

LAPPEENRANNAN–LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Sustainability Science and Solutions
Diplomityö 2020

Milla Lehikoinen

**BIOJÄTTEEN JA PUHDISTAMOLIETTEEN
KOMPOSTOINNIN JA MÄDÄTYKSEN
YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN VERTAILU**

Työn tarkastajat:

Professori, TkT Mika Horttanainen

Tutkijaopettaja, TkT Jouni Havukainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Sustainability Science and Solutions

Milla Lehikoinen

Biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnin ja mädätyksen ympäristövaikutusten vertailu

Diplomityö

98 sivua, 12 taulukkoa, 9 kuvaa, 4 liitettä

Tarkastajat: Professori, TkT Mika Horttanainen
Tutkijaopettaja, TkT Jouni Havukainen

Hakusanat: elinkaariarviointi, ilmaston lämpenemispotentiaali, kasvihuonekaasupäästö, päästövähennys, biokaasulaitos, mädätys, kompostointi, biojäte, puhdistamoliete

Diplomityö toteutettiin Etelä-Karjalan Jätehuollon toimeksiantona ja tässä tutkittiin Kukkurinmäen uuden biokaasulaitoksen vaikutusta Etelä-Karjalan maakunnan kasvihuonekaasupäästöihin. Biokaasulaitos käyttää raaka-aineinaan biojätettä ja puhdistamolietettä, joita on aiemmin käsitelty kompostoimalla. Näiden raaka-aineiden mädätyksen lopputuotteena saadaan biokaasua, joka hyödynnetään jalostuksen jälkeen kokonaisuudessaan liikennepolttoaineena. Tämä tutkimus tehtiin elinkaariarviointia hyödyntäen vertailemalla biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnin ja mädätyksen kasvihuonekaasupäästöjä. Elinkaariarviointi toteutettiin GaBi-elinkaarimallinnusohjelman avulla.

Tutkimuksen perusteella biokaasulaitoksella olisi potentiaalia vähentää Etelä-Karjalan maakunnan kokonaispäästöjä 3 210 t CO₂-ekv/a, joka vastaa 310 suomalaisen vuosittaista hiilijalanjälkeä. Liikennesektorille päästövähennyspotentiaalia kohdistuisi 2 360 t CO₂-ekv/a, joka vastaa 230 suomalaisen vuosittaista hiilijalanjälkeä. Karkeasti uuden biokaasulaitoksen arvioitiin vähentävän Etelä-Karjalan maakunnan kokonaispäästöjä 0,6 % ja Etelä-Karjalan liikenteen päästöjä 1 % vuoden 2017 arvioituihin päästöihin verrattuna. Biokaasulaitoksen toiminnalla saavutettu päästövähennys on käytännössä seurausta biometaanin tuotannosta ja sen hyödyntämisestä liikennepolttoaineena. Biometaanin tuotannon myötä kaasun jakelupisteitä saadaan lisättyä, joka mahdollistaa kaasuautokannan kasvamisen ja näin ollen vähentäisi fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Lasketut tulokset ovat suuntaa antavia arvioita päästövähennyksistä, joista voidaan kuitenkin selkeästi huomata biokaasulaitoksen positiiviset ympäristövaikutukset.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
LUT School of Energy Systems
Degree Programme in Environmental Technology
Sustainability Science and Solutions

Milla Lehtikoinen

Comparing the environmental impacts of composting and digestion biowaste and wastewater treatment sludge

Master's thesis

2020

98 pages, 12 figures, 9 tables, 4 appendices

Examiners: Professor, D. Sc. (Tech) Mika Horttanainen
D. Sc (Tech) Jouni Havukainen

Keywords: life cycle assessment, global warming potential, greenhouse gas emissions, emission reduction, biogas plant, digestion, composting, biowaste, wastewater treatment plant sludge

This master's thesis was assigned by the Etelä-Karjalan Jätehuolto and it was conducted to study how Kukkuroinmäki new biogas plant effects to the greenhouse gas emissions of Etelä-Karjala. Biogas plant utilizes biowaste and wastewater treatment plant sludge as its raw material. Those raw materials are earlier treated by composting. From those raw materials, biogas is produced at biogas plant and the gas is intended to be utilized as fuel of transportation. Research method of this study was life cycle assessment, which was used by comparing greenhouse gas emissions of biowaste's and wastewater treatment plant sludge's composting and digestion. Life cycle assessment was executed with GaBi life cycle modelling tool.

According to study, Etelä-Karjala's region total greenhouse gas emissions could be decreased by 3 210 t CO₂-eq/a with new biogas plant, which corresponds to 310 Finn's annual greenhouse gas emissions. In traffic sector greenhouse gas emissions could be decreased by 2 360 t CO₂-eq/a, which corresponds to 230 Finn's annual greenhouse gas emissions. It could be assumed that new biogas plant could decrease Etelä-Karjala's region total greenhouse gas emission by 0,6 % and traffic sector's greenhouse gas emissions by 1 % compared estimated emission levels of year 2017. Emission reduction is achieved in practice by biomethane production and its utilization as a fuel of transport vehicles. As a result of biomethane production, amount of gas distribution points increases, which enables the growth of number of gas cars, from which follows the reduction in use of fossil fuels. Calculated results are directional estimations for emission reduction, but from those could be clearly noticed positive environmental impacts of new biogas plant.

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	3
1 JOHDANTO	5
1.1 Työn tausta	6
1.2 Työn tavoitteet ja toteuttaminen.....	7
2 BIOMETAANIN TUOTANTO	8
2.1 Raaka-aineet	8
2.2 Biokaasun tuotanto.....	11
2.2.1 Prosessityypit	11
2.2.2 Anaerobinen hajoaminen	12
2.2.3 Biokaasun käsittely	14
2.2.4 Mädätysjäännöksen käsittely ja hyödyntäminen	15
2.3 Biokaasun jalostus.....	16
3 BIOMETAANIN TUOTANNON YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET	18
3.1 Elinkaariarviointi.....	18
3.2 Biometaanin tuotannosta tehdyt elinkaariarvioinnit	19
4 TARKASTELTAVAN JÄRJESTELMÄN KUVAUS	26
4.1 Etelä-Karjalan Jätehuolto	26
4.2 Tutkimusmenetelmät.....	28
4.3 Tarkasteltavat käsittelymenetelmät.....	28
4.3.1 Kompostointiprosessi.....	29
4.3.2 Mädätysprosessi.....	31
4.4 Inventaarioanalyysi	35
4.4.1 Kompostointiprosessi.....	35
4.4.2 Mädätysprosessi.....	47
5 TULOKSET	66
5.1 Kompostointiprosessi	66
5.2 Mädätysprosessi	68
5.3 Tulosten analysointi	71
5.4 Herkkyystarkastelu.....	74
5.4.1 Kompostointiprosessi.....	74
5.4.2 Mädätysprosessi.....	76
5.5 Tulosten vertailu.....	78

6	JOHTOPÄÄTÖKSET	82
7	YHTEENVETO.....	85
	LÄHTEET	88

LIITTEET

Liite I: Kompostointiprosessin laskentatiedot

Liite II: Mädätysprosessin laskentatiedot

Liite III: Kompostointiprosessin tulokset

Liite IV: Mädätysprosessin tulokset

SYMBOLI- JA LYHENNELUETELO

Lyhenteet

EKJH	Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy
EU	Euroopan unioni
GWP	Global Warming Potential; ilmaston lämpenemispotentiaali
ISO	International Organization for Standardization; kansainvälinen standardisoimisjärjestö
LCA	Life Cycle Assessment; elinkaariarviointi
PSA	Pressure Swing Adsorption
TS	Total Solids
VS	Volatile Solids
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

Symbolit

C_2H_4 -ekv	eteeni ekvivalentti
CH_4	metaani
CO_2	hiilidioksidi
CO_2 -ekv	hiilidioksidiekvivalentti
H_2SO_4	rikkihappo
N_2O	typpioksiduuli
$NaOH$	natriumhydroksidi
$(NH_4)_2SO_4$	ammoniumsulfaatti
PO_4^- -ekv	fosfaatti ekvivalentti
SO_2 -ekv	rikkidioksidi ekvivalentti

Yksiköt

Energia [MJ], [MWh]

Massa [g], [kg], [t]

Matka [km]

Tilavuus [l], [m³]

Vuosi [a]

1 JOHDANTO

Suomen pitkän aikavälin tavoitteena on hiilineutraali yhteiskunta, johon pyritään Euroopan unionin ilmasto- ja energiapolitiikan avulla. EU on asettanut seuraavan ilmasto- ja energia-tavoitteen kaudelle 2021–2030, jonka pyrkimyksenä on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 40 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Päästökaupan piiriin kuuluvien sektoreiden on vähennettävä päästöjä 43 prosentilla vuoden 2005 päästötasosta ja päästökaupan piiriin kuulumattomien sektoreiden on vähennettävä päästöjä 30 prosentilla. Lisäksi tavoitteena on kasvattaa uusiutuvan energian osuus 32 prosenttiin sekä nostaa energiatehokkuutta 32,5 % verrattuna vuonna 2007 arvioituun kehityspolkuun. (European Commission.)

Valtioneuvosto on linjannut kansallisessa energia- ja ilmastostrategiassaan toimia, joilla Suomi saavuttaa EU:n asettamat tavoitteet vuoteen 2030 mennessä ja etenee kohti tavoitetta vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 80–95 prosentilla vuoteen 2050 mennessä. Yhtenä tavoitteena on saada muutosta liikennesektorin päästöihin, sillä liikenteen päästöt muodostavat päästökaupan piiriin kuulumattomien sektoreiden päästöistä jopa noin 40 prosenttia. Tavoitteena on vähentää liikenteen päästöjä 50 % vuoden 2005 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Nopein keino liikenteen päästöjen vähentämiseksi on fossiilisten polttoaineiden korvaaminen biopolttoaineilla: tavoitteena on nostaa liikenteen biopolttoaineiden osuutta 30 prosenttiin. Vuonna 2030 Suomessa tavoitellaan olevan yhteensä vähintään 250 000 sähkökäyttöistä autoa ja vähintään 50 000 kaasukäyttöistä autoa. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017.) Liikenne- ja viestintävirasto Traficom tilaston mukaan vuoden 2020 alussa Suomessa oli liikennekäytössä 5 037 täyssähköautoa ja 24 745 ladattavaa hybridiautoa (Traficom 2020). Kaasuautoja oli vuoden 2020 alussa rekisteröity liikennekäyttöön 11 515 kappaletta (Kaasuautoilijat ry 2020 alkuperäinen lähde: Traficom).

Vuoden 2018 kasvihuonekaasupäästöt olivat Suomessa 56,5 miljoonaa tonnia hiilidioksidiekvivalenttia (Mt CO₂-ekv). Kotimaan liikenteestä aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt olivat 11,7 Mt CO₂-ekv eli 21 % kaikista vuonna 2018 Suomessa aiheutuneista kasvihuonekaasupäästöistä. Kotimaan liikennepäästöistä 94 % aiheutuu tieliikenteestä. (Tilastokeskus 2019, 8, 20.) Suomessa tieliikennepolttoaineena käytetään eniten bensiiniä sekä dieseliä, muiden polttoaineiden käyttö on vielä varsin vähäistä (Traficom 2020). Uusiutuvalla

energialla tuotettu vety on sähkön ohella ainoa vaihtoehto, joka mahdollistaa täysin hiilivapaan liikkumisen. Biometaanin käytöllä saavutetaan päästövähennyksiä verrattuna bensiinin ja dieselin käyttöön, mutta sen tuotannolla saavutetaan myös muita etuja. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017, 60.)

Biometaania tuotetaan biokaasulaitoksessa, jossa orgaaninen aines hajoaa anaerobisesti (Uusitalo et al. 2013, 132). Orgaanista jätettä muodostuu yhdyskunnassamme väistämättä ja se on käsiteltävä, ettei se pääse hapettomissa oloissa mätänemään ja muodostamaan hallitsemattomasti ilmakehään vapautuvaa metaania. Metaani on 28 kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi ja edistää näin ollen voimakkaasti ilmastonmuutosta. (Myhre et al. 2013, 731). Biometaanilla saavutetaan liikenteen biopolttoaineista suurin päästövähennys, mutta sillä saavutetaan myös muita ympäristöhyötyjä. Kun biometaani tuotetaan esimerkiksi biojätteestä tai puhdistamolietteestä, ei polttoaineen raaka-aineiden tuotanto kuluta resursseja tai aiheuta haitallisia muutoksia maankäyttöön (Uusitalo et al. 2013, 132). Biokaasun tuotannossa syntyy kaasun lisäksi myös ravinteikasta mädätysjäännöstä, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi lannoitteena (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 94).

1.1 Työn tausta

Lappeenrannan kaupungin tavoitteena on vähentää alueensa hiilidioksidipäästöjä 80 % vuoteen 2030 mennessä vuoden 2007 tasosta, mutta pitkän aikavälin tavoitteena on olla kokonaan hiilineutraali kaupunki vuoteen 2050 mennessä. Liikenteen päästöt edustavat noin 40 % päästökaupan piirin ulkopuolisista CO₂-päästöistä, joten liikennesektorin päästöjen pienentäminen on edellytys asetettujen tavoitteiden saavuttamiselle. (Jarva, 2, 9.) Lappeenrannassa toimiva jätehuolto-yhtiö Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy (EKJH) on omalla toiminnallaan osallistunut Lappeenrannan kaupungin sekä muiden omistajakuntiensa ympäristötavoitteiden toteuttamiseen. Etelä-Karjalan Jätehuolto on investoinut vuonna 2020 käyttöön otettavaan biokaasulaitokseen, jossa tuotetaan biokaasua omistajakunnilta kerätyistä biojätteistä sekä puhdistamolietteistä. Biokaasu jalostetaan liikennekäyttöön sopivaksi biometaaniksi, jolloin tarkoituksena olisi vähentää liikenteestä aiheutuvia CO₂-päästöjä. Etelä-Karjalan Jätehuolto on kiinnostunut tietämään heidän investointinsa vaikutuksen liikenteen kasvihuonekaasupäästöihin. (Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy 2019b.)

1.2 Työn tavoitteet ja toteuttaminen

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää Etelä-Karjalan alueelta kerätyn biojätteen ja puhdistamolietteen käsittelymenetelmän muutoksesta aiheutuvat ympäristövaikutukset. Tässä työssä vastataan siihen, kuinka paljon Etelä-Karjalan maakunnan kokonaispäästöt sekä liikenteen päästöt muuttuvat, kun Etelä-Karjalan asukkailta kerättyä biojätettä ja puhdistamolietettä käsitellään kompostointilaitoksen sijasta biokaasulaitoksessa. Käsittelymenetelmän muutoksen vaikutusta Etelä-Karjalan maakunnan kokonaispäästöihin tutkitaan tekemällä elinkaaritarkastelut kompostointiprosessille ja mädätysprosessille ja vertailemalla niiden nettopäästöjen erotusta. Käsittelymenetelmän muutoksen vaikutusta Etelä-Karjalan liikenteen päästöihin selvitetään tutkimalla mädätysprosessin biometaanin tuotannolle kohdistuvia päästöjä sekä päästöhyvityksiä.

2 BIOMETAANIN TUOTANTO

Biometaanin tuotannon elinkaari koostuu raaka-aineiden hankinnasta, biokaasun tuotannosta sekä biokaasun jalostuksesta (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 125). Biokaasua tuotetaan biokaasureaktorissa hajottamalla orgaanista ainesta anaerobisesti erilaisten mikro-organismien toimesta. Biokaasusta tyypillisesti noin 50–70 % on metaania ja 30–50 % on hiilidioksidia, tämä suhde riippuu pääasiassa tuotantoon käytetystä raaka-aineesta. Näiden lisäksi biokaasu sisältää vesihöyryä sekä pieniä määriä muita kaasuja, kuten typpeä, happea, rikkivetyä ja ammoniakkaa. (Angelidaki et al. 2018, 452.) Biokaasun tuotannon tuloksena jäljelle jää mädätysjäännös, joka koostuu prosessissa hajoamattomasta aineksesta. Mädätysjäännös sisältää raaka-aineiden ravinteita, joten sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi lannoitteena tai maanparannusaineena. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 18.)

Biokaasu ei käsittelemättömänä kelpaa hyödynnettäväksi, mutta puhdistuksen jälkeen sitä voidaan hyödyntää lämmön- ja sähköntuotannossa. Jotta biokaasua voidaan hyödyntää liikennepolttoaineena, se vaatii yleensä biokaasun jalostamisen biometaaniksi. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 126.) Jalostuksessa biokaasusta poistetaan hiilidioksidia, jolloin kaasun metaanipitoisuus kasvaa ja se muistuttaa ominaisuuksiltaan maakaasua. Biometaniksi kutsutaan yleisesti sellaista jalostettua biokaasua, jonka metaanipitoisuus on yli 95 %. (Angelidaki et al. 2018, 452.) Suomessa vuonna 2017 tuotetusta biokaasusta 520 GWh hyödynnettiin lämpönä, 178 GWh sähköinä ja 30 GWh liikennepolttoaineena (Huttunen et al. 2018, 6, 27).

2.1 Raaka-aineet

Biokaasua voidaan tuottaa laajasti erilaisista orgaanisista aineista, kuten eläinten lannasta, kasvibiomassasta, yhdyskuntabiojätteestä, puhdistamolietteestä sekä teollisuuden sivutuotteista ja jätteistä. Näistä kaikista aineista ei kuitenkaan saada tuotettua yhtä paljon biokaasua. Biokaasutuotto ja biokaasun metaanipitoisuus riippuvat raaka-aineen koostumuksesta, kuten kuiva-ainepitoisuudesta (TS, total solids) sekä orgaanisen aineksen määrästä (VS, volatile solids). Parhaiten biokaasuntuotantoon soveltuvat aineet, jotka sisältävät mahdollisimman paljon helposti hajoavaa ainesta, kuten hiilihydraatteja, proteiineja ja rasvoja. Tämän takia puu ei sovellu biokaasun raaka-aineeksi, sillä se sisältää vaikeasti hajoavia orgaanisia

aineksia. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 21–22.) Seuraavaan taulukkoon 1 on koottuna biokaasuntuotannossa yleisimmin käytettyjen raaka-aineiden ominaisuuksia sekä biokaasu- ja metaanisaantoja.

Taulukko 1. Eri biomassatyyppien ominaisuuksia, biokaasuntuotantosaantoja, metaanipitoisuuksia sekä metaanisaantoja.

Biomassan tyyppi	TS %	VS %/TS	Biokaasu m ³ /t _{VS}	Metaani- pitoisuus	Saanto m ³ _{CH₄} /t _{VS}	Lähde
Säilörehu	26	86	660	55 %	363	Kahiluoto et al. 2011 Motiva Oy 2013
Olki	85	91	375	55 %	206	Kahiluoto et al. 2011 Motiva Oy 2013
Nestemäinen nautakarjan lanta	6	80	375	60 %	225	Kahiluoto et al. 2011 Motiva Oy 2013
Nestemäinen sian lanta	5	78	482	65 %	313	Kahiluoto et al. 2011 Motiva Oy 2013
Kiinteä nautakarjan lanta	19	74	300	60 %	180	Kahiluoto et al. 2011 Motiva Oy 2013
Kiinteä sian lanta	24	80	360	65 %	234	Kahiluoto et al. 2011 Motiva Oy 2013
Kiinteä siipikarjan lanta	38	77	450	55 %	248	Kahiluoto et al. 2011 Työtehoseura ry 2019
Teurastamojäte	30	80	950	70 %	665	Kahiluoto et al. 2011 Motiva Oy 2013
Biojäte	32	75	500	65 %	325	Kahiluoto et al. 2011 Motiva Oy 2013
Jätevesiliete	12	69	450	60 %	270	Kahiluoto et al. 2011 Zeeman et al. 2003

Biomassatyyppien biokaasu- ja metaanisaanto vaihtelee todellisuudessa laajalla vaihteluvälillä, joten taulukon 1 arvot ovat esitetyiltä vaihteluväliltä arvioituja keskiarvoja. Biomassatyyppille esitetyt saannot vaihtelivat myös jonkin verran eri lähteiden välillä. Taulukosta 1 voidaan huomata eri biomassoista saatavan metaanisaannon vaihtelevan laajasti välillä 180–665 m³_{CH₄}/t_{VS}. Yleisesti ottaen voidaan todeta lannan metaanintuottopotentialin olevan keskimäärin heikompi kuin säilörehun, biojätteen sekä jätevesilietteen vastaavat.

