavaa biojätteiden kierrätyksessä*. (viitattu: 18.12.2023). URL: https://biokierto.fi/suomessa-on-edelleen-petrattavaa-biojatteiden-kierratyksessa/.

Swati, A. ja Hait, S. (2018). Greenhouse Gas Emission During Composting and Vermicomposting of Organic Wastes – A Review. *CLEAN – Soil, Air, Water* 46.6. 07, s. 1700042.

Tampio, E. (2016). *Utilization of Food Waste via Anaerobic Digestion: From Feedstock to Biogas and Fertilizers*. eng. Kemian ja biotekniikan laitos - Department of Chemistry ja Bioengineering.

Tilastokeskus (2016). *Laatuseloste: Kasvihuonekaasut*. (viitattu: 4.2.2024). URL: https://www.stat.fi/til/khki/2015/khki_2015_2016-05-25_laa_001_fi.html.

– (2023). *Tilastokeskuksen maksuttomat tietokannat*. (viitattu: 13.10.2023). URL: https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__jate/statfin_jate_pxt_12cv.px/.

Tsai, C.-J., Chen, M.-L., Ye, A.-D., Chou, M.-S., Shen, S.-H. ja Mao, I. .-. (2008). The relationship of odor concentration and the critical components emitted from food waste composting plants. *Atmospheric Environment* 42.35, s. 8246–8251.

VDI (2011). *VDI 4631: Quality criteria for biogas plants*.

Ventura, J.-R. S., Lee, J. ja Jahng, D. (2014). A comparative study on the alternating mesophilic and thermophilic two-stage anaerobic digestion of food waste. *Journal of Environmental Sciences* 26.6, s. 1274–1283.

Wang, H., Xiao, K., Yang, J., Yu, Z., Yu, W., Xu, Q., Wu, Q., Liang, S., Hu, J., Hou, H. ja Liu, B. (2020). Phosphorus recovery from the liquid phase of anaerobic digestate using biochar derived from ironrich sludge: A potential phosphorus fertilizer. *Water research* 174. ID: 271768, s. 115629.

Wang, X., Lu, X., Li, F. ja Yang, G. (2014). Effects of temperature and carbon-nitrogen (C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: focusing on ammonia inhibition. *PLoS One* 9.5.

Wei, Y., Li, J., Shi, D., Liu, G., Zhao, Y. ja Shimaoka, T. (2017). Environmental challenges impeding the composting of biodegradable municipal solid waste: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling* 122, s. 51–65.

Xia, A. ja Murphy, J. D. (2016). Microalgal Cultivation in Treating Liquid Digestate from Biogas Systems. *Trends in biotechnology* 34.4, s. 264–275.

Yara (2024). *YaraMila Y 1 -lannoite*. (viitattu: 26.3.2024). URL: https://www.yara.fi/lannoitus/lannoitteet/yaramila/yaramila-y-1.

Ympäristöministeriö (2022). *Kierrätyksestä kiertotalouteen - Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2027*. Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto.

Zang, B., Li, S., Michel, F., Li, G., Luo, Y., Zhang, D. ja Li, Y. (2016). Effects of mix ratio, moisture content and aeration rate on sulfur odor emissions during pig manure composting. *Waste Management* 56, s. 498–505.

Zhang, C., Su, H., Baeyens, J. ja Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38, s. 383–392.