Teurastamojätteen metaanintuottopotentiaali on omaa luokkaansa, ollen noin kaksinkertainen muiden biomassatyyppien metaanisaantoon verrattuna.

Vuonna 2017 Suomessa oli 64 biokaasulaitosta, josta maatilalaitoksia oli noin kolmasosa. Maatilalaitosten biokaasun tuotantokapasiteetti oli kuitenkin vain noin 3 % kaikkien laitosten tuotantokapasiteetista, mikä kertoo maatilalaitosten pienemmästä koosta verrattuna keskimääräiseen laitokokoon sekä maatalouden raaka-ainelähteiden heikommasta biokaasuntuotantopotentiaalista verrattuna biojätteisiin sekä jätevesilietteisiin. Biokaasuntuotantopotentiaalin on arvioitu olevan 10 200 GWh, mutta siitä saadaan hyödynnettyä vain noin 7 %. Suurin käyttämätön biokaasuntuotantopotentiaali löytyy maatalouden orgaanisista jätteistä ja sivutuotteista. Käyttämättömästä biokaasupotentiaalista 72 % voitaisiin tuottaa nurmella sekä oljella, 14 % lannalla, 6 % metsäteollisuuden lietteillä, 3 % elintarviketeollisuuden sivuvirroilla, 3 % biojätteellä ja 2 % yhdyskuntajätevesilietteellä. (Winqvist et al. 2018, 6, 8–10.)

Yleensä raaka-aineet esikäsitellään ennen niiden syöttämistä biokaasureaktoriin, mutta esikäsitteilytarpeen suuruus riippuu raaka-aineesta. Esikäsitteilyllä pyritään tehostamaan kaasuntuotantoa sekä ehkäisemään laitteiden kulumista ja tukkeutumista. Maatalouden lantoja ja kasvibiomassoja ei juurikaan tarvitse käsitellä ennen biokaasuprosessia, jossain tapauksissa silppuaminen on kuitenkin perusteltua. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 48.) Biojäte vaatii maatalouden jätteitä kattavamman esikäsitteilyn, sillä se sisältää erilaisia biokaasuprosessiin kelpaamattomia jätejakeita, kuten muoviva, lasia tai metallia. Biojätteiden esikäsitteilyssä pyritään poistamaan nämä epäpuhtaudet mahdollisimman tehokkaasti. Ensin biojäte murskataan, jonka jälkeen murskatusta jätteestä poistetaan metallit sekä kevyemmät rejektit kuten muovit. Jos biokaasulaitos on kuivatyypinen, on biojäte valmis syötettäväksi reaktoriin edellä mainitun käsittelyn jälkeen. Jos biokaasulaitos on märkätyypinen, täytyy biojäte vielä liettää pumpattavaksi. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 51–52.) Puhdistamolietteet eivät sisällä murskausta vaativia isoja kappaleita tai juurikaan epäpuhtauksia, joten lietteet eivät vaadi huomattavaa esikäsitteilyä. Suurin puhdistamolietteiden epäpuhtaus on hiekka, joka erotetaan syötteestä liettämisen jälkeen. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 53–54.)

2.2 Biokaasun tuotanto

Biokaasua voidaan tuottaa erityyppisissä laitoksissa ja erityyppisissä prosesseissa, tuotannon pääperiaatteena toimii kuitenkin aina anaerobinen hajoaminen. Anaerobisen hajoamisen lopputuotteena saadaan biokaasua sekä mädätysjäännöstä, joita voidaan hyödyntää eri prosesseissa. Tuotetun biokaasun ja mädätysjäännöksen koostumus riippuu käytetystä raaka-aineesta.

2.2.1 Prosessityypit

Biokaasuntuotannon peruseriaate on aina sama, mutta se voidaan toteuttaa erilaisilla prosesseilla. Biokaasulaitokset jaotellaan yleensä prosessin kuiva-ainepitoisuuden mukaan märkä- ja kuivaprosessiin. Nämä prosessit voidaan jaotella vielä reaktorin mukaan jatkuvaa ja panostoimisiin prosesseihin. Märkäprosessit ovat yleensä aina jatkuvatoimisia, mutta kuivaprosessit voivat olla sekä jatkuva- että panostoimisia. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 83.)

Märkäprosessi eroaa kuivaprosessista lähinnä syötteen kuiva-ainepitoisuudessa. Märkäprosessissa syöteseoksen kuiva-ainepitoisuus on enintään 15 % kun taas kuivaprosessissa syöteseoksen kuiva-ainepitoisuus on yleensä noin 20–40 %. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 82.) Kuivamädätysprosessin etuina on vähäisempi vedenkulutus, alhaisempi lietemädätteen tuotanto, mädätysjäännöksen suhteellisesti suurempi ravinnepitoisuus, parempi kuljettehokkuus ja paremmin hyödynnettävissä oleva mädätysjäännös. Kuivamädätysprosessissa on myös pienempi reaktoritilavuus syötettyä tuorettonnia kohden. Kuivamädätyksen haittoina on kuitenkin pitkä reaktioaika, alhaisempi biokaasun saanto sekä suuremmat hajukaasupitoisuudet. (Zhou et al. 2019, 1.) Kuivamädätysprosessin tekninen hallinta on haastavampaa ja vaadittavat prosessiolosuhteet on vaikeampi varmistaa ja ylläpitää (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 83).

Jatkuvatoimisella prosessilla saavutetaan tasainen biokaasuntuotanto, sillä raaka-aineen syöttö ja poisto on nimensä mukaisesti jatkuvaa. Jatkuvatoimisessa märkäprosessissa reaktori on pystyyn asennettu sylinteri. Koska syötettävä raaka-aine on märempää, liete voidaan

siirtää reaktoriin pumppaamalla. Raaka-aineen viipymä reaktorissa riippuu syöttömateriaalin hajoamisnopeudesta, mutta se on raaka-aineesta riippuen noin 20–30 vuorokautta. Tasainen hajoaminen varmistetaan sekoituksella. Märkäprosessin mädätysjäännös on lietemäinen, joka voidaan hyödyntää sellaisenaan tai erotella hyödynnettäviksi neste- ja kuivajakeiksi. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 83–85.)

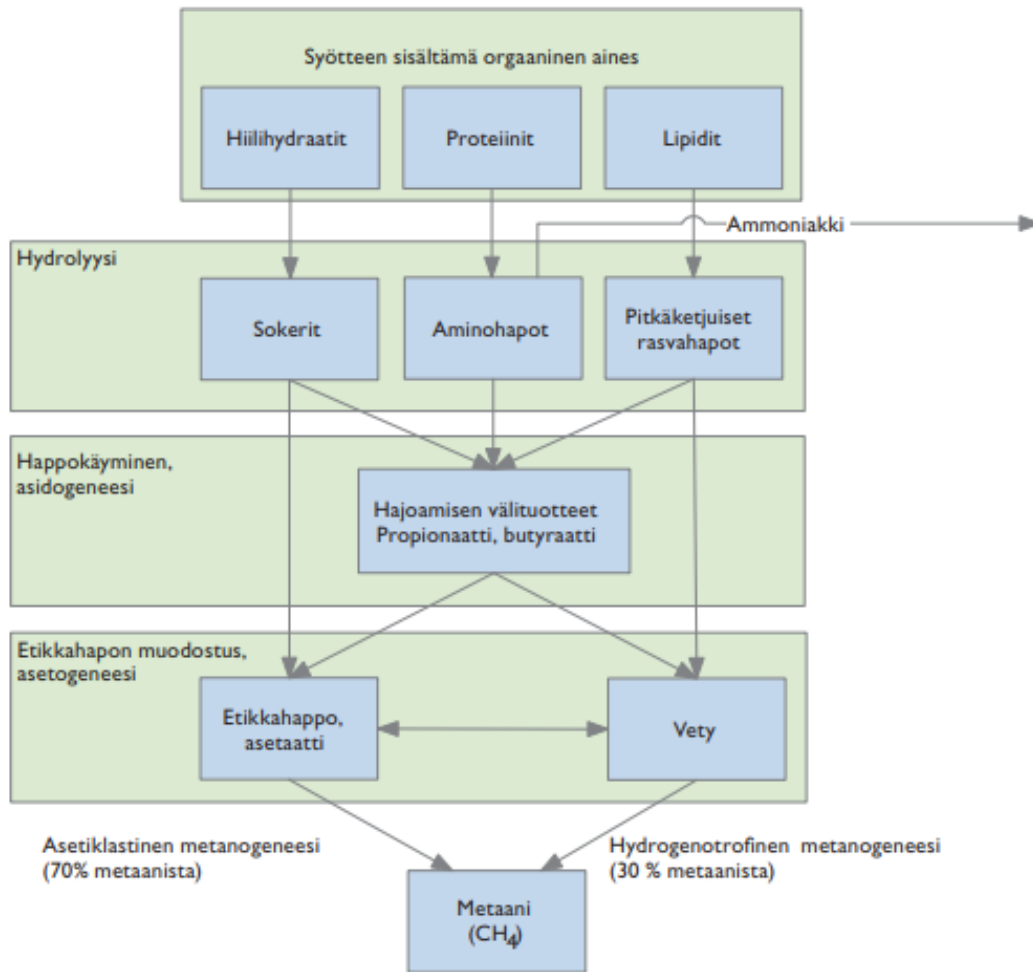
Jatkuvatoimisessa kuivaprosessissa reaktori on vaakatasoon asennettu sylinteri, jossa syötettä siirretään eteenpäin esimerkiksi ruuvilla. Tämä varmistaa myös syötteen hyvän sekoittumisen. Osa mädätysjäännöksestä tai rejektivedestä kierrätetään prosessissa tuoreeseen syöttömateriaaliin, jolloin kierrätetään mikrobeja ja säädetään kuiva-ainepitoisuutta. Jatkuvatoimista kuivaprosessia käytetään yleensä yhdyskuntien biojätteiden käsittelyssä. Tässä prosessissa syntynyt mädätysjäännös pitää lähes poikkeuksessa käsitellä jotenkin: vaihtoehtoja ovat erottaminen hyödynnettäviksi neste- ja kuivajakeiksi tai jälkikompostointi. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 86.)

Panostoimisessa prosessissa raaka-aineet syötetään moduuliin, joka täytetään ja tyhjenetään kokonaan kerralla, jolloin biokaasuntuotanto ei ole tasaista. Kuten jatkuvatoimisessa kuivaprosessissa, myös panostoimisessa kuivaprosessissa osa mädätysjäännöksestä tai rejektivedestä kierrätetään prosessissa tuoreeseen syöttömateriaaliin. Panostoimisen prosessin toimintaolosuhteita ja hajoamisprosessia on vaikeampi hallita, jolloin raaka-aine ei välttämättä hajoa niin hyvin kuin jatkuvatoimisessa prosessissa. Tällöin mädätysjäännös on epätasalaatuista ja heikosti hajonnutta, jolloin se täytyy vielä käsitellä. Aumakompostointi on suositeltu käsittelytapa, mutta siinä hukataan mädätysjäännöksen tyypeä ja aiheutetaan ammoniakkipäästöjä. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 87.)

2.2.2 Anaerobinen hajoaminen

Esikäsittelyn jälkeen raaka-aineet syötetään biokaasureaktoriin anaerobiseen mädätykseen, jossa tuotetaan biokaasua sekä mädätysjäännöstä. Mädätys koostuu neljästä vaiheesta: hydrolyysistä, asidogenezistä, asetogenezistä sekä metanogenezistä. Hydrolyysivaiheessa hydrolyyttiset entsyymit hajottavat orgaanisen aineksen sisältämän hiilihydraatit, proteiinit ja lipidit sokereiksi, aminohapoiksi ja pitkäketjuisiksi rasvahapoiksi. Hydrolyysivaiheen

tuotteet hajoavat asidogeneesissä rasvahapoiksi, jonka jälkeen niistä muodostuu asetogeneesissä asetaattia, vetyä ja hiilidioksidia. Anaerobisen hajoamisen viimeisessä vaiheessa metanogeneesissä tuotetaan metaania ja hiilidioksidia edellisen vaiheen tuotteista. (Nagarajan et al. 2019, 2–3.) Seuraavassa kuvassa 1 on esitetty anaerobisen hajoamisen päävaiheet.



Kuva 1. Anaerobisen hajoamisen päävaiheet (Latvala 2009, 30).

Anaerobinen hajoaminen tapahtuu tasapainoisesti, kun toimintaolosuhteet ovat oikeat. Biokaasun tuotantoprosessin kannalta keskeisimpiä tekijöitä ovat hapettomuus, sopiva lämpötila ja pH. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 63.)

Biokaasun tuotanto voi tapahtua kahdella eri lämpötila-alueella: 35–37 °C lämpötilassa tapahtuvaa käsittelyä kutsutaan mesofiiliseksi prosessiksi, kun taas noin 50–55 °C

lämpötilassa tapahtuvaa käsittelyä kutsutaan termofiiliseksi prosessiksi. Mesofiilinen prosessi ei ole niin herkkä toimintaolosuhteiden vaihtelulle kuin termofiilinen prosessi, lisäksi sillä on alhaisempi energiankulutus. Termofiilisellä prosessilla saavutetaan kuitenkin hygieenisempi mädäte sekä lyhyempi reaktioaika. Suomessa biokaasun tuotanto tapahtuu yleisemmin mesofiilisellä lämpötila-alueella. (Latvala 2009, 34.)

Toinen keskeinen tekijä biokaasuntuotannossa on pH. Mädätysprosessiin osallistuu esilaisia mikro-organismeja, jotka toimivat optimaalisimmin erilaisilla pH alueilla. Prosessin hydrolyysi vaiheessa työskentelevät mikrobit toimivat parhaiten happamissa olosuhteissa, kun pH on noin 4,5–6,5. Asetogeneesi ja metanogeneesi vaiheisiin osallistuvat bakteerit taas toimivat optimaalisimmin neutraaleissa olosuhteissa, jolloin pH on noin 7. Normaalisti biokaasureaktorin pH on 7–8 ja se pyritään pitämään mahdollisimman vakiona, jolloin kaikkien haamovaiheiden mikrobit toimivat. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 65.)

2.2.3 Biokaasun käsittely

Kuten aiemmin todettiin, biokaasu koostuu pääasiassa metaanista sekä hiilidioksidista, mutta se sisältää myös vesihöyryä sekä muita kaasuja. Biokaasun komponenteista metaani ja vety voidaan hyödyntää energiana, mutta hiilidioksidi ja typpikaasu ovat energiaa sisältämättömiä inerttejä kaasuja. Muut biokaasun komponentit ovat epäpuhtauksia, jotka pitää aina poistaa laitteistovaurioiden ja päästöjen ehkäisemiseksi. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 127.)

Biokaasureaktorista vapautuva biokaasu täytyy aina puhdistaa ainakin vesihöyrystä sekä rikkivedystä, sillä ne muodostavat yhdessä rikkihappoa ja näin ollen aiheuttavat laitteistossa syöpymistä. Jos biokaasussa on suuria määriä halogenoituja hiilivetyjä, ammoniakkia, siloksaaneja tai hiukkasia, täytyy myös ne puhdistaa. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 131.) Biokaasun puhdistamiseen on olemassa useita erilaisia tekniikoita, joiden soveltuvuus riippuu biokaasun laadusta ja koostumuksesta. Vesihöyryä voidaan poistaa fysikaalisesti jäähdytyksellä ja kemiallisesti esimerkiksi silikageeliadsorptiolla tai glykoli absorptiolla. Rikkivetyä voidaan poistaa biokaasusta esimerkiksi lisäämällä biokaasureaktoriin ilmaa tai

rautayhdisteitä. Kemiallinen absorptio, aktiivihiili adsorptio sekä biologisten suodattimien käyttö ovat myös rikkivetyjen poistoon käytettyjä menetelmiä. (Ryckeboosch et al. 2011, 1634–1636.)

2.2.4 Mädätysjäännöksen käsittely ja hyödyntäminen

Biokaasuprosessissa syntyy biokaasun lisäksi aina myös mädätysjäännöstä, joka on biokaasureaktorissa reagoimatonta ainesta. Pääasiassa mädätysjäännös koostuu vedestä, epäorgaanisesta aineksesta sekä hajoamattomasta orgaanisesta aineksesta ja sitä muodostuu karkeasti yhtä paljon kuin biokaasureaktoriin on syötetty raaka-ainetta. Raaka-aine ei siis biokaasureaktorissa katoa mihinkään, joten se täytyy loppusijoittaa jonnekin, jolloin myös mädätysjäännöksen käsittely on tärkeä osa biokaasun tuotantoa. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 94.)

Biokaasureaktorissa raaka-aineen ravinteita ei juuri katoa minnekään, joten raaka-aineiden sisältämät ravinteet siirtyvät mädätysjäännökseen. Raaka-aineet sisältävät tärkeitä ravinteita, jotka muokkautuvat mädätyksen aikana kasveille helpommin hyödynnettävään muotoon. Mädätysjäännöstä olisi siten kannattava hyödyntää lannoitteena tai maanparannusaineena. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 95.)

Mädätysjäännöstä voidaan hyödyntää sellaisenaan lannoituskäytössä, mutta sen käsittely voi olla tarpeen. Käsittelytarve sekä käsittelytekniikka riippuvat lopputuotteen käyttötarkoituksesta sekä lainsäädännöistä. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 99.) Yleisimpiä mädätysjäännöksen käsittelymenetelmiä on separointi sekä kompostointi. Separointi tarkoittaa mädätysjäännöksen jakamista nestejakeeseen ja kuivajakeeseen. (Tampio et al. 2016, 22.) Separointi voidaan tehdä ominaispainoeroihin, partikkelikokoon tai termisiin ominaisuuksiin perustuen. Tehokkain separointimenetelmä on linko, jossa mädätysjäännöstä pyöritetään rumussa kovalla nopeudella, jolloin raskaammat partikkelit ajautuvat ulkoreunalle. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 99.) Eroteltu nestejake voidaan hyödyntää sellaisenaan lannoitteena, mutta yleensä sitä edelleen jatko käsitellään, jotta sen kokonaisuus saadaan pienennettyä ja näin alennettua kuljetustarvetta (Tampio et al. 2016, 22). Yleinen nestejakeen jatkokäsittelymenetelmä on ammoniakkistriippaus, jossa nesteestä erotetaan ammoniakkia perustuen

niiden erilaisiin haihtuvuuksiin (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 99–104). Mädätysjäännöksestä eroteltu kuivajae voidaan hyödyntää sellaisenaan peltolannoitteena, mutta jos sitä halutaan hyödyntää viherrakentamisessa tai multana, se täytyy vielä jälkistabiloida aumassa. Jos halutaan oikein hygieenistä maanparannuskompostia, voidaan kuivajae vielä kompostoida. Tällöin siihen on lisättävä esimerkiksi puuperäistä tukiainetta, jolla varmistetaan ilman riittävä pääsy massaan. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 99–110.)

2.3 Biokaasun jalostus

Puhdistettua biokaasua voidaan hyödyntää lämmön- ja sähköntuotannossa, mutta liikennekäyttöä varten puhdistettu biokaasu yleensä myös jalostetaan. Jalostuksen tarkoituksena on parantaa biokaasun lämpöarvoa poistamalla siitä energiaa sisältämättömiä inerttejä kaasuja, pääasiassa hiilidioksidia mutta joskus myös typpikaasua. Jalostuksella biokaasun metaanipitoisuus pyritään saamaan mahdollisimman korkeaksi, mielellään yli 95 prosenttiin. Jalostuksen myötä biokaasun ominaisuudet saadaan vastaamaan maakaasun ominaisuuksia, jolloin jalostettu biometaani voidaan syöttää maakaasuverkkoon. (Angelidaki et al. 2018, 452–453.)

Jalostustekniikoista on erilaisia, joista osa vähentää myös biokaasun epäpuhtauksia, mutta se ei ole jalostuksen päätarkoitus. Kun jalostustekniikkaa valitaan, täytyy tietää puhdistetun biokaasun koostumus sekä halutun biometaanin koostumus. Yleisesti käytettyjä jalostusmenetelmiä ovat fysikaalinen absorptio, kemikaalinen absorptio, fysikaalinen adsorptio, kryojalostus sekä kalvojalostus (Sun et al. 2015, 524).

Fysikaalisessa absorptiossa kaasu sitoutuu yleensä nestemäiseen väliaineeseen, joka voi olla esimerkiksi vesi tai jokin kemikaali. Fysikaalinen absorptio perustuu siihen, että hiilidioksidi liukenee nesteeseen helpommin kuin metaani, jolloin hiilidioksidi poistuu biokaasusta nesteen mukana. Fysikaalinen absorptio ei sovellu typen tai hapen poistamiseen. Veden käyttö on kemikaalien käyttöä tehokkaampaa, sillä siinä metaanin ja hiilidioksidin liukoisuusero on suurempi kuin useimmilla muilla nesteillä. (Sun et al. 2015, 524.) Kemiallisessa absorptiossa hiilidioksidin poisto perustuu biokaasun ja liuottimen kemiallisiin reaktioihin. Liuottimena käytetään yleensä amiineja, sillä ne aiheuttavat pienen metaanihäviön. Tämän jalostuksen haittana on korkea energiankulutus, sillä kemialliset reaktiot tarvitsevat tarpeeksi lämpöä.

(Sun et al. 2015, 524.) Fysikaalisessa adsorptiossa hiilidioksidi poistetaan jonkin kiinteän adsorbentin avulla. Yleinen adsorbentti on aktiivihiili, jonka pintaan kaasumolekyylit kiinnittyvät. Tämä menetelmä perustuu molekyylien kokoeroihin, ja tällä saadaan poistettu hiilidioksidin lisäksi myös typpimolekyylejä sekä happimolekyylejä, jos ne ovat metaanimolekyylejä pienempiä. Adsorbenttipedit puhdistetaan painevaihteluiden avulla, jolloin sitä kutsutaan PSA:ksi (Pressure Swing Adsorption). Kryojalostus perustuu kiehumis- ja sulamispisteiden eroihin. Tällä tekniikalla pystytään erottamaan hiilidioksidin lisäksi myös typpi ja happi, mutta tämä vaatii hyvin puhdistetun biokaasun. (Sun et al. 2015, 524.) Puhdistettua biokaasua jäädytetään ensin alle hiilidioksidin kiehumispisteen, jolloin se nesteytyy ja voidaan erottaa prosessista. Tämän jälkeen jäädytystä jatketaan alle metaanin kiehumispisteen, jolloin metaani muuttuu nestemäiseksi biokaasuksi typen ollessa vielä kaasumaisessa muodossa. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 148.) Kalvojalostus perustuu molekyylien kokoeroihin. Kaasua ohjataan kalvon läpi, jonka pienemmät hiilidioksidimolekyylit läpäisevät. Kooltaan suuremmat metaanimolekyylit eivät läpäiset kalvoa yhtä helposti kuin hiilidioksidi, jolloin ne erottuvat toisistaan. (Sun et al. 2015, 524.)

3 BIOMETAANIN TUOTANNON YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Biometaanin tuotannosta aiheutuu ympäristövaikutuksia, jotka kuormittavat ympäristöä eri tavoin. Kun tutkitaan biokaasulaitoksista tehtyjä elinkaariarviointeja, yleisimmin niissä käsitellyt ympäristövaikutukset ovat ilmaston lämpeneminen, rehevöityminen, happamoituminen sekä alailmakehän otsonin muodostuminen (Chiu et al. 2016, 24445; Huttunen et al. 2014, 13–14). Ilmaston lämpenemisvaikutus indikoi ilmaan vapautuneiden kasvihuonekaasujen ilmastoä lämmittävää vaikutusta ja sen mittaavana yksikkönä käytetään hiilidioksidiekvivalenttia (CO₂-ekv). Rehevöityminen indikoi vesiekosysteemiin vapautuneiden typpi- tai fosforiyhdisteiden aiheuttamaa vesistön ravinnepitoisuuden kasvua ja sen mittaavana yksikkönä käytetään fosfaatti ekvivalenttia (PO₄⁻-ekv). Happamoituminen indikoi vesiekosysteemiin tai maaperään vapautuneiden kaasujen happamoitumista aiheuttavaa vaikutusta ja sen mittaavana yksikkönä käytetään rikkidioksidi ekvivalenttia (SO₂-ekv). Alailmakehän otsonin muodostuminen indikoi alailmakehässä olevien kaasujen määrää, jotka muodostavat otsonia reagoidessaan auringonvalon kanssa. Alailmakehän otsonin muodostumisen mittaavana yksikkönä käytetään eteeni ekvivalenttia (C₂H₄-ekv). (Ecochain.) Biometaanin tuotannon ilmaston lämpenemisvaikutusta sekä muita ympäristövaikutuksia voidaan tarkastella kattavasti elinkaariarvioinnin avulla.

3.1 Elinkaariarviointi

Elinkaariarviointi eli LCA (Life Cycle Assessment) on menetelmä, jolla arvioidaan tuotteiden ja palveluiden ympäristövaikutuksia niiden koko elinkaaren ajalta aina raaka-aineen hankinnasta tuotantoon, käyttöön, käytöstä poistoon, kierrätykseen ja jätteiden loppusijoitukseen asti. Tällaista koko tuotteen elinkaaren ympäristövaikutusten tarkastelua kutsutaan kehdosta hautaan tarkasteluksi. (ISO 14040:2006, 8). Elinkaariarvioinnin tekemiseen on laadittu kansainvälisen standardisointijärjestön (International Organization for Standardization) toimesta standardeja, joista oleellisimmat ovat ISO 14040 ja ISO 14044. ISO 14040 standardissa määritetään elinkaariarvioinnin periaatteet ja pääpiirteet, kun taas ISO 14044 standardissa määritetään tarkemmin vaatimuksia ja suuntaviivoja elinkaariarvioinnin tekemiseen.

3.2 Biometaanin tuotannosta tehdyt elinkaariarviointit

Biometaanin tuotannosta on tehty joitain kansainvälisiä elinkaariarviointeja, joissa vaikutusluokkana on ilmaston lämpenemispotentiaali. Elinkaariarviointit on kuitenkin tehty eri raaka-aineille, erityyppisille laitoksille sekä käyttäen erilaisia rajoituksia ja oletuksia, joten eri elinkaariarviointien tulokset ovat heikosti täysin verrattavissa toisiinsa. Eri selvitysten tulosten vertailukelpoisuuden selvittäminen vaatii aina perusteellisen tarkastelun vertailtavien selvitysten välillä.

Vaikka biometaanin tuotannosta tehdyt elinkaariselvitykset ovat harvoin täysin vertailukelpoisia, olemassa olevia biometaanin tuotannon elinkaariselvityksiä tutkimalla voidaan kuitenkin tunnistaa ilmaston lämpenemispotentiaalin kannalta keskeisimmät prosessit. Seuraavassa taulukossa 2 on esitetty biometaanin tuotannosta tehtyjä elinkaariarviointeja, joissa on tarkasteltu biometaanin tuotannon elinkaaren aikana muodostuvia kasvihuonekaasupäästöjä. Taulukosta käy ilmi selvityksen tekijä, vuosi sekä tarkastelua. Taulukossa on myös avattu karkeasti selvityksen sisältöä sekä siihen sisällytettyjä prosesseja.

Taulukko 2. Biometaanin tuotannon ympäristövaikutuksista tehtyjä kansainvälisiä tutkimuksia.

Tekijä, vuosi, tarkastelumaa	Selvityksen nimi	Selvityksen sisältö
Börjesson, P & Berglund, M. 2006. Ruotsi	Environmental systems analysis of biogas systems–Part I: Fuel-cycle emissions	Kasvihuonekaasupäästöt on laskettu pienen ja suuren kokoluokan biokaasulaitoksille sekä kuudelle raaka-aineelle, joita ovat: kesantonurmi, olki, sokerijuurikkaan naatit ja lehdet, lietelanta, ruokateollisuuden jäte sekä yhdyskuntien biojäte. Mädätys tapahtuu perinteisessä yksivaiheisessa, mesofiilisessä lämpötilassa toimivassa biokaasulaitoksessa. Selvitys ottaa huomioon raaka-aineiden tuotannon ja kuljetuksen, mädätyksen, biometaanin jalostuksen sekä mädätysjäännöksen kuljetuksen ja levittämisen. Metaanivuotoja tai biometaanin käsittelyä ei ole huomioitu.
Pertl, Andreas et al. 2010. Itävalta	Climate balance of biogas upgrading systems	Kasvihuonekaasupäästöt on laskettu kahdelle raaka-aineelle: biojätteelle ja energiakasveille. Mädätys tapahtuu kaksivaiheisessa, mesofiilisessä lämpötilassa toimivassa biokaasulaitoksessa. Selvitys ottaa huomioon raaka-aineiden tuotannon ja kuljetuksen, mädätyksen, biometaanin jalostuksen, biometaanin paineistuksen, kuljetuksen sekä energian muuntamisen. Tässä selvityksessä tutkittiin neljän eri jalostustekniikan aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä. Mädätysjäännöksen käsittelyä ei ole huomioitu.
Adelt, Marius et al. 2011. Saksa	LCA of biomethane	Kasvihuonekaasupäästöt on laskettu yhdelle raaka-aineelle: energiakasveille. Kasvihuonekaasupäästöt on laskettu kuvitteelliselle edistyneen teknologian laitokselle sekä todelliselle Einbeckin biokaasulaitokselle. Selvitys ottaa huomioon raaka-aineen tuotannon ja kuljetuksen, mädätyksen, biometaanin jalostuksen sekä suorat metaanipäästöt. Tässä selvityksessä ei ole huomioitu lopputuotteiden käsittelyä tai käyttöä.
Buratti, Cinzia et al. 2013. Italia	Assessment of GH emissions of biomethane from energy cereal crops in Umbria, Italy	Kasvihuonekaasupäästöt on laskettu yhdelle raaka-aineelle: energiakasveille. Mädätys tapahtuu mesofiilisessä lämpötilassa kahdessa täyssekoitusreaktorissa. Selvitys ottaa huomioon raaka-aineen tuotannon ja kuljetuksen, raaka-aineen ja mädätysjäännöksen varastoinnin, mädätyksen, biometaanin jalostuksen sekä biometaanin paineistuksen. Myös metaanihäviöt on huomioitu.
Uusitalo et al. 2014. Pohjois-Eurooppa	Greenhouse gas emissions of biomethane for transport: Uncertainties and allocation methods	Kasvihuonekaasupäästöt on laskettu kahdelle raaka-aineelle: energiakasveille ja biojätteelle. Mädätys tapahtuu märkäprosessissa mesofiilisessä lämpötilassa. Selvitys ottaa huomioon raaka-aineen tuotannon ja kuljetuksen, mädätyksen, biometaanin jalostuksen, biometaanin jakelun, tankkauksen ja käytön sekä mädätysjäännöksen käytön. Myös metaanihäviöt on huomioitu.

Taulukossa 2 esitetyissä selvityksissä on annettu numeerisia arvoja biometaanin tuotannosta aiheutuville kasviuonekaasupäästöille. Selvityksissä on huomioitu pelkästään biometaanin tuotannosta aiheutuvat päästöt, niissä ei ole huomioitu tuotteiden hyödyntämisestä saatavia, negatiivisesti kokonaispäästöihin vaikuttavia päästöhyvityksiä. Päästöhyvityksiä saadaan, kun tuotetulla tuotteella voidaan korvata jonkin neutraalin materiaalin tai energian käyttöä. Seuraavassa taulukossa 3 on esitetty edellisen taulukon 2 selvitysten tuloksia. Biometaanin tuotannosta aiheutuvat kasviuonekaasupäästöt on esitetty yksikössä g CO₂-ekv/MJ.

Taulukko 3. Biometaanin tuotannosta aiheutuvia kasviuonekaasupäästöjä eri raaka-aineille. Kasviuonekaasupäästöt on esitetty yksikössä g CO₂-ekv/MJ.

Raaka-aine	Tuotanto ja kuljetus	Mädätys	Jalostus	Tuotteiden käsittely	Yhteensä	Lähde
Kesantonurmi	13	5	6	3	27	Börjesson & Berglund 2006
Olki	3	7	6	4	20	Börjesson & Berglund 2006
Sokerijuurikkaan naatit ja lehdet	3	5	6	4	18	Börjesson & Berglund 2006
Lietelanta	1	7	6	3	17	Börjesson & Berglund 2006
Ruokateollisuuden jäte	1	3	5	2	11	Börjesson & Berglund 2006
Yhdyskuntien orgaaninen jäte	5	4	6	3	18	Börjesson & Berglund 2006
Biojäte	7	11	23	4	45	Pertl et al. 2010
Energiakasvit	38	8	24	4	74	Pertl et al. 2010
Energiakasvit	7,5	2,4	2,5	-	12,4	Adelt et al. 2011
Energiakasvit	16	34	9	4	63	Buratti et al. 2013
Energiakasvit	33	6	4	18	61	Uusitalo et al. 2014
Biojäte	3	6	3	10	22	Uusitalo et al. 2014

Tutkittujen selvitysten kasviuonekaasupäästöt on jaoteltu raaka-aineiden tuotantoon ja kuljetukseen, mädätykseen, biometaanin jalostukseen sekä lopputuotteiden käsittelyyn. Koska

eri selvityksissä oli huomioitu eri prosesseja, käydään seuraavaksi tutkimus karkeasti läpi, mistä tekijöistä edellisen taulukon 3 arvot koostuvat.

Börjesson & Berglund (2006) selvityksessä raaka-aineiden tuotannon päästöt sisältävät viljelyssä käytettävien työkoneiden ja lannoitteiden aiheuttamat suorat sekä epäsuorat päästöt (Börjesson & Berglund 2006, 471). Mädätyksen päästöihin on huomioitu biokaasulaitoksen energiankulutus. Tuotteiden käsittelyn päästöissä on huomioitu mädätysjäännöksen kuljetus ja levitys, mutta biometaanin osalta jalostuksen jälkeisiä prosesseja ei ole otettu huomioon. (Börjesson & Berglund 2006, 475.)

Pertl et al. (2010) selvityksessä viljelyn päästöt sisältävät maanmuokkauksesta, kylvöstä, lannoituksesta, torjunta-aineista, sadonkorjuusta sekä työkoneiden käytöstä aiheutuvat suorat sekä epäsuorat päästöt. Mädätyksen päästöt sisältävät biokaasulaitoksen energiankulutuksen päästöt. Tuotteiden käsittelyn päästöissä on huomioitu biometaanin paineistuksen, kuljetuksen sekä energian muuntamisesta aiheutuvat päästöt. (Pertl et al. 2010, 94, 96.) Selvityksessä on tutkittu neljän eri jalostustekniikan kasvihuonekaasupäästöjä, joista tunnetuimmat ovat PSA, vesipesu sekä kalvojalostus. Taulukossa 3 on esitetty selvityksessä raportoidut kasvihuonekaasupäästöt, kun jalostustekniikkana on käytetty PSA:ta. Kun biojätteestä ja energiajätteestä tuotettu biokaasu jalostettiin vesipesulla, jalostuksen kasvihuonekaasupäästöt olivat PSA jalostusta huomattavasti alhaisemmat, ollen 11 g CO₂-ekv/MJ. Kalvojalostuksen kasvihuonekaasupäästöt olivat taas huomattavasti suuremmat, ollen 38–39 g CO₂-ekv/MJ. (Pertl et al. 2010, 97.) Tämä tutkimus osoittaa hyvin jalostustekniikan vaikutuksen kokonaispäästöihin.

Adelt et al. (2011) selvityksessä viljelyn päästöt kattavat viljelystä, sadonkorjuusta, kuljetuksesta ja raaka-aineen varastoinnista aiheutuvat päästöt. Mädätyksen päästöt sisältävät biokaasulaitoksen energiankulutuksen päästöt. Taulukossa 3 esitetyt tiedot ovat todellisen Einbeckin biokaasulaitoksen tietoja, jossa jalostustekniikkana on käytetty amiinipesua. (Adelt et al. 2011, 647–649.) Jalostuksen päästöt sisältävät jalostuksen energiankulutuksen lisäksi myös biometaanihäviöistä aiheutuvat suorat päästöt.

Buratti et al. (2013) selvityksessä viljelyn päästöt kattavat työkoneiden, lannoitteiden, energian sekä torjunta-aineiden käytöstä aiheutuvat päästöt. Mädätyksen päästöihin on sisällytetty biokaasulaitoksen energiankulutuksen lisäksi myös biokaasun puhdistuksesta, raaka-aineen sekä mädätysjäännöksen varastoinnista aiheutuvat päästöt. Jalostuksen päästöissä on huomioitu vesipesusta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt sekä biometaanihäviöt. (Buratti et al. 2013, 132–133.) Tuotteiden käsittelyn päästöt koostuvat biometaanin paineistuksesta.

Uusitalo et al. (2014) selvityksessä viljelyn päästöt koostuvat työkoneiden käytöstä, lannoittamisesta, kylvämisestä sekä sadonkorjuusta. Mädätyksen päästöt koostuvat biokaasulaitoksen energiankulutuksesta. Jalostuksen kasvihuonekaasupäästöt koostuvat amiinipesun energiankulutuksesta sekä biometaanihäviöistä. Tuotteiden käsittelyn päästöihin on sisällytetty biometaanin jakelu, tankkaus sekä käyttö liikennepolttoaineena. (Uusitalo et al. 2014, 1904–1905.)

Taulukosta 3 huomataan eri elinkaariselvityksissä esitettyjen biometaanin tuotannon kasvihuonekaasupäästöjen vaihtelevan laajasti. Tarkastelluissa elinkaariselvityksissä biometaanin tuotannon kasvihuonekaasupäästöt vaihtelevat välillä 11–63 g CO₂-ekv/MJ. Euroopassa biometaanin tuotannon raaka-aineena käytetään yleisimmin energiakasveja tai maatalouden jäännöksiä, biojätteen käyttö biometaanin tuotannon raaka-aineena ei ole yhtä yleistä (Scarlat et al. 2018, 465). Tämän takia on haastavampaa löytää selvityksiä, joissa biometaanin tuotannon raaka-aineena olisi käytetty biojätettä, sillä useimmat selvitykset on tehty laitoksille, jotka käyttävät raaka-aineina energiakasveja tai maatalouden jäännöksiä. Kasvihuonekaasupäästöjen suuruus on voimakkaasti riippuvainen käytetystä raaka-aineesta. Suurimmat erot eri selvitysten välillä aiheutuivat raaka-aineiden tuotannosta ja kuljetuksesta, jossa vaihteluväli oli 1–38 g CO₂-ekv/MJ. Energiakasvien käytöstä raaka-aineena aiheutuu suuremmat päästöt, kuin jos samassa laitoksessa käytettäisiin raaka-aineena biojätettä. Tämä johtuu siitä, että energiakasveja täytyy viljellä, josta aiheutuu merkittäviä suoria ja epäsuoria päästöjä, pääasiassa työkoneiden sekä lannoitteiden käytöstä. Biojätteiden osalta raaka-aineiden hankinnan päästöt koostuvat vain syötteen kuljettamisesta. Kesantonurmen sekä energiakasvien tuotannon ja kuljetuksen päästöt vaihtelevat välillä 13–38 g CO₂-ekv/MJ, muille raaka-aineille päästöt olivat 1–7 g CO₂-ekv/MJ. Taulukon 3 tietojen pohjalta voidaan karkeasti arvioida energiakasveista tuotetun biometaanin päästöistä noin 40 % aiheutuvan raaka-

aineiden viljelystä ja kuljetuksesta. Biojätteen kuljetuksen päästöt olivat keskimäärin noin 20 %.

Mädätysvaiheen päästöt koostuvat pääasiassa energiankulutuksesta, joten mädätysvaiheen päästöt ovat riippuvaisia käytetystä mädätystekniikasta sekä energiantuotantomuodosta, eivät niinkään syötetystä raaka-aineesta. Energiakasvien sekä biojätteen mädätyksen päästöjen osuus oli suunnilleen sama, noin 25 % kokonaispäästöistä. Eri jalostustekniikat aiheuttavat erilaisia päästöjä, riippuen energiankulutuksesta sekä prosessissa käytetyistä apusyötteistä. Eri jalostustekniikat aiheuttavat myös erilaisia metaanihöviöitä. Energiakasveja raaka-aineena käytettäessä jalostuksesta aiheutuu noin 20 % kokonaispäästöistä, kun taas biojätettä raaka-aineena käytettäessä jalostuksesta aiheutuu noin 30 % kokonaispäästöistä. Loput päästöistä aiheutuvat lopputuotteiden käsittelystä.

Jos tarkastellaan pelkästään mädätyksen päästöjä ja jätetään varastoinnin päästöt tarkastelun ulkopuolelle, huomataan ettei mädätyksen päästöissä ole suurta hajontaa eri selvitysten välillä. Jalostuksen päästöissä ollut hajonta aiheutuu selvitysten erilaisista jalostustekniikoista. Lopputuotteen käsittelyn päästöihin huomioidaan eri tutkimuksissa niin eri asioita, etteivät arvot ole karkeastikaan vertailukelpoisia keskenään.

Päästöjen osalta yhteenvetona voisi todeta jalostuksesta aiheutuvan biometaanin tuotannon suurimmat kasvihuonekaasupäästöt, kun raaka-aineena käytetään biojätettä. Jalostuksesta aiheutuvat päästöt kattavat noin kolmasosan kaikista päästöistä, joten jalostustekniikan valintaan kannattaa kiinnittää erityistä huomiota. Biojätteen mädätyksestä aiheutuu noin neljännes kokonaispäästöistä, kuin myös lopputuotteiden käsittelystä ja käytöstä. Loput päästöistä aiheutuvat biojätteen kuljetuksesta biokaasulaitokselle.

Taulukossa 2 esitetyissä selvityksissä ei ole tutkittu biokaasulaitoksen toiminnasta aiheutuvia päästövähennyksiä, joita saadaan biokaasulaitoksen tuotteiden hyödyntämisestä. Biokaasu ja mädätysjäännös ovat mädätyksen merkittävimpiä tuotoksia, joiden hyödyntämisestä päästövähennyksiä voidaan saada (Hijazi et al. 2016, 1298). Biokaasua voidaan hyödyntää energiantuotannossa tai jalostuksen jälkeen liikennepolttoaineena, jolloin sillä voidaan korvata fossiilisten energialähteiden käyttöä (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 10).

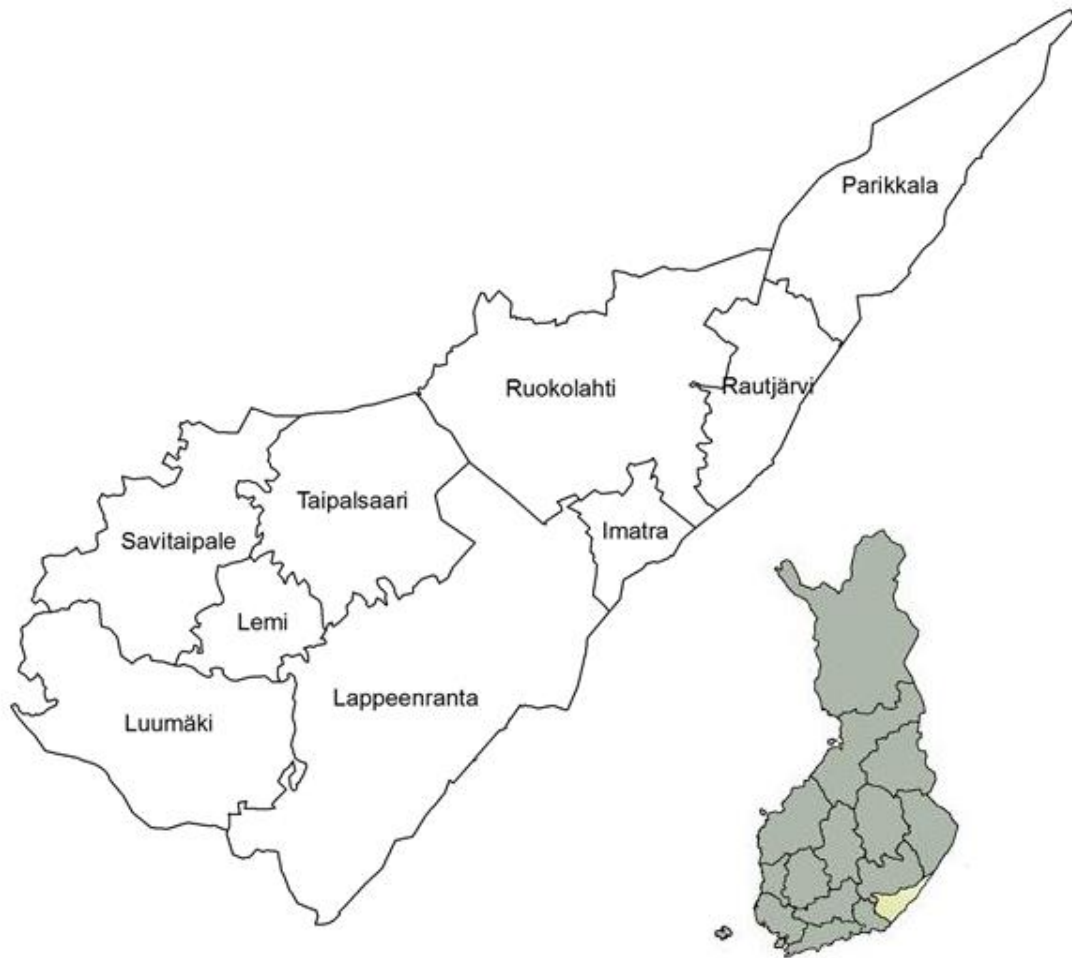
Hyödynnettävän biometaanin määrään ja sitä kautta saatuihin päästövähennyksiin vaikuttaa keskeisesti raaka-aine, sen ominaisuudet ja biokaasun tuottopotentiaali. Lisäksi tähän vaikuttaa kaasun puhdistuksen ja jalostuksen metaanihäviöt. Mädätysjäännös sisältää raaka-aineen ravinteita, joten sitä voidaan hyödyntää lannoitteena korvaamaan teollisten lannoitteiden käyttöä (Hijazi et al. 2016, 1298). Lannoitehyvitysten määrään vaikuttaa keskeisesti raaka-aine ja sen ravinnepitoisuus, lähinnä typpi- ja fosforipitoisuus. Lisäksi tähän vaikuttaa mädätysprosessi, mädätysjäännöksen käsittelyprosessi sekä ravinteiden liukoisuus lannoitteena hyödynnettävässä mädätysjäännöksessä.

4 TARKASTELTAVAN JÄRJESTELMÄN KUVAUS

Tässä kappaleessa esitellään Etelä-Karjalan Jätehuollon toimintaa yleisesti. Lisäksi käydään läpi käytettävät tutkimusmenetelmät sekä tarkasteltavat biojätteen ja puhdistamolietteen käsittelymenetelmät. Tarkasteltavat käsittelymenetelmät käydään läpi melko yksityiskohtaisesti, jotta voidaan paremmin tunnistaa ympäristövaikutuksia aiheuttavia tekijöitä. Kun tarkasteltavat järjestelmät on käyty läpi, tehdään systeemirajaus, jossa tunnistetaan ja nimetään laskentaan sisällytettävät prosessit. Tämän jälkeen tehdään inventaarioanalyysi, jossa avataan laskennan kulkua ja esitetään siihen tarvittavat tiedot määrällisenä.

4.1 Etelä-Karjalan Jätehuolto

Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy on vuonna 1996 perustettu kiertotalousyhtiö, jonka osakaskuntia ovat Lappeenranta, Imatra, Lemi, Luumäki, Parikkala, Rautjärvi, Ruokolahti, Savitaipale sekä Taipalsaari. Yhtiön toiminta-alueella asuu noin 129 000 asukasta. (Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy 2018, 4.) Seuraavassa kuvassa 2 esitetään Etelä-Karjalan Jätehuollon toiminta-alue kartalla.



Kuva 2. Etelä-Karjalan Jätehuollon toiminta-alue (Etelä-Karjalan liitto;Luonnonperintösäätiö).

Etelä-Karjalan Jätehuollon toiminta on keskittynyt Kukkuroinmäen käsittelykeskukseen, jossa jätteiden vastaanotto aloitettiin vuonna 2002. Kukkuroinmäen käsittelykeskus sijaitsee Lappeenrannan Konnunsuolla, noin 12 km Lappeenrannan keskustasta itään. (Etelä-Suomen aluehallintovirasto 2014, 3.) Etelä-Karjalan Jätehuollon tehtävänä on huolehtia omistajakuntien jätehuollon järjestämisestä, jätteiden käsittelystä sekä hyötykäytön edistämisestä ympäristöystävällisesti ja taloudellisesti tehokkaalla tavalla. Pääasiassa Etelä-Karjalan Jätehuollon palveluihin kuuluu omistajakuntien asukkaiden kuiva- ja biojätteiden kuljetukset, täydentävän ekopisteverkoston ylläpito, niiden kehittäminen ja kuljetusten järjestäminen, vaarallisten jätteiden vastaanotto, miehitettyjen Hyödyksi-asemien ylläpito sekä jättemateriaalien sekä pilaantuneiden maa-ainesten vastaanotto. (Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy 2018, 5, 10.)

Etelä-Karjalan Jätehuollon toiminta-alue on 6 873 km², josta vesistöä on 23 %. Vuonna 2018 kuivajäte-, biojäte-, kartonkipakkaus-, pienmetalli-, lasipakkaus-, muovipakkaus- sekä ekopisteiden hyötyjäteastioita tyhjennettiin yhteensä 1 025 518 kertaa. Astiathyjennyskertoja on useita ja välimatkat ovat pitkiä, joten jätteenkeräyksessä kertyy vuodessa huomattava määrä ajokilometrejä. (Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy 2018, 4, 11.)

4.2 Tutkimusmenetelmät

Etelä-Karjalan Jätehuollon asiakkailta kerätyn biojätteen ja puhdistamolietteen käsittelymenetelmän muutoksesta aiheutuvia ympäristövaikutuksia tullaan tutkimaan elinkaariarvioinnilla, standardeihin ISO 14040 ja ISO 14044 perustuen. Tässä työssä tarkasteltavaksi ympäristövaikutusluokaksi on valittu ilmaston lämpenemispotentiaali (GWP, Global Warming Potential). Ilmaston lämpenemispotentiaalin määrittämisessä käytetään hyväksi GaBi-elinkaarimallinnusohjelmaa (versio 9.1), josta saadut tulokset karakterisoidaan metodilla CML 2001 Jan. 2016. Toiminnallisena yksikkönä käytetään yhden vuoden aikana käsitellyn biojätteen ja puhdistamolietteen määrää (t/a). Laskennassa tullaan käyttämään ensisijaisesti primääridataa, aina siltä osin kuin sitä on saatavilla. Muuten tullaan käyttämään sekundääridataa kirjallisuuslähteistä.

4.3 Tarkasteltavat käsittelymenetelmät

Tässä kappaleessa käydään läpi biojätteen ja puhdistamolietteen käsittelymenetelmät: kompostointiprosessi sekä mädätysprosessi. Kompostointiprosessissa käsitellään biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnin ympäristövaikutuksia, se sisältää raaka-aineiden kompostoinnin tunnelikompostissa sekä kompostin jälkikypsytyksen. Mädätysprosessissa käsitellään biojätteen ja puhdistamolietteen mädätyksen ympäristövaikutuksia, se sisältää raaka-aineiden mädätyksen biokaasulaitoksessa, biokaasun käsittelyn sekä biojätteen ja puhdistamolietteen mädätteen käsittelyn.

4.3.1 Kompostointiprosessi

Etelä-Karjalan Jätehuollon toiminta-alueelta kerättävät biojätteet sekä puhdistamolietteet kuljetetaan käsiteltäväksi Kukkuroinmäen käsittelykeskuksen alueella sijaitsevaan Kekkilän kompostointilaitokseen. Näiden syötteiden lisäksi kompostointilaitoksella käsitellään myös Kekkilän asiakkaiden jätteitä. Etelä-Karjalan Jätehuollon asiakkailta erilliskerättyä biojätettä kompostoidaan vuodessa noin 6 300 tonnia ja puhdistamolietettä noin 13 700 tonnia. Vuosittain kompostointilaitoksella käsitellään yhteensä noin 32 000 tonnia jätettä, joten Etelä-Karjalan Jätehuollon toimittamien jätteiden osuus kompostointilaitoksen kokonaiskapasiteetista on 62,5 %. (Vinokurov 2020.)

Kompostointilaitokselle saapuvat raaka-aineet kelpaavat sellaisenaan kompostointiin, niitä ei tarvitse murskata eivätkä ne sisällä merkittäviä määriä kompostointiin kelpaamatonta ainesta. Vastaanoton jälkeen raaka-aineet siirretään pyöräkuormaajalla esikäsitteilyyn, jossa syötteen sekaan lisätään tukiaineena käytettäviä tasauspätkiä. Tasauspätkiä levitetään myös tunnelikompostin pohjalle, jonka päälle raaka-aine siirretään pyöräkuormaajalla. Tunnelikompostiin syötetään ilmaa, joka on lämmitetty kompostointiprosessissa syntyneellä lämmöllä. Tunnelikompostissa syntyy poistokaasuja, jotka ohjataan käsittelyä varten kolmeen happopesuriin. Happopesureihin syötetään rikkihappoa, jonka tarkoituksena on poistaa kaasusta ammoniakia. Ammoniakkipitoinen pesurivesi toimitetaan UPM Kaukaan tehtaalle, jossa se hyödynnetään vedenpuhdistamon typpiravinteena. Happopesurin jälkeen poistokaasut ohjataan biosuodattimeen, jossa täyteaineena käytetään kantomursketta. Tunnelikompostoinnin jälkeen komposti siirretään jälkikypsytykseen, jossa tukiaine seulotaan uudelleenkäyttöä varten. Valmistu kompostia käytetään kasvualustuotannon raaka-aineena sekä peltolannoitteena. (Vinokurov 2020.)

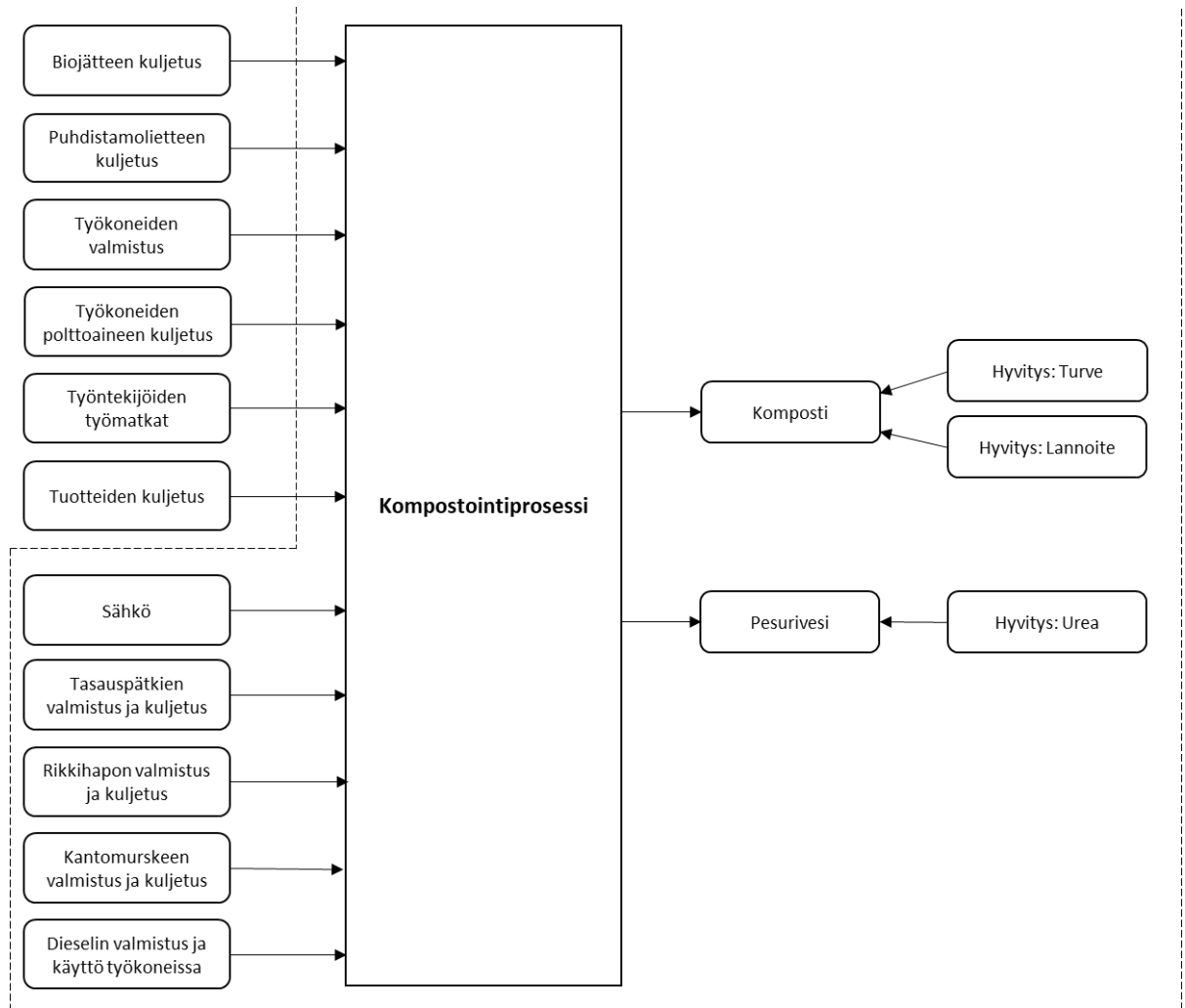
Kompostointilaitoksen toiminnasta aiheutuu suoria sekä epäsuoria päästöjä. Suorat päästöt koostuvat kompostointiprosessissa syntyneestä metaanista, ammoniakista, hiilidioksidista, typpioksiduulista sekä tpestä. Epäsuoria päästöjä aiheutuu raaka-aineiden kuljetuksesta, sähkön kulutuksesta, apusyötteiden valmistuksesta ja kuljetuksesta, työkoneiden valmistuksesta ja käytöstä, työkoneiden polttoaineen kuljettamisesta, työntekijöiden työmatkoista sekä lopputuotteiden kuljetuksesta. Lämmönkulutuksesta ei synny päästöjä, sillä

kompostointilaitoksella käytetty lämpö on kompostoinnin prosessissa syntynyttä lämpöä, joka kierrätetään takaisin prosessiin. Kompostointilaitoksella ei ole tarvetta käyttämättömälle vesijohtovedelle, sillä siellä käytetään pääasiassa prosessista kierrätettyä vettä. Myöskään jätevesien käsittelystä ei synny päästöjä, sillä kompostointilaitoksella ja jälkikypsytyksellä syntyvät jätevedet kierrätetään takaisin kompostointiprosessiin. (Vinokurov 2020.)

Kaikkia edellä mainittuja epäsuoria päästöjä ei tulla sisällyttämään tämän työn tarkasteluun. Kompostointiprosessin epäsuoria päästöjä tarkastellessa huomioidaan sähkön kulutuksesta, apusyötteiden valmistuksesta ja kuljetuksesta sekä työkoneiden käytöstä aiheutuvat päästöt. Kompostointiprosessissa käytetyt tärkeimmät apusyötteet ovat tasauspätkät, rikkihappo sekä kantomurske. Tarkastelun ulkopuolelle jätetään raaka-aineiden kuljetus, työkoneiden valmistus, työkoneiden kuluttaman polttoaineen kuljetus, työntekijöiden työmatkat sekä lopputuotteiden kuljetus. Raaka-aineiden kuljetuksesta aiheutuu todellisuudessa merkittäviä päästöjä, mutta niiden tarkka määrittäminen on haastavaa. Koska nyt halutaan vertailla biojätteen ja puhdistamolietteen käsittelymenetelmän muutoksen päästöjä, voidaan raaka-aineiden kuljetuksen päästöt jättää perustellusti tarkastelun ulkopuolelle, sillä ne ovat näiden käsittelymenetelmien välillä muuttumattomat. Kompostointilaitoksella käytettävien työkoneiden valmistuksen päästöt sekä työkoneiden kuluttaman dieselin kuljetuksen päästöt jätetään tarkastelun ulkopuolelle, sillä niiden voidaan olettaa olevan kokonaispäästöjen kannalta merkityksettömät. Työntekijöiden työmatkat jätetään tarkastelun ulkopuolelle, sillä työntekijöiden määrä on vähäinen ja sen voidaan olettaa olevan muuttumaton näiden käsittelymenetelmien välillä. Valmiiden lopputuotteiden kuljetuksen päästöjä ei tarkastelussa huomioida, sillä todellisuudessa ei voida tarkasti tietää tuotoksen käyttöpaikkaa. Lopputuotteiden kuljetuksesta aiheutuviin päästöihin liittyy paljon epävarmuutta, eikä niillä oleteta olevan lopputuloksen kannalta merkittävää vaikutusta.

Kompostointiprosessissa syntyy prosessista poistuvina tuotoksina kompostia sekä pesurivettä. Näistä prosesseista aiheutuu päästöhyvityksiä, jotka sisällytetään tarkasteluun. Osan kompostista oletetaan korvaavan turvetta, jolloin vältetään turpeennostosta aiheutuvia päästöjä. Osan kompostista oletetaan korvaavan typpi- ja fosforilannoitteita, jolloin vältetään teollisten lannoitteiden valmistamisesta aiheutuvia päästöjä. Pesuriveden oletetaan korvaavan ureaa metsäteollisuuden jätevedenpuhdistuksessa, jolloin sen hyödyntämisellä vältetään

urean valmistamisesta aiheutuvia päästöjä. Seuraavassa kuvassa 3 on esitettyä kompostointiprosessin systeimirajaus, josta käy ilmi tarkasteluun sisällytetyt ja sen ulkopuolelle jätetyt prosessit.



Kuva 3. Kompostointiprosessin systeimirajaus.

4.3.2 Mädätysprosessi

Vuodesta 2020 eteenpäin Etelä-Karjalan Jätehuollon toiminta-alueen asukkailta erilliskerätyt biojätteet sekä jätevedenpuhdistamojen puhdistamolietteet kuljetetaan käsiteltäväksi Kukkuroinmäen käsittelykeskuksessa sijaitsevaan biokaasulaitokseen. Vuonna 2020 valmistuva biokaasulaitos on tyypiltään kuivamädätyslaitos, jossa biojätteelle ja puhdistamoliettele on erilliset linjat ja omat tulppavirtausreaktorit. Reaktorit toimivat termofiilisellä

lämpötila-alueella, viipymääjän ollessa noin 21 vuorokautta. (Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy 2019a.)

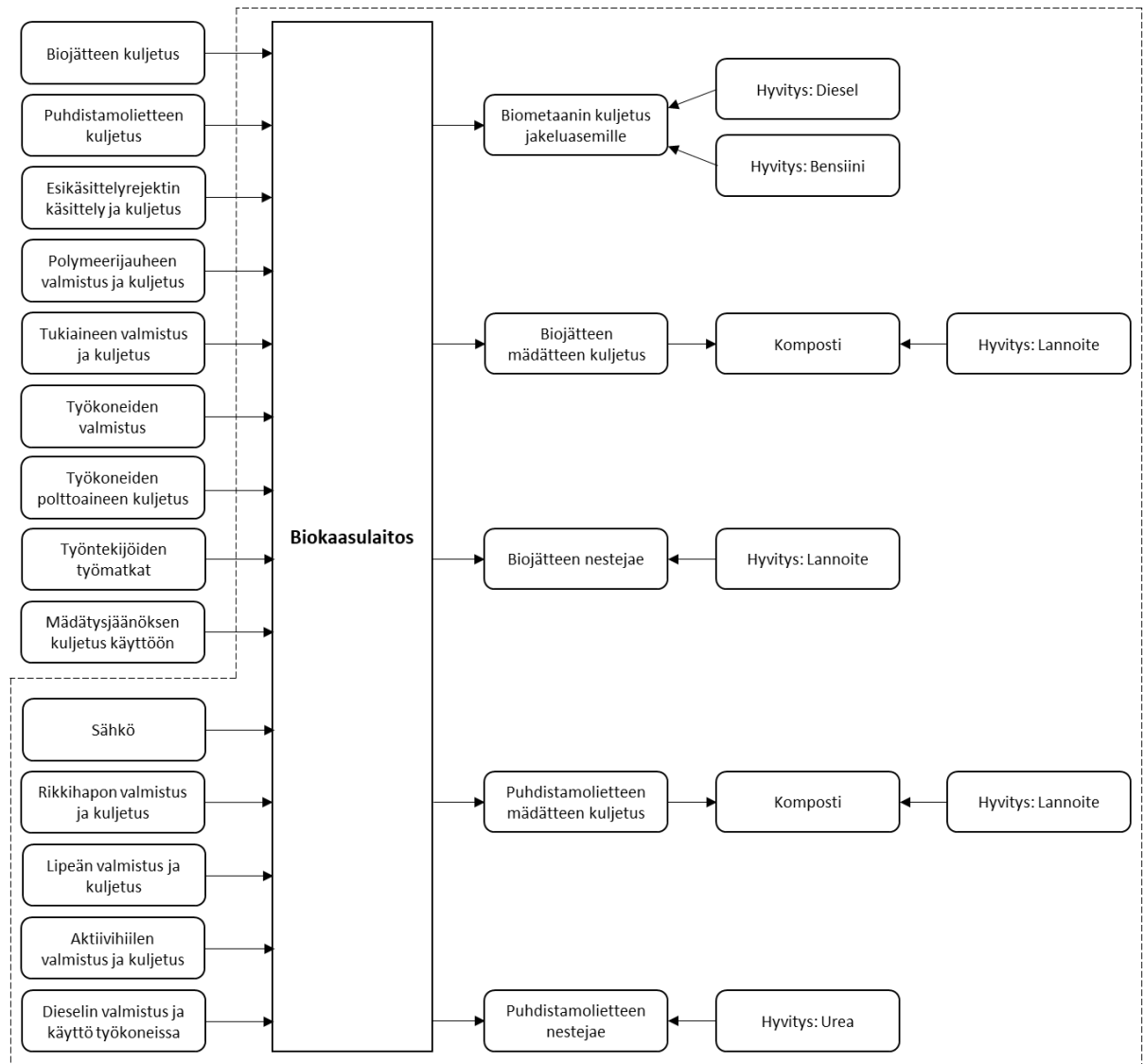
Biokaasulaitokselle saapunut raaka-aine siirretään kahmarilla varustetulla nosturilla esikäsitteilyyn. Puhdistamolietteeseen lisätään tarvittaessa vettä, mutta muuta esikäsitteilyä se ei tarvitse. Biojätteen palakokoa pienennetään ja siitä erotellaan metallirejektit, tarvittaessa siihen lisätään pyöräkuormaajalla puutarhajätettä ja risuja tukiaineeksi kuiva-ainepitoisuuden säätämiseksi. Biokaasureaktoreissa syntyy metaanipitoisuudeltaan 55–60 prosentista biokaasua, joka johdetaan biokaasuväestön kautta puhdistukseen. Puhdistus tapahtuu lipeän avulla kemiallisessa emäspesurissa, jonka jälkeen biokaasu johdetaan aktiivihiihluodattimen kautta jalostukseen. Jalostuksessa biokaasun metaanipitoisuutta kasvatetaan kalvojalostuksen avulla, jonka jälkeen jalostettu biometaani hyödynnetään liikennepolttoaineena. Biokaasun lisäksi reaktoreissa syntyy mädätysjännöstä, josta osa pumpataan takaisinkierrettäväksi reaktorien syöttöpäähän ja osa syötetään jatkokäsittelyyn. Takaisinkierrettävyyden tarkoituksena on ylläpitää mädätyksen vaatimaa mikrobikantaa sekä saada mädätysprosessi tehokkaasti käyntiin heti reaktorien alkuosasta lähtien. Jatkokäsittelyssä molempien linjojen mädätysjännöksistä erotellaan nestejäte ja kiintojäte (mädäte) ruuvipuristimen sekä lingon avulla. Nesteenerotuksen tehostamiseksi mädätysjännökseen lisätään polymeeriliuosta. Biojätelinjan nestejäte hyödynnetään sellaisenaan peltolannoitteena ja mädäte hyödynnetään tunnelikompostoinnin jälkeen luomulannoitteena. Puhdistamolietteen nestejäte hyödynnetään UPM Kaukaan vedenpuhdistamolla typpiravinteena ja mädäte hyödynnetään jälkikypsytyksen jälkeen peltolannoitteena. Biokaasulaitoksella syntyy kompostointilaitoksen tapaan poistokaasuja, jotka ohjataan happopesureihin. Happopesureihin syötetään rikkihappoa, jonka tarkoituksena on poistaa kaasusta ammoniakkia. Ammoniakkipitoinen pesurivesi johdetaan lietealtaaseen tai laitoksen jätevesijärjestelmään, eli sitä ei hyödynnetä prosessin ulkopuolella. Happopesurin jälkeen poistokaasut ohjataan emäspesuriin, jossa poistokaasusta poistetaan happamat yhdisteet lipeän avulla. Lopuksi poistokaasut johdetaan kolmen rinnakkaisen aktiivihiihluodattimen läpi. (Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy 2019a.)

Biokaasulaitoksen toiminnasta aiheutuu suoria sekä epäsuoria päästöjä. Biokaasulaitoksella suoria päästöjä voi aiheutua muun muassa raaka-aineiden ja mädätysjännöksen varastoinnista sekä biokaasun puhdistuksesta ja jalostuksesta (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 178).

Kukkuroinmäen biokaasulaitoksessa raaka-aineita ei kuitenkaan varastoida, vaan ne menevät suoraan vastaanottoon ja siitä mahdollisimman nopeasti käsittelyyn (Oksman-Takalo 2020). Oletetaan biokaasulaitoksen suorien päästöjen koostuvan pelkästään biokaasun jalostuksessa aiheutuvista metaanihöyryistä. Epäsuoria päästöjä aiheuttaa raaka-aineiden kuljetuksesta, sähkön kulutuksesta, esikäsittelyrejektin käsittelystä ja kuljetuksesta, apusyötteiden valmistuksesta ja kuljetuksesta, työkoneiden valmistuksesta ja käytöstä, työkoneiden polttoaineen kuljettamisesta, työntekijöiden työmatkoista sekä lopputuotteiden kuljettamisesta. Lämmönkulutuksesta ei synny päästöjä, sillä lämpö saadaan omista prosesseista. Jätevesien käsittelystä ei synny päästöjä, sillä biokaasulaitoksella syntyvät jätevedet kierrätetään prosessissa, jolloin viemäriin ei johdeta jätevesiä.

Kaikkia edellä mainittuja epäsuoria päästöjä ei kuitenkaan tulla sisällyttämään tämän työn tarkasteluun. Epäsuoria päästöjä tarkastellessa huomioidaan sähkön kulutuksesta, apusyötteiden valmistuksesta ja kuljetuksesta, työkoneiden käytöstä, välivalmisteiden kuljetuksesta ja käsittelystä sekä biometaanin kuljetuksesta aiheutuvat päästöt. Biokaasulaitoksessa käytetyt tärkeimmät apusyötteet ovat tukiaine, rikkihappo, lipeä, aktiivihili sekä polymeerijauhe. Polymeerijauheen valmistuksen ja kuljetuksen päästöt jätetään kuitenkin nyt tarkastelun ulkopuolelle, sillä luotettavaa tietoa polymeerijauheen valmistuksen päästöistä ei pystytty löytämään. Polymeerijauheen valmistuksen päästöt voidaan jättää huomioimatta, sillä sitä kulutetaan laitoksella niin vähän, että epävarmoilla päästökertoimilla laskettaessa tämä aiheuttaisi enemmän epävarmuutta tuloksiin kuin sen jättäminen kokonaan laskennan ulkopuolelle. Tarkastelun ulkopuolelle jätetään raaka-aineiden kuljetus, tukiaineen valmistus ja kuljetus, esikäsittelyrejektin käsittely ja kuljetus, työkoneiden valmistus, työkoneiden kuluttaman polttoaineen kuljetus, työntekijöiden työmatkat sekä käsiteltyjen mädätysjäännösten kuljetus. Raaka-aineiden kuljetus, työkoneiden valmistus, työkoneiden dieselin kuljetus, työntekijöiden työmatkat sekä käsiteltyjen mädätysjäännösten kuljetus jätetään tarkastelun ulkopuolelle samoista syistä kuin kompostointilaitoksen osalta. Tukiaineen valmistus ja kuljetus jätetään tarkastelun ulkopuolelle, sillä tukiaineena käytetään jätemateriaalia, joka kuljetettaisiin Kukkuroinmäelle vaikka sitä ei hyödynnettäisi biokaasulaitoksessa tukiaineena. Esikäsittelyrejektin käsittely ja kuljetus rajataan tutkimuksen ulkopuolelle, sillä sen määrän voidaan olettaa olevan niin vähäinen, ettei siitä aiheudu kokonaisuuden kannalta merkittäviä ympäristövaikutuksia tai hyvityksiä.

Mädätysprosessissa syntyy prosessista poistuvina tuotoksina biometaania, biojätteen nestejakeetta ja mädätettä sekä puhdistamolietteen nestejakeetta ja mädätettä. Näistä prosesseista aiheutuu päästöhyvityksiä, jotka sisällytetään tarkasteluun. Biometaanin oletetaan korvaavan bensiiniä sekä dieseliä, jolloin vältetään näiden fossiilisten polttoaineiden valmistuksesta sekä poltosta aiheutuvia päästöjä. Biojätteen sekä puhdistamolietteen mädätteiden sekä biojätteen nestejakeen oletetaan korvaavan typpi- ja fosforilannoitteita, jolloin vältetään teollisten lannoitteiden valmistamisesta aiheutuvia päästöjä. Puhdistamolietteen nestejakeen oletetaan korvaavan ureaa, jolloin sen ravinnekäytöllä vältetään urean valmistamisesta aiheutuvia päästöjä. Seuraavassa kuvassa 4 on esitettynä mädätysprosessin systeemirajaus, josta käy ilmi tarkasteluun sisällytetyt ja sen ulkopuolelle jätetyt prosessit.



Kuva 4. Mädätysprosessin systeemirajaus.

4.4 Inventaarioanalyysi

Inventaarioanalyysissa selvitetään yksikköprosesseihin menevien ja niistä poistuvien energia- ja materiaalivirtojen määrälliset arvot. Tarkasteltavat yksikköprosessit on tunnistettu kappaleessa 4.3 ja eri käsittelymenetelmien systeimirajaukset on esitetty kuvissa 3 ja 4. Inventaariodatan tiedonkeruu suoritettiin kevään 2020 aikana. Seuraavaksi tullaan esittämään laskennassa tarvittavia lähtötietoja.

4.4.1 Kompostointiprosessi

Kompostointilaitoksen osalta tarkasteltavat osaprosessit ovat kuvan 3 mukaisesti sähköntuotanto, tasauspätkien valmistus ja kuljetus, rikkihapon valmistus ja kuljetus, kantomurskeen valmistus ja kuljetus sekä työkoneissa käytettävän dieselin valmistus ja poltto. Tässä käsittelymenetelmässä melko tarkkaa primääridataa on hyvin saatavilla, sillä kyseessä on olemassa oleva laitos, joka on ollut toiminnassa useita vuosia. Inventaariodatan keräämisen tuloksena saatiin koko kompostointilaitoksella käytetyt materiaali- ja energiavirrat. Koska vain 62,5 % kompostoinnin raaka-aineista tullaan jatkossa käsittelemään ensisijaisesti biokaasulaitoksella, täytyy kompostointilaitoksen syötteet ja päästöt allokoida massaperusteisesti tälle jätemäärälle.

Sähkö

Kompostointilaitoksella sähköä kulutetaan kokonaisuudessaan noin 1 000 MWh/a laitoksen yleisiin toimintoihin sekä tunnelikompostiin syötettävän ilman pumppaamiseen. Biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnille tästä allokoituu 625 MWh/a. Laitoksella kulutettu sähkö on tavallista verkkosähköä, joten laskennassa voidaan käyttää tietoja Suomessa keskimäärin kulutetusta sähköstä. (Vinokurov 2020.) Sähköntuotannon ympäristövaikutukset määritetään GaBista löytyvän sähköntuotantoprosessin FI: Electricity grid mix avulla, jossa huomioidaan Suomessa kulutetun sähkön valmistuksesta aiheutuvat päästöt. Tämä prosessi on yhdistelmä Suomessa sekä naapurimaissa tuotettua sähköä, joka on peräisin eri lähteistä. Tässä datassa neljäsosa on tuontisähköä ja loput kotimaista sähköä. Tämän prosessin sähköstä kolmasosa on tuotettu ydinvoimalla. Data sisältää sähköntuotantoon käytettyjen raaka-

aineiden hankinnan, kuljetuksen, itse sähköntuotannon sekä sähkön jakelu-/siirtohäviöt. (GaBi 9.1.)

Tukiaine

Tasauspätkiä käytetään kompostoinnissa tukiaineena parantamaan kompostoitavan massan ilmavuutta sekä pienentämään kompostin kosteutta. Käytetty tukiaine seulotaan jälkikypsytyksessä ja kierrätetään takaisin prosessiin, jolloin uutta tukiainetta ei tarvita niin paljon. Tukiaineena käytetyt tasauspätkät ovat metsäteollisuuden puutähteitä, joita syntyy sahalla, kun puutavara sahataan tiettyyn mittaan. Tasauspätkiä kuljetetaan Kukkuroinmäelle UPM Korkeakosken sahalta Juupajoelta sekä Leningradin alueelta Venäjältä. (Vinokurov 2020.) Korkeakosken saha tuottaa mäntysahatavaraan, joten tasauspätkien voidaan olettaa olevan kokonaisuudessaan mäntyä (UPM Timber). GaBista löytyy prosessi EU-28: Timber pine (12 % moisture; 10,7 % H₂O content), joka sisältää sahatavaran valmistuksen päästöt kehdestä portille. Tässä prosessissa huomioidaan puiden kuljetus sahalle, puiden sahaus sekä sahatavaran kuivaus. (GaBi 9.1.) Kohdistetaan tasauspätkien valmistuksesta aiheutuvat päästöt niille massaperusteisesti. Koska tasauspätkät ovat metsäteollisuuden sivutuote, ei niille kohdistuvia päästöjä todellisuudessa olisi järkevintä allokoida massaperusteisesti, usein kustannuserusteinen allokointi voi olla sivutuotteille parempi vaihtoehto. Kuitenkin laskennan yksinkertaistamiseksi oletetaan tasauspätkien valmistuksen päästöjen allokoituvan niille massaperusteisesti.

Kompostointilaitoksella uutta tukiainetta kulutetaan noin 1 500 t/a, josta biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnille allokoidaan 938 t/a (Vinokurov 2020). Oletetaan, että vuodessa käytetystä tukiaineesta puolet tuodaan Korkeakosken sahalla, josta yhdensuuntainen kuljetusmatka Kukkuroinmäelle on 310 km. Puolet tukiaineesta tuodaan Leningradin alueelta Venäjältä, joka on laaja alue ja täsmällisen kuljetusmatkan määrittäminen ei ole mahdollista. Nyt Venäjältä tuotavien tukiaineiden yhdensuuntaiseksi kuljetusmatkaksi on oletettu Pietarin ja Kukkuroinmäen välinen etäisyys, eli 190 km. Koska tukiaineen tarve on suuri, voidaan olettaa kuljetuksen tapahtuvan täysperävaunuyhdistelmällä, jonka kapasiteetti on 50 tonnia. Oletetaan, että tukiainetta tuodaan Kukkuroinmäelle 30 kertaa vuodessa, aina täysi kuorma kerrallaan. Näillä oletuksilla edestakaisia ajokilometrejä kertyy vuodessa noin 14 900 km. GaBista ei löydy kuljetusprosessia näin suurelle ajoneuvoyhdistelmälle, joten

tasauspätkien kuljetuksen päästöjä arvioidaan Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n Lipasto-tietokannan tietojen perusteella. Lipasto-tietokannassa on esitetty päästökertoimia ja polttoaineenkulutuksia kapasiteetiltaan 40 tonnin ja 51 tonnin täysperävaunuyhdistelmille (VTT 2017i, VTT 2017j). Näiden tietojen perusteella saadaan laskettua kapasiteetiltaan 50 tonnin täysperävaunuyhdistelmälle päästökerroin sekä polttoaineenkulutus. Kuljetuksen päästöissä huomioidaan tukiaineen kuljetus täydellä kuormalla Kukkuroinmäelle, sekä ajoneuvoyhdistelmän paluu tyhjänä lähtöpaikalle. Tällöin edestakaisen kuljetuksen keskimääräiseksi osakuormaksi voidaan olettaa 50 %. Tällä osakuormalla kyseisen täysperävaunuyhdistelmän päästökertoimeksi maantieajossa saadaan 1 138 g CO₂-ekv/km ja dieselin kuluukseksi 48,0 l/100 km, jolloin tukiaineen kuljetukseen kuluu dieseliä noin 7 130 litraa vuodessa. Tukiaineen kuljetuksen päästöistä 62,5 % allokoituu biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnille. Dieselin valmistuksen päästöt mallinnetaan GaBista löytyvän prosessin EU-28: Diesel mix at filling station avulla. Tämä prosessi huomioi raakaöljystä sekä biokomponenteista valmistetun dieselin päästöt, bioperäisen dieselin osuudeksi on määritetty 6,41 %. Tämä prosessi ottaa huomioon dieselin valmistuksen päästöt aina raaka-aineiden hankinnasta ja kuljetuksesta siihen, kun valmis diesel kuljetetaan tankkausasemille. (GaBi 9.1.)

Rikkihappo

Rikkihappoa käytetään happopesureissa poistamaan poistokaasusta ammoniakkia ja ammoniumyhdisteitä. Rikkihappo (H₂SO₄) reagoi ammoniakkin ja ammoniumyhdisteiden kanssa muodostaen ammoniumsulfaattinestettä ((NH₄)₂SO₄), jota voidaan hyödyntää muissa toiminnoissa. Kompostointilaitoksella poistokaasun puhdistukseen käytetään väkevää rikkihappoa (93 %). Rikkihapon valmistuksen päästöt määritetään GaBi prosessin EU-28: Sulphuric acid (96 %) avulla, joka sisältää rikkihapon valmistuksen päästöt kehdesta portille. (GaBi 9.1.)

Kompostointilaitoksella rikkihappoa kulutetaan noin 216 t/a, jonne sitä tuodaan säiliöautolla noin kerran kuukaudessa. Biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnille tästä allokoituu 135 t/a. Rikkihappo tuodaan Boliden Harjavalta Oy:ltä, joten yhdensuuntainen kuljetusmatka on 390 km. Näillä oletuksilla edestakaisia ajokilometrejä kertyy vuodessa noin 9 300 km. Oletetaan, että rikkihappoa tuotaisiin laitokselle aina täysi kuorma, jolloin rikkihappo

tuotaisiin kapasiteetiltaan 18 tonnin säiliöautolla. (Vinokurov 2020.) Rikkihapon kuljetuksen päästöjä arvioidaan Lipasto-tietokannan tietojen avulla. Tietokannassa on esitetty päästökertoimia ja polttoainenkulutuksia kapasiteetiltaan 9 tonnin jakelukuorma-autolle sekä 25 tonnin puoliperävaunuyhdistelmälle (VTT 2017g, VTT 2017h). Näiden ajoneuvojen tietojen perusteella saadaan laskettua rikkihapon kuljettamiseen käytettävälle säiliöautolle päästökerroin sekä polttoainenkulutus. Kuljetuksen päästöissä huomioidaan rikkihapon kuljetus Kukkuroinmäelle täydellä kuormalla sekä säiliöauton paluu tyhjänä lähtöpaikalle. Säiliöauton edestakaisen kuljetuksen keskimääräiseksi osakuormaksi voidaan olettaa 50 %. Tällöin kyseisen säiliöauton päästökertoimeksi maantieajossa saadaan 627 g CO₂-ekv/km ja dieselin kulutukseksi 26,4 l/100 km, jolloin rikkihapon kuljetuksessa kuluu dieseliä vuodessa noin 2 460 litraa. Rikkihapon kuljetuksen päästöistä 62,5 % allokoituu biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnille. Dieselin valmistuksen päästöt mallinnetaan GaBista löytyvän prosessin EU-28: Diesel mix at filling station avulla.

Kantomurske

Kantomursketta käytetään happopesureiden jälkeen sijaitsevilla biosuodattimissa, joihin poistoilma johdetaan. Biosuodattimien tarkoituksena on poistaa poistokaasusta hajuja ja ammoniakkia ennen kaasun johtamista ilmaan. Tämän toiminta perustuu biomassan mikrobien kykyyn hajottaa hajukaasuja biologisesti. (Kaakkois-Suomen ympäristökeskus 2009, 4.) Kantomurske on hakkuutähdettä, jota valmistetaan nimensä mukaisesti kannoista, jotka kerätään kaivinkoneella hakkuualueelta. Hakkuualueelta kannot kuljetetaan tienvarteen lähikuljetuksella, jossa kannot haketetaan hakkurilla/murskaimella. (Ovaskainen et al. 2017.) Kantomurskeen valmistuksen päästöille ei löydy GaBi prosessia, joten niitä täytyy arvioida kirjallisuusarvoihin perustuen. Oletetaan nyt haketuksen tapahtuvan tienvarsihaketuksena, jolloin kantomurskeen valmistuksen päästöt koostuvat keräykseen, lähikuljetukseen ja haketukseen käytettyjen työkoneiden polttoainenkulutuksista. Ovaskainen et al. (2017) tutkimuksessa on esitetty keskimääräisiä päästöjä kannonnostoille, lähikuljetukselle sekä haketukselle. Päästöt on laskettu kulutetun polttoainemäärän perusteella olettaen, että yhden diesellitran poltosta aiheutuu päästöjä 2 660 g CO₂-ekv, dieselin valmistuksen päästöjä ei tässä tutkimuksessa ole otettu huomioon. Ovaskainen et al. (2017) tutkimuksessa kannonnostojen päästöiksi arvioitiin 8 060 g CO₂-ekv/m³, lähikuljetuksen päästöiksi 4 500 g CO₂-ekv/m³, haketuksen ja murskauksen päästöiksi 3 550 g CO₂-ekv/k-m³ sekä murskaimen siirtämisen

päästöiksi 250 g CO₂-ekv/m³. Yhteensä kantomurskeen valmistuksen päästöiksi arvioitiin 16 360 g CO₂-ekv/m³. Koska tämä tutkimus ei huomionnut dieselin valmistuksesta aiheutuvia päästöjä, arvioidaan niitä erikseen. Kuten aiemmin mainittiin, Ovaskainen et al. (2017) tutkimuksessa työkoneiden käytöstä aiheutuviksi päästöiksi määritettiin 2 660 g CO₂-ekv/l, jolloin työkoneiden dieselin kulutuksen voidaan arvioida olevan 6,15 l/m³. Dieselin valmistuksen päästöt voitaisiin tässä tapauksessa mallintaa GaBista löytyvän prosessin EU-28 Diesel mix at filling station avulla.

Galezia (2017) tutkimuksessa on esitetty kantomurskeen tuotannon päästöiksi 4 730 g CO₂-ekv/m³. Tämä huomioi kantojen ja hakkeen siirtelyn pyöräkuormaajalla, murskaimen ja seulan käytön sekä hakettimen ja murskaimen siirtelyn traktoriyksiköllä. Tämä tutkimus ei ota huomioon kantojen nostoa sekä lähikuljetusta tienvarteen. Ovaskainen et al. (2017) tutkimuksessa taas ei huomioitu pyöräkuormaajan käyttöä. Jos pyöräkuormaajan käyttö vähennetään tästä edellisestä arvosta, niin haketuksen päästöiksi saadaan Galezia (2017) tutkimuksen mukaan 3 660 g CO₂-ekv/m³, joka on lähes sama kuin Ovaskaisen tutkimuksessa. Edellä mainitut tutkimukset vaikuttaisivat olevan samassa linjassa toistensa kanssa, joten käytetään nyt laskennassa Ovaskainen et al. (2017) tutkimuksen tuloksia.

Uusi kantomurske vaihdetaan biosuodattimiin kolmen vuoden välein, jonka jälkeen se voidaan hyödyntää kompostoinnissa tukiaineena. Tämän ei kuitenkaan oleteta vaikuttavan kompostointilaitokselle tuotavaan tukiaineen määrään. Kantomursketta tuodaan Kukkuroinmäelle Vapon Konnunsuon tuotantopaikalta, jolloin kuljetusmatkaksi arvioitiin noin 2 km. Biosuodattimiin tarvitaan kantomursketta noin 760 m³, josta kolmasosa kierrätetään suodatimessa bakteerikannan ylläpitämiseksi. (Vinokurov 2020.) Uutta kantomursketta tarvitaan kolmen vuoden välein siis 507 m³, jolloin vuodessa kantomurskeen kulutus olisi 169 m³. Tällöin kantomurskeen valmistus kuluttaisi dieseliä noin 1 040 litraa vuodessa. Jos kantomurskeen tiheydeksi oletetaan 450 kg/m³ (Alakangas et al. 2016, 64), niin tarvittavan kantomurskeen massa olisi 76 tonnia vuodessa. Oletetaan, että kantomursketta tuotaisiin täysi kuorma kaksi kertaa vuodessa, jolloin se kuljetettaisiin kapasiteetiltaan 38 tonnin täysperävaunuyhdistelmällä. Näillä oletuksilla edestakaisia ajokilometrejä kertyisi vuodessa 8 km. Kantomurskeen kuljetuksen päästöjä arvioidaan Lipasto-tietokannan tietojen avulla. Tietokannassa on esitetty päästökertoimia ja polttoainekulutuksia kapasiteetiltaan 25 tonnin

puoliperävaunuyhdistelmälle sekä 40 tonnin täysperävaunuyhdistelmälle (VTT 2017g, VTT 2017i). Näiden ajoneuvojen tietojen perusteella saadaan laskettua kantomurskeen kuljettamiseen käytettävälle ajoneuvoyhdistelmälle päästökerroin sekä polttoaineenkulutus. Kuljetuksen päästöissä huomioidaan kantomurskeen kuljetus Kukkuroinmäelle täydellä kuormalla sekä ajoneuvoyhdistelmän paluu tyhjänä lähtöpaikalle. Ajoneuvoyhdistelmän edestakaisen kuljetuksen keskimääräiseksi osakuormaksi voidaan olettaa 50 %. Tällöin kyseisen ajoneuvoyhdistelmän päästökeroimeksi maantieajossa saadaan 973 g CO₂-ekv/km ja dieselin kulutukseksi 41,2 l/100 km, jolloin kantomurskeen kuljetuksessa kuluu dieseliä vuodessa 4 litraa. Kantomurskeen kuljetuksen päästöistä 62,5 % allokoituu biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnille. Dieselin valmistuksen päästöt mallinnetaan GaBista löytyvän prosessin EU-28: Diesel mix at filling station avulla.

Työkoneet

Kompostointilaitoksella käytetään työkoneina dieselkäyttöistä pyöräkuormaajaa sekä seulaa. Pyöräkuormaajaa käytetään kompostointilaitoksella useisiin eri toimintoihin, kuten raaka-aineiden ja lopputuotteiden siirtelyyn, tukiaineen siirtelyyn sekä aumojen kääntelyyn. Seulaa käytetään tunnelikompostoinnin jälkeen erottamaan tukiaine valmiista kompostista. Näiden työkoneiden dieselin kulutus on noin 55 000 l/a, josta biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnille allokoituu noin 34 400 l/a. (Vinokurov 2020.) Työkoneiden käytön päästöille ei löydy GaBi prosessia, joten työkoneiden käytön päästöjä arvioidaan Lipasto-tietokannan tietojen avulla. Tietokannassa on esitetty päästökertoimia erilaisille dieselkäyttöisille sekä bensiinikäyttöisille työkoneille polttoainelitraa kohden. Tietokannasta löytyy päästökerroin dieselkäyttöiselle pyöräkuormaajalle, mutta ei seulalle. Eri dieselkäyttöisten työkoneiden päästökertoimilla ei kuitenkaan ole keskenään merkittävää eroa, joten oletetaan nyt seulan ja pyöräkuormaajan päästökertoimen olevan sama. Pyöräkuormaajan päästökeroimeksi on Lipasto-tietokannassa esitetty 2 673 g CO₂-ekv/l (VTT 2017k). Dieselin valmistuksen päästöt mallinnetaan GaBista löytyvän prosessin EU-28: Diesel mix at refinery avulla. Tämä prosessi huomioi raakaöljystä sekä biokomponenteista valmistetun dieselin päästöt, bioperäisen dieselin osuudeksi on määritetty 6,41 %. Tämä prosessi ottaa huomioon dieselin valmistuksen päästöt aina raaka-aineiden hankinnasta ja kuljetuksesta jalostukseen. (GaBi 9.1.)

Suorat päästöt

Kompostointiprosessissa syntyy edellä mainittujen epäsuorien päästöjen lisäksi myös suoria päästöjä. Aikaisemmin todettiin kompostoinnin suorien päästöjen koostuvan metaanista, ammoniakista, typpioksiduulista, hiilidioksidista sekä tpestä. Koska nyt tarkastellaan kompostoinnin ilmaston lämpenemisvaikutusta, huomioidaan laskennassa vain metaani- sekä typpioksiduulipäästöt, sillä näillä on voimakkaasti ilmastoa lämmittävä vaikutus. Metaani on hiilidioksidia 28 kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu, mutta typpioksiduulilla on jopa 265 kertaa voimakkaampi ilmastoa lämmittävä vaikutus kuin hiilidioksidilla (Myhre et al. 2013, 731). Kompostoinnista vapautuvia hiilidioksidipäästöjä ei tässä tarkastelussa huomioida, sillä kompostoinnin raaka-aineena on orgaaninen aines, jolloin vapautuneen hiilidioksidin voidaan katsoa sitoutuvan uudelleen biomassaan (Sanchez et al. 2015, 226).

Kukkuroinmäellä sijaitsevan Kekkilän kompostointilaitoksen suoria päästöjä ei ole tutkittu, joten niitä täytyy arvioida kirjallisuusarvoihin perustuen. Ilmaan vapautuvia suoria päästöjä on täsmällisesti hieman haastava arvioida, sillä eri tutkimuksista voidaan huomata niiden riippuvan voimakkaasti muun muassa käytetystä raaka-aineesta ja sen ominaisuuksista, kypsytysajasta sekä kompostointitekniikasta (Sanchez et al. 2015, 226). Oletetaan nyt raaka-aineiden ominaisuuksiin ja samaan tyypipitoisuuteen perustuen, että biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnista syntyy yhtä suuret metaani ja typpioksiduulipäästöt yhtä raaka-aine tonnia kohden. Kun biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnista ilmaan vapautuvia päästöjä tutkitaan kirjallisuudesta, huomataan niiden vaihtelevan melko laajasti. Boldrin et al. (2009) tutkimukseen on koottu eri lähteissä esitettyjä orgaanisen jätteen kompostoinnista aiheutuvia kaasumaisia päästöjä. Tässä tutkimuksessa esitetään kostean biojätteen suljetun kompostoinnin metaanipäästöiksi 0,02–1,8 kg CH₄/t ja typpioksiduulipäästöiksi 0,01–0,12 kg N₂O/t. (Boldrin et al. 2009, 804.) Myllymaa et al. (2008) tutkimuksessa tunnelikompostoinnin metaanipäästöiksi on määritetty 0,987 kg CH₄/t ja typpioksiduulipäästöiksi 0,051 kg N₂O/t. Tässä tutkimuksessa esitetyt päästöt syötettyä raaka-aine tonnia kohden ovat yhtä suuret biojätteelle sekä puhdistamolietteelle. (Myllymaa et al. 2008, 26.) Virtavuori (2009) tutkimuksessa biojätteen tunnelikompostoinnin ja jälkikypsytyksen metaanipäästöjen on laskettu olevan 0,828 kg CH₄/t ja typpioksiduulipäästöjen 0,053 kg N₂O/t (Virtavuori 2009, 16). Edellä esitettyihin tutkimuksiin perustuen Kekkilän kompostointilaitoksen metaanipäästöiksi voidaan olettaa 0,9 kg CH₄/t ja typpioksiduulipäästöiksi 0,052 kg N₂O/t. Kun

nämä päästöt karakterisoidaan hiilidioksidiekvivalenteiksi aiemmin esitetyillä karakterisointikertoimilla, saadaan kompostoinnin suoriksi päästöiksi 38 980 g CO₂-ekv/t. Näiden päästöjen osalta oletetaan, ettei niitä saada nykyisellä tekniikalla puhdistettua poistokaasusta, eli kaikki kompostissa muodostuneet metaani- ja typpioksiduulipäästöt vapautuisivat ilmaan.

Komposti

Päästöjen lisäksi kompostointilaitoksella muodostuu myös tuotoksia, joita voidaan hyödyntää. Tuotosten hyödyntämisestä aiheutuu päästövähennyksiä, sillä niillä voidaan korvata neitseellisten materiaalien käyttöä. Kompostointilaitoksella vuosittain muodostuvan kompostin määrän on arvioitu olevan keskimäärin 20 000 m³. Muodostuvan kompostin tiheys on noin 600 kg/m³, jolloin koko kompostointilaitoksella muodostuvan kompostin massa olisi 12 000 t/a. Biojätteestä ja puhdistamolietteestä valmista kompostia syntyisi 12 500 m³ eli 7 500 t/a. Valmiista kompostista 75 % hyödynnetään kasvualustuotannon raaka-aineena korvaamaan turvetta ja 25 % hyödynnetään peltolannoitteena korvaamaan teollisia lannoitteita. (Vinokurov 2020.)

Turpeen korvaamisesta saadut päästöhyvitykset lasketaan vältetyn turpeen sekä kompostin tilavuuksien suhteessa 1:1. Biojätteestä ja puhdistamolietteestä valmistetusta kompostista 9 375 m³ hyödynnetään kasvualustuotannon raaka-aineena. Korvattavan jyrshinturpeen tiheydeksi oletetaan 320 kg/m³ (Tilastokeskus 2020), joten vältetyn turpeen määräksi saadaan 3 000 t/a. Turvesuot ovat hiilinieluja, eli niihin sitoutuu ja varastoituu ilmakehästä suuria määriä hiiltä. Kun suolta nostetaan turvetta, sinne varastoitunut hiili vapautuu ilmakehään aiheuttaen ilmaston lämpenemistä. Toisaalta turpeennosto voi vähentää turvesoilta aiheutuvia metaanipäästöjä, sillä sen seurauksena turvesuon hapettomuus vähenee. (Luonnonvarakeskus.) Mahdollista metaanipäästöjen vähenemää ei huomioida nyt laskennassa.

Turpeennoston päästöille ei löydy GaBi prosessia, joten niitä täytyy arvioida kirjallisuusarvoihin perustuen. Väisänen et al. (2013) tutkimuksessa turvetuotannon päästöiksi on määritetty 14,4 g CO₂-ekv/MJ. Tämä sisältää turpeennostosta sekä työkoneiden käytöstä aiheutuvat hiilidioksidi-, typpioksiduuli- sekä metaanipäästöt. (Väisänen et al. 2013, 763–764, 771.) Jyrshinturpeen lämpöarvoksi oletetaan 10,1 MJ/kg (Tilastokeskus 2020), joten nostettua turvetonnia kohden turvetuotannon päästöiksi saadaan 145 440 g CO₂-ekv/t.

Kompostilla voidaan korvata myös teollisten typpi- ja fosforilannoitteiden käyttöä. Teollisten lannoitteiden korvaamisesta saadut päästöhyvitykset lasketaan vältetyn lannoitteen ravinteiden sekä kompostin sisältämien kasveille käyttökelpoisten ravinteiden mukaan. Lasketaan hyvitykset erikseen typpi- ja fosforilannoitteille. Biojätteen fosforipitoisuuden on arvioitu olevan 3 kg/t ja typpipitoisuuden 8 kg/t, kun taas puhdistamolietteen fosforipitoisuuden on arvioitu olevan 4,6 kg/t ja typpipitoisuuden 8 kg/t (Etelä-Karjana Jätehuolto Oy 2017, 8). Biojätteestä ja puhdistamolietteestä valmistetusta kompostista 3 125 m³ eli 1 875 t/a hyödynnetään lannoitteena. Kompostoinnin aikana fosforiravinteita ei häviä, eli raaka-aineen sisältämä fosfori siirtyy kokonaisuudessaan kompostiin. Tässä tapauksessa fosforin määrä biojätteen ja puhdistamolietteen kompostissa olisi 82 t. Koska kompostista vain 25 % hyödynnetään lannoitteena, tässä osassa kompostia fosforia olisi 21 t. Kaikki kompostin sisältämä fosfori ei kuitenkaan ole kasveille käyttökelpoisessa muodossa. Koska nyt kyseessä on puhdistamoliete pohjainen komposti, oletetaan 40 % kompostin sisältämästä fosforista olevan kasveille käyttökelpoisessa muodossa, jolloin lannoitteena hyödynnettävän fosforin määrä olisi 8 t. Lasketaan fosforilannoitteen korvaamisesta saatavat hyvitykset GaBi prosessin Triple superphosphate (TSP, 46 % P₂O₅) avulla. Tässä prosessissa fosforilannoitteen fosforipitoisuus on 46 % ja se sisältää fosforilannoitteen valmistuksen päästöt kehdoista portille (GaBi 9.1). Oletetaan kaiken lannoitteen sisältämän fosforin olevan kasveille käyttökelpoisessa muodossa, jolloin kompostilla voidaan korvata 18 t fosforilannoitetta vuodessa.

Toisin kuin fosforin osalta, kompostoinnissa poistuu osa raaka-aineen sisältämästä typestä. Osa typestä poistuu prosessista kompostoinnin aikana typpenä, ammoniakkinä ja typpioksiduulina. Ammoniakkia saadaan otettua happopesureissa talteen, mutta sitä hyödynnetään muissa toiminnoissa, eikä sitä enää palauteta kompostointiprosessiin. Jätevesien mukana ei aiheudu typpiä poistumaa, sillä muodostuvat jätevedet kierrätetään prosessissa. Kompostoinnin typpihäviöt ovat riippuvaisia kompostointimenetelmästä, raaka-aineesta, tukiaineesta sekä kompostoinnin kestosta. Zhao et al. (2020) tutkimuksessa on analysoitu eri selvityksissä esitettyjä kompostoinnin typpihäviöitä. Yhdyskuntalietteen typpihäviöksi arvioitiin noin 26 % kun taas keittiöjätteen typpihäviöksi arvioitiin 34 %. (Zhao et al. 2020, 2, 4.) Tähän tutkimustietoon perustuen oletetaan Kekkilän kompostointilaitoksella aiheutuvaksi typpihäviöiden määräksi 30 % raaka-aineen sisältämästä kokonaistypestä. Oletetaan, ettei tukiaineen käyttö aiheuta muutoksia typen määrään. Tässä tapauksessa typen määrä

biojätteen ja puhdistamolietteen kompostissa olisi 112 t. Koska kompostista 25 % hyödynnetään lannoitteena, tässä osassa kompostia tyypeä olisi 28 t. Kuten kompostin fosforin osalta, myöskään kaikki kompostin tyyppi ei ole kasveille heti käyttökelpoisessa epäorgaanisessa muodossa. Kasvit voivat suoraan hyödyntää liukoisessa muodossa olevaa tyypeä, joka on pääasiassa ammonium tai nitraattityyppiä. Halinen et al. (2006) julkaisussa biojätteen ja puhdistamolietteen kompostissa liukoisen typen osuudeksi kokonaistypestä oli määritetty 6–13 % (Halinen et al. 2016, 43–44). Tämän lisäksi Pakarinen et al. (2015) tutkimuksessa biojätekompostin liukoisen ja nitraattitypen osuudeksi kokonaistypestä oli määritetty 10 %. Biojätteen ja puhdistamolietteen mädätysjäännöksessä liukoista tyypeä määritettiin olevan 15 % kokonaistypestä. (Pakarinen et al. 2015, 1.) Vaikka kompostin sisältämä orgaaninen tyyppi ei ole sellaisenaan kasveille käyttökelpoisessa muodossa, on osan siitä kuitenkin todettu mineralisoituvan maassa suhteellisen nopeasti. Helposti mineralisoituvan typen määräksi voidaan olettaa noin 7 % kompostin kokonaistypestä. (Rigby et al. 2016, 1322.) Näihin arvioihin perustuen oletetaan, että 20 % kompostin sisältämästä typestä on kasveille käyttökelpoisessa muodossa. Näillä oletuksilla kasveille käyttökelpoisen typen määrä lannoitteena hyödynnettävässä kompostissa olisi 6 t. Lasketaan typpilannoitteen korvaamisesta saatavat hyvitykset GaBi prosessin Ammonium nitrate (AN, 35,5 % N) avulla Tässä prosessissa ammoniumnitraattilannoitteen typpipitoisuus on 33,5 % ja se sisältää typpihaposta valmistetun ammoniumnitraattilannoitteen päästöt kehdestä portille (GaBi 9.1). Oletetaan kaiken lannoitteen sisältämän typen olevan kasveille käyttökelpoisessa muodossa, jolloin kompostilla voidaan korvata 17 t typpilannoitetta vuodessa. Typpilannoitteen päästöhyvitysten osalta huomioidaan teollisen lannoitteen valmistuksen päästöt. Laskennassa ei huomioida typpilannoitteen hajoamisesta syntyneitä typpioksiduulipäästöjä, sillä oletetaan niitä muodostuvan yhtä paljon riippumatta siitä, tuleeko tyyppi maaperään kompostista vai teollisista lannoitteista.

Pesurivesi

Kompostointiprosessissa muodostuu kompostin lisäksi tuotoksena myös ammoniumsulfaattinestettä ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), jota hyödynnetään UPM Kaukaalla vedenpuhdistamon typpiravinteena. Ammoniumsulfaattinestettä muodostuu happopesureissa, joissa poistokaasuista poistetaan ammoniakkia rikkihapon avulla. UPM Kaukas on ilmoittanut pystyvänsä korvaamaan Kekkilän kompostointilaitoksen pesurivedellä 54 tonnia tyyppiä vuodessa, joka on

aikaisemmin hankittu ureasta (UPM 2019). Tästä pesuriveden tyypestä 34 t allokoituu biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnille. Urean valmistuksen päästöt määritetään GaBi prosessin EU-28: Urea (46 % N) avulla, joka sisältää rakeistetun urean valmistuksen päästöt kehdosta portille (GaBi 9.1). Oletetaan, että Kekkilän kompostointilaitoksen pesurivedellä voidaan korvata vedenpuhdistamolla ureaa, jonka typpipitoisuus on 46 %. Tällöin biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnin seurauksena syntyvällä ammoniumsulfaattinesteellä voidaan korvata neitseellisen urean käyttöä 73 t/a. Seuraavassa taulukossa 4 on esitetty kompostointiprosessin inventaariodata kokonaisuudessaan. Taulukosta käy ilmi koko kompostointilaitoksella kulutettujen syötteiden, tuotettujen tuotosten sekä vältettyjen aineiden määrät. Näiden lisäksi edellä mainitut määrät on allokoitu pelkästään biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnille.

Taulukko 4. Kompostointiprosessin inventaariodata, joka sisältää koko kompostointilaitokselle tulevien syötteiden, tuotosten sekä vältettyjen aineiden määrät. Lisäksi allokoitu massaperusteisesti biojätteen sekä puhdistamolietteen kompostointiin kuuluvien syötteiden, tuotosten sekä vältettyjen aineiden määrät.

Syöte	Koko Kekkilän kompostointilaitos	Biojätteen ja puhdistamolietteen kompostointi	Yksikkö	Lähde
Raaka-aine	32 000	20 000	t	Primääridata; Vinokurov 2020
Biojäte	6 300	6 300	t	Primääridata; Vinokurov 2020
Puhdistamoliete	13 700	13 700	t	Primääridata; Vinokurov 2020
Sähkö	1 000	625	MWh	Primääridata; Vinokurov 2020
Tasauspätkä	1 500	938	t	Primääridata; Vinokurov 2020
Rikkihappo	216	135	t	Primääridata; Vinokurov 2020
Kantomurske	169	106	m ³	Primääridata; Vinokurov 2020
Diesel	55 000	34 400	l	Primääridata; Vinokurov 2020
Tuotos				
CH ₄ päästöt	0,9	0,9	kg CH ₄ /t	Sekundääridata; Boldrin et al. 2009 Myllymaa et al. 2008 Virtavuori 2009
N ₂ O päästöt	0,052	0,052	kg N ₂ O/t	Sekundääridata; Boldrin et al. 2009 Myllymaa et al. 2008 Virtavuori 2009
Komposti	20 000	12 500	m ³	Primääridata; Vinokurov 2020
Pesurivesi	2 000	1 250	m ³	Primääridata; Vinokurov 2020
Hyvitys				
Vältetty turve		3 000	t	Laskettu
Vältetty fosforilannoite		18	t	Laskettu
Vältetty typpilannoite		17	t	Laskettu
Vältetty urea		73	t	Laskettu

Seuraavassa taulukossa 5 on esitetty kompostointilaitoksen apusyötteiden kuljetustietoja. Taulukosta käy ilmi kunkin käytetyn apusyötteen kuljetukseen käytetty ajoneuvotyyppi, sille oletettu päästökerroin sekä polttoaineenkulutus. Kaikkien apusyötteiden osalta edestakaisen kuljetuksen osakuormaksi oletettiin 50 %, päästökerroin sekä polttoaineenkulutus on laskettu tämän osakuorman mukaan.

Taulukko 5. Kompostointiprosessin apusyötteiden kuljetustiedot, josta käy ilmi apusyötteiden kuljetukseen käytetty ajoneuvotyyppejä sekä 50 % osakuormalla laskettu päästökerroin ja polttoaineenkulutus.

Syöte	Kuljetus	Päästökerroin [g CO ₂ -ekv/km]	Polttoaineenkulutus [l/100 km]
Tukiaine	Täysperävaunun yhdistelmä (Kantavuus 50 t, osakuorma 50 %)	1 138	48,0
Rikkihappo	Säiliöauto (Kantavuus 18 t, osakuorma 50 %)	627	26,4
Kantomurske	Täysperävaunun yhdistelmä (Kantavuus 38 t, osakuorma 50 %)	937	41,2

4.4.2 Mädätysprosessi

Biokaasulaitoksen osalta tarkasteltavat osaprosessit ovat kuvan 4 mukaisesti sähköntuotanto, rikkihapon valmistus ja kuljetus, lipeän valmistus ja kuljetus, aktiivihillen valmistus ja kuljetus, työkoneissa käytettävän dieselin valmistus ja poltto, mädätteiden kuljetus käsittelyyn ja käsittely sekä biometaanin kuljetus jakeluasemille. Tässä käsittelymenetelmässä kovin tarkkaa primääridataa ei ole saatavilla, sillä laitos on uusi, eikä vielä normaalissa toiminnassa. Inventaariodatan keräämisen tuloksena saatiin arviot biokaasulaitoksen materiaali- ja energiavirroista. Annetut arviot vaihtelivat laajalla välillä, laskennassa käytetyt arvot ovat oletuksia annetun vaihteluvälin sisältä.

Sähkö

Biokaasulaitoksella sähköä kulutetaan noin 1 500 MWh/a. Laitoksella sähkön kulutusta aiheuttaa muun muassa syötteiden esikäsittely, nesteenerotukset, kaasujen komprimointi sekä pumppujen, puhaltimien, kuljettimien sekä sekoittimien käyttö. Biokaasulaitoksella kulutettu sähkö on kompostointilaitoksen tapaan tavallista verkkosähköä. (Lohilahti 2020.) Sähköntuotannon ympäristövaikutukset määritetään GaBista löytyvän sähköntuotantoprosessin FI: Electricity grid mix avulla, jossa huomioidaan Suomessa kulutetun sähkön valmistuksesta aiheutuvat päästöt. Tämä prosessi on yhdistelmä Suomessa sekä naapurimaissa tuotettua sähköä, joka on peräisin eri lähteistä. Tässä datassa neljäsosa on tuontisähköä ja loput

kotimaista sähköä. Tämän prosessin sähköstä kolmasosa on tuotettu ydinvoimalla. Data sisältää sähköntuotantoon käytettyjen raaka-aineiden hankinnan, kuljetuksen, itse sähköntuotannon sekä sähkön jakelu-/siirtohäviöt. (GaBi 9.1.)

Rikkihappo

Biokaasulaitoksella poistokaasun puhdistukseen käytetään väkevää rikkihappoa (98 %) (Oksman-Takalo 2020), jonka avulla poistokaasusta poistetaan ammoniakkia ja ammoniumyhdisteitä. Rikkihapon valmistuksen päästöt määritetään GaBi prosessin EU-28: Sulphuric acid (96 %) avulla, joka sisältää rikkihapon valmistuksen päästöt kehdesta portille. (GaBi 9.1.)

Oletetaan, että biokaasulaitoksella rikkihappoa kulutetaan 3,6 t/a, jonne sitä tuodaan 1 m³ IBC konteissa kolme kertaa vuodessa (Lohilahti 2020). Oletetaan biokaasulaitoksella käytetyn rikkihapon valmistajaksi Boliden Harjavalta Oy, jolloin yhdensuuntaiseksi kuljetusmatkaksi tulisi 390 km. Näillä oletuksilla edestakaisia ajokilometrejä kertyy vuodessa noin 2 330 km. Oletetaan, että rikkihappoa sisältävä IBC kontti kuljetetaan Kukkuroinmäelle kapasiteetiltaan 9 tonnin jakelukuorma-autolla. Arvioidaan sen kuljetuksen päästöjä Lipastotietokannan tietojen avulla, jossa on esitetty päästökertoimia ja polttoainekulutuksia tälle ajoneuvotyypille (VTT 2017h). Kuljetuksen päästöissä huomioidaan rikkihapon kuljetus Kukkuroinmäelle, sekä jakelukuorma-auton paluu lähtöpaikkaan. Oletetaan jakelukuorma-auton olevan täynnä tavaraa sen ajaessa Kukkuroinmäelle, mutta oletetaan sen palaavan tyhjänä takaisin. Tällöin Kukkuroinmäelle kuljetettavalle IBC kontille allokoituu 6,7 % koko edestakaisen kuljetuksen päästöistä. Tällöin kyseisen jakelukuorma-auton päästökertoimeksi maantieajossa saadaan 378 g CO₂ ekv/km ja dieselin kulutukseksi 15,8 l/100 km, jolloin rikkihapon kuljetukseen kuluu dieseliä vuodessa noin 370 litraa. Dieselin valmistuksen päästöt mallinnetaan GaBista löytyvän prosessin EU-28: Diesel mix at filling station avulla. Tämä prosessi huomioi raakaöljystä sekä biokomponenteista valmistetun dieselin päästöt, bioperäisen dieselin osuudeksi on määritetty 6,41 %. Tämä prosessi ottaa huomioon dieselin valmistuksen päästöt aina raaka-aineiden hankinnasta ja kuljetuksesta siihen, kun valmis diesel kuljetetaan tankkausasemille. (GaBi 9.1.)

Tämä on karkea oletus rikkihapon kuljetuksen päästöistä, sillä tarkempaa tietoa ei ole saatavilla. Rikkihapon kuljetuksen osalta on perusteltua arvioida siitä aiheutuvia päästöjä melko karkeasti, sillä kulutettu rikkihapon määrä on niin pieni, ettei sen kuljetuksesta oleteta aiheutuva kokonaisuuden kannalta merkityksellisiä päästöjä.

Lipeä

Biokaasulaitoksella biokaasun sekä poistokaasun puhdistukseen käytetään myös 50 prosentista lipeää eli natriumhydroksidia (NaOH), joka on vahva emäs (Oksman-Takalo 2020). Lipeää lisätään kemialliseen emäspesuriin, jonka avulla kaasuista saadaan poistettua happamat yhdisteet, kuten rikkivety sekä merkaptaanit (Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy 2019a, 7). Lipeän valmistuksen päästöt määritetään GaBi prosessin EU-28: Sodium hydroxide mix (50 %) avulla, joka sisältää lipeän valmistuksen päästöt kehdosta portille. Prosessi on sekoitus Euroopassa käytetyistä kolmesta eri lipeän valmistusmenetelmästä. (GaBi 9.1.)

Oletetaan, että biokaasulaitoksella lipeää kulutetaan 4,2 t/a, jonne sitä tuodaan 1 m³ IBC konteissa kolme kertaa vuodessa (Lohilahti 2020). Oletetaan biokaasulaitoksella käytetyn lipeän valmistajaksi Joutsenon Kemira Chemicals Oy, jolloin yhdensuuntaiseksi kuljetusmatkaksi tulisi 23 km. Näillä oletuksilla edestakaisia ajokilometrejä kertyy vuodessa noin 140 km. Oletetaan, että lipeää sisältävä IBC kontti kuljetetaan Kukkuroinmäelle kapasiteetiltaan 9 tonnin jakelukuorma-autolla. Arvioidaan lipeän kuljetuksen päästöjä Lipasto-tietokannan tietojen avulla, jossa on esitetty päästökertoimia ja polttoaineenkulutuksia tälle ajoneuvotyypille (VTT 2017h). Kuljetuksen päästöissä huomioidaan lipeän kuljetus Kukkuroinmäelle, sekä jakelukuorma-auton paluu lähtöpaikkaan. Oletetaan jakelukuorma-auton olevan täynnä tavaraa sen ajaessa Kukkuroinmäelle, mutta oletetaan sen palaavan tyhjänä takaisin. Tällöin Kukkuroinmäelle kuljetettavalle IBC kontille allokoituu 7,8 % koko edestakaisen kuljetuksen päästöistä. Tällöin kyseisen jakelukuorma-auton päästökertoimeksi maantieajossa saadaan 379 g CO₂ ekv/km ja dieselin kulutukseksi 15,8 l/100 km, jolloin lipeän kuljetukseen kuluu dieseliä vuodessa 22 litraa. Dieselin valmistuksen päästöt mallinetaan GaBista löytyvän prosessin EU-28: Diesel mix at filling station avulla.

Tämä on karkea oletus lipeän kuljetuksen päästöistä, sillä tarkempaa tietoa ei ole saatavilla. Lipeän kuljetuksen osalta on perusteltua arvioida siitä aiheutuvia päästöjä melko karkeasti,

sillä kulutettu lipeän määrä on niin pieni, ettei sen kuljetuksesta oleteta aiheutuva kokonaisuuden kannalta merkityksellisiä päästöjä.

Aktiivihiili

Aktiivihiiltä käytetään biokaasun sekä poistokaasun puhdistuksen viimeisessä vaiheessa happo- ja emäspesureiden jälkeen, sen tarkoituksena on poistaa muun muassa VOC-yhdisteet ja rikkivetyjämmät (Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy 2019a, 8–9). Aktiivihiilen valmistuksen päästöille ei löydy GaBi prosessia, joten niitä täytyy arvioida kirjallisuusarvoihin perustuen. Aktiivihiiltä voidaan valmistaa tarpeeksi hiiltä sisältävästä raaka-aineesta, esimerkiksi turpeesta, puumateriaaleista tai kivihiilestä. Aktiivihiilen valmistuksesta aiheutuvat päästöt riippuvat siten muun muassa käytetystä raaka-aineesta. Ecoinventin datasetistä löytyy aktiivihiilen tuotannon päästöt, joksi oli esitetty 7 769 g CO₂-ekv tuotettua aktiivihiilikiloa kohden. Tässä datassa aktiivihiili valmistetaan kivihiilestä ja siinä on hyödynnetty eurooppalaisia tietoja. (Ecoinvent 3.3.)

Gu et al. (2018) selvityksessä tutkittiin puuperäisestä raaka-aineesta valmistetun aktiivihiilen päästöjä. Tässä tutkimuksessa biohiilestä valmistetun aktiivihiilen päästöiksi esitettiin 8 600 g CO₂-ekv/kg. Tämä arvo pitää sisällään aktiivihiilen valmistuksen päästöt kehdosta portille, eli aina raaka-aineiden hankinnasta valmiiseen aktiivihiileen asti. Tässä tutkimuksessa esitettiin kivihiilestä valmistetun aktiivihiilen päästöiksi 18 280 g CO₂-ekv/kg. (Gu et al. 2018.) Tämä päästökerroin eroaa merkittävästi Ecoinventin datasetin vastaavasta. Oletetaan nyt Kukkuroinmäen biokaasulaitoksella käytettävän turpeesta valmistettua aktiivihiiltä. Koska turpeesta tuotetun aktiivihiilen valmistuksen päästöille ei löytynyt olemassa olevia elinkaariarvioiteja, arvioidaan Kukkuroinmäellä käytetyn aktiivihiilen päästöjä edellä esitettyjen tietojen perusteella. Oletetaan nyt aktiivihiilen valmistuksen päästöiksi 8 600 g CO₂-ekv/kg.

Oletetaan, että biokaasulaitoksella aktiivihiiltä kulutetaan 12 t/a, jonne sitä tuodaan 750 kg suursäkeissä neljä kertaa vuodessa (Lohilahti 2020). Oletetaan biokaasulaitoksella käytetyn aktiivihiilen valmistajaksi Vapo, jolloin turpeesta valmistettu aktiivihiili kuljetettaisiin Vapon aktiivihiilitehtaan valmistuttua Ilomantsista, jolloin yhdensuuntaiseksi kuljetusmatkaksi tulisi 260 km. Näillä oletuksilla edestakaisia ajokilometrejä kertyy vuodessa noin 2 100 km. Oletetaan, että aktiivihiiltä sisältävät suursäkit kuljetetaan Kukkuroinmäelle kapasiteetiltaan

9 tonnin jakelukuorma-autolla. Arvioidaan aktiivihiihen kuljetuksen päästöjä Lipasto-tietokannan tietojen avulla, jossa on esitetty päästökertoimia ja polttoaineenkulutuksia kapasiteetiltaan tälle ajoneuvotyypille (VTT 2017h). Kuljetuksen päästöissä huomioidaan neljän suursäkin kuljetus Kukkuroinmäelle, sekä jakelukuorma-auton paluu lähtöpaikkaan. Oletetaan jakelukuorma-auton olevan täynnä tavaraa sen ajaessa Kukkuroinmäelle, mutta oletetaan sen palaavan tyhjänä takaisin. Tällöin Kukkuroinmäelle kuljetettaville suursäkeille allokoituu 16,7 % koko edestakaisen kuljetuksen päästöistä. Tällöin kyseisen jakelukuorma-auton päästökertoimeksi maantieajossa saadaan 385 g CO₂-ekv/km ja dieselin kulutukseksi 16,1 l/100 km, jolloin aktiivihiihen kuljetukseen kuluu dieseliä vuodessa noin 340 litraa. Dieselin valmistuksen päästöt mallinnetaan GaBista löytyvän prosessin EU-28: Diesel mix at filling station avulla.

Tämä on karkea oletus aktiivihiihen kuljetuksen päästöistä, sillä tarkempaa tietoa ei ole saatavilla. Aktiivihiihen kuljetuksen osalta on perusteltua arvioida siitä aiheutuvia päästöjä melko karkeasti, sillä kulutettu aktiivihiihen määrä on niin pieni, ettei sen kuljetuksesta oleteta aiheutuva kokonaisuuden kannalta merkityksellisiä päästöjä.

Työkoneet

Biokaasulaitoksella käytetään työkoneena dieselkäyttöistä pyöräkuormaajaa. Pyöräkuormaajan käyttö on melko vähäistä verrattuna kompostointilaitokseen, sillä biokaasulaitoksella raaka-aineiden siirtely tapahtuu pyöräkuormaajan sijasta kahmarilla ja kuljettimilla, jotka kuluttavat sähköä. Myöskään lopputuotteiden siirtelyyn ei tarvita pyöräkuormaajaa, sillä biokaasulaitoksella nesteenerotuksen jälkeen syntynyt mädäte siirtyy suoraan lavoille, jotka tyhjennetään kompostointilaitokselle ja jälkikypsytyksentälle kuorma-autolla. Biokaasulaitoksella pyöräkuormaajaa käytetään pääasiassa tukiaineen siirtoon. (Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy 2019a.) Tukiaineen siirtelyyn käytetyn pyöräkuormaajan polttoaineenkulutuksesta ei osattu antaa minkäänlaista arviota, joten tehdään siitä karkea oletus Kekkilän kompostointilaitoksen tietoihin perustuen. Kompostointilaitoksella pyöräkuormaajaa käytetään raaka-aineiden ja tukiaineen siirtelyyn sekä aumojen kääntelyyn. Yhteensä kompostointilaitoksella raaka-ainetta ja tukiainetta kulutetaan 33 500 t/a, kaikkien työkoneiden polttoaineenkulutuksen ollessa 55 000 litraa. Tällöin työkoneiden dieselinkulutukseksi voidaan karkeasti olettaa 1,6 litraa dieseliä yhtä syötetonna kohden. Kun biokaasulaitoksella tukiainetta

käytetään 2 100 t/a, oletetaan karkeasti biokaasulaitoksella käytetyn pyöräkuormaajan dieselinkulutukseksi 3 360 l/a. Pyöräkuormaajan käytön päästöille ei löydy GaBi prosessi, joten työkoneiden käytön päästöjä arvioidaan Lipasto-tietokannan tietojen avulla, jossa päästökertoimeksi on esitetty 2 673 g CO₂-ekv/l (VTT 2017k). Dieselin valmistuksen päästöt mallinetaan GaBista löytyvän prosessin EU-28: Diesel mix at refinery avulla. Tämä prosessi huomioi raakaöljystä sekä biokomponenteista valmistetun dieselin päästöt, bioperäisen dieselin osuudeksi on määritetty 6,41 %. Tämä prosessi ottaa huomioon dieselin valmistuksen päästöt aina raaka-aineiden hankinnasta ja kuljetuksesta jalostukseen. (GaBi 9.1.)

Mädätteiden kuljetus käsittelyyn ja käsittely

Biokaasulaitoksen biojätelinjalla ja puhdistamolietelinjalla syntyvät mädätteet kerätään suoraan kahdelle erilliselle lavalle, jolla ne kuljetetaan käsittelyyn. Biojätteen mädätettä sisältävä lava kuljetetaan kompostointilaitokselle ja mädäte käsitellään tunnelikompostissa. Puhdistamolietteen mädätettä sisältävä lava kuljetetaan kentälle ja mädäte jälkikypsytetään. Kumpikin lava tyhjenetään kerran päivässä viisi kertaa viikossa, lavat tyhjenetään erikseen. Oletetaan, että molemmat lavat tyhjenetään biokaasulaitoksesta keskimäärin 250 metrin päähän ja kuljetus tapahtuu kuorma-autolla. Koska lavat tyhjenetään erikseen, kertyy edestakaisia kuljetusmatkoja yhteensä 260 km/a. Biojätteen mädätettä arvioidaan syntyvän 4 000 t/a, jolloin yhden lavan massa olisi 15 t. Puhdistamolietteen mädätettä arvioidaan syntyvän 5 500 t/a, jolloin yhden lavan massa olisi 21 t. (Oksman-Takalo 2020.) Oletetaan, että lavat kuljetetaan kuorma-autolla, jonka kapasiteetti on 21 tonnia. Puhdistamolietteen mädäte kuljetettaisiin täydellä kuormalla, jolloin edestakaisen ajosuoritteen osakuormaksi tulisi 50 %. Biojätteen mädäte kuljettaisiin 71 % osakuormalla, jolloin edestakaisen ajosuoritteen osakuormaksi tulisi 36 %. Mädätteiden kuljetuksen päästöjä arvioidaan Lipasto-tietokannan tietojen avulla, jossa on esitetty päästökertoimia ja polttoaineenkulutuksia kapasiteetiltaan 9 tonnin suurelle jakelukuorma-autolle sekä 25 tonnin puoliperävaunuyhdistelmälle. Näiden ajoneuvojen tietojen perusteella saadaan laskettua mädätteiden kuljettamiseen käytettävälle kuorma-autolle päästökerroin sekä polttoaineenkulutus. Biojätteen mädätteen kuljetukselle päästökerroin olisi 36 % osakuormalla 662 g CO₂-ekv/km ja dieselin kulutus 27,9 l/100 km, jolloin sen kuljetus kuluttaa dieseliä vuodessa 36 litraa. Puhdistamolietteen mädätteen kuljetukselle päästökerroin olisi 50 % osakuormalla 699 g CO₂-ekv/km ja dieselin kulutus 29,5 l/100 km, jolloin sen kuljetus kuluttaa dieseliä vuodessa noin 38 litraa. (VTT 2017g, VTT

2017h.) Dieselin valmistuksen päästöt mallinnetaan GaBista löytyvän prosessin EU-28: Diesel mix at filling station avulla.

Biojätteen mädäte kuljetetaan kompostointilaitokseen käsittelyä varten. Oletetaan, että biojätteen mädätteen kompostointi kuluttaa suhteessa yhtä paljon resursseja syötettyä raaka-ainetta kohti kuin käsittelemättömän raaka-aineen kompostointi. Tällä perusteella myös biojätteen mädätteen kompostoinnin päästöt voidaan olettaa yhtä suuriksi syötettyä raaka-ainetta kohti kuin käsittelemättömän syötteen kompostoinnin päästöt. Biojätteen mädätteen kompostoinnin päästöt saadaan määritettyä kompostointiprosessin tulosten perusteella, jotka tullaan esittämään myöhemmin.

Puhdistamolietteen mädäte kuljetetaan kompostointilaitoksen viereiselle kentälle jälkikypsytystä varten. Jälkikypsytyksessä mädäte kootaan aumoihin, joita ei juurikaan kypsytyksen aikana tarvitse käsitellä. Koska puhdistamolietteen mädätteen siirtely on vähäistä, oletetaan ettei työkoneiden käytöstä aiheudu tässä merkittäviä päästöjä. Jälkikypsytyksen osalta oletetaan myös, ettei sen aikana vapaudu juurikaan typpipäästöjä ilmaan, joten jälkikypsytyksestä ei oleteta aiheutuvan merkittäviä päästöjä, jotka kannattaisi sisällyttää laskentaan.

Biometaanin kuljetus

Jalostuksen jälkeen biometaani paineistetaan ja siirretään neljään kaasun kuljetuskonttiin. Näissä kaasun kuljetuskonteissa biometaani kuljetetaan neljälle tankkausasemalle, jotka sijaitsevat Lappeenannassa, Imatralla, Parikkalassa sekä Luumäellä. Yhden kontin kapasiteetti on noin 2 400 kg paineistettua kaasua. (Oksman-Takalo 2020.) Jos kaasu puristetaan 200 bar paineeseen, yhteen konttiin saadaan 13,2 m³ biometaania, joka vastaa 2 640 m³ biometaania normaalioloissa (UMOE Advanced Composites). Jalostuksen jälkeen biometaania jäisi hyödynnettäväksi 1 170 000 m³/a, joka jaettaisiin viidelle tankkausasemalle. Edellä mainittujen neljän tankkausaseman lisäksi biometaania syötetään myös Kukkuroinmäellä sijaitsevaan tankkausasemaan, johon sitä ei tarvitse konteilla kuljettaa.

Jos kaikki tuotettu biometaani pakattaisiin kontteihin, täysiä kontteja kertyisi vuodessa 443 kappaletta. Oletetaan, että konteista 360 kappaletta kuljetetaan Lappeenrannan, Imatran, Parikkalan sekä Luumäen tankkausasemille, 90 konttia kuhunkin. Tällöin normaalioloista

biometaania kuljetettaisiin konteissa noin 950 000 m³/a. Kukkuroinmäelle biometaania jäisi 83 kontillisen verran eli noin 220 000 m³/a. Oletetaan kontteja kuljetettavan aina kaksi kerrallaan, eli jokaiselle neljälle tankkausasemalle 45 kertaa vuodessa, jolloin kuljetuksen kuormapaino olisi 4,8 tonnia. Tällöin edestakaisia ajokilometrejä kertyisi yhteensä vuodessa noin 18 800 km. Oletetaan kuljetuksen tapahtuvan samanlaisella ajoneuvolla, kuin mädätteiden kuljetus käsittelyyn, eli kapasiteetiltaan 21 tonnin kuorma-autolla. Biometaanin edestakaisen ajosuorituksen osakuorma olisi tällöin 11,4 %. Tällä osakuormalla kuljetuksen päästökerroin olisi 596 g CO₂-ekv/km ja dieselin kulutus 25,1 l/100 km, jolloin biometaanin kuljetus kulluttaa dieseliä vuodessa noin 4 720 litraa. Dieselin valmistuksen päästöt mallinnetaan Gabista löytyvän prosessin EU-28: Diesel mix at filling station avulla.

Suorat päästöt

Mädätysprosessissa suoria päästöjä aiheutuu biokaasun jalostuksen aikaisista metaanihäviöistä. Aiheutuneet metaanihäviöt ovat voimakkaasti riippuvaisia käytetystä jalostustekniikasta, Kukkuroinmäen biokaasulaitoksessa biokaasu jalostetaan biometaaniksi kalvojalostuksella. Sun et al. (2015) selvityksessä todetaan kalvojalostuksen metaanihäviöiden vaihtelevan laajasti välillä 0,5–20 vol-%. Koska kalvojalostuksen metaanihäviöt vaihtelevat näin laajasti, on niiden tarkka määrittäminen kirjallisuusarvoihin perustuen haastavaa ja aiheuttaa huomattavaa epävarmuutta. Kukkuroinmäen biokaasulaitoksen jalostuksen aikaisiksi metaanihäviöiksi oletetaan 2,5 vol-%. Biokaasulaitoksella syntyvän biokaasun määräksi on arvioitu 2 000 000 m³/a ja metaanipitoisuudeksi 60 %, jolloin biometaania syntyisi 1 200 000 m³/a. (Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy 2019a.) Näillä oletuksilla metaanihäviötä aiheutuisi jalostuksen seurauksena 30 000 m³/a. Metaanin tiheyden ollessa 0,72 kg/m³ metaanihäviöiden määrä olisi 21 600 kg CH₄/a. Kun biokaasulaitoksella käsitellään vuodessa yhteensä 20 000 tonnia biojätettä sekä puhdistamolietettä, suoriksi metaanipäästöiksi saadaan 1,08 kg CH₄/t. Kun tämä karakterisoidaan hiilidioksidiekvivalenteiksi, saadaan biokaasulaitoksen suoriksi päästöiksi 30 240 g CO₂-ekv/t. Bernstad et al. (2012) tutkimuksessa on esitetty olemassa oleviin tutkimuksiin pohjautuen biokaasulaitoksen metaanipäästöjä, joiden arvioitiin vaihtelevan välillä 0,5–1,2 kg CH₄/t (Bernstad et al 2012, 2444). Kukkuroinmäen biokaasulaitokselle arvioitu metaanipäästö osuu hyvin tälle vaihteluvälille.

Biometaan

Kuten aiemmin mainittiin, jalostuksessa aiheutuneiden metaanihäviöiden jälkeen biometaan

nia jää hyödynnettäväksi 1 170 000 m³/a. Biometaanin lämpöarvoksi oletetaan 36 MJ/m³ (Tilastokeskus 2020), jolloin tämän biometaanimäärän energiasisältö olisi noin 11 700 MWh. Tuotettu biometaan

siirretään tankkausasemille ja hyödynnetään kokonaisuudessaan liikennepolttoaineena. Tuotetulla biometaanilla korvataan dieselin sekä bensiinin käyttöä polttoaineiden energiasisältöjen suhteessa 1:1. Oletetaan, että dieselillä toimivia jäteautoja sekä muuta dieselkäyttöistä raskaampaa kalustoa korvataan kaasukäyttöisillä ajoneuvoilla, jolloin biometaanin hyödyntämisellä tullaan välttämään dieselin käyttöä näissä raskaimmissa ajoneuvoissa. Bensiinin käyttöä vältettäisiin kaasukäyttöisissä henkilöautoissa, joissa voidaan käyttää polttoaineena maakaasua, biometaan

ia tai bensiiniä. Oletetaan, että uusien tankkausasemien myötä kaasukäyttöisten ajoneuvojen määrä lisääntyy ja olemassa olevilla kaasuautoilla kaasulla tehtyjen ajosuoritteiden määrä kasvaa. Etelä-Karjalan Jätehuollolla on kaksi vaihtoehtoista skenaariota biometaanin hyödyntämiselle. Ensimmäisessä skenaariossa tuotettu biometaan

hyödynnettäisiin ensisijaisesti Etelä-Karjalan Jätehuollon omissa toiminnoissa Lappeenrannan sekä Imatran alueiden kuiva- ja biojätteiden keräyksessä. Tästä ylijäänyt biometaan

hyödynnetään muissa ajoneuvoissa. Toisessa skenaariossa tuotettu biometaan

hyödynnettäisiin ensisijaisesti koko Etelä-Karjalan Jätehuollon toimialueen kuiva- ja biojätteiden keräyksessä. Tästä ylijäänyt biometaan

hyödynnetään ensimmäisen skenaarion tapaan muissa ajoneuvoissa. Tarkastellaan seuraavaksi biometaanin hyödyntämistä näissä molemmissa skenaarioissa.

Skenaario 1

Vuonna 2019 Lappeenrannan ja Imatran kuiva- ja biojätteiden keräyksestä ajokilometrejä aiheutui 331 500 km, tämä ajosuoritus kulutti dieseliä 188 200 litraa (Oksman-Takalo 2020). Kun dieselin tiheydeksi oletetaan 0,838 kg/l (GaBi 9.1) ja lämpöarvoksi 42,8 MJ/kg (Tilastokeskus 2020), tämän dieselmäärän energiasisältö on 1 880 MWh. Tämä energiasisältö saavutetaan 187 500 m³ biometaanilla. Kun biometaanin liikennekäytöstä saatavia hyvityksiä määritetään, huomioidaan laskennassa vältetyn dieselin valmistuksesta sekä poltosta aiheutuvat päästöt. Kun ajokilometrit sekä dieselin kulutus on tiedossa, saadaan Lappeenrannan ja Imatran kuiva- ja biojätteiden keräyksen polttoaineenkulutukseksi keskimäärin 56,8 l/100

km. Kulutus on melko suuri, mutta koska jätteenkeräys tapahtuu tässä tapauksessa kaupungeissa, on tyhjennyspisteitä tiheästi, josta aiheutuva pätkittäinen ajo lisää polttoaineenkulutusta. Maantieajoa ei juurikaan synny, sillä jäteauton tyhjennys tapahtuu keräysalueen lähellä Lappeenrannan Kukkuroinmäellä. Arvioidaan Lappeenrannan ja Imatran kuiva- ja biojätteiden kuljetukselle päästökerrointa Lipasto-tietokannan tietojen perusteella. Jos päästökerrointa verrataan polttoaineenkulutukseen, voidaan jätteenkuljetuksen päästökerroin määrittää puoliperävaunuyhdistelmän katuajon (kantavuus 25 t) avulla. Tälle ajoneuvolle tyhjän ja täyden ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkulutuksiksi on esitetty 40,9 l/100 km ja 70,6 l/100 km. Tällöin jäteautojen kulutus 56,8 l/100 km saavutettaisiin 53,5 % osakuormalla. Tyhjän ja täyden ajoneuvoyhdistelmän päästökertoimeksi on esitetty 965 g CO₂-ekv/km ja 1 662 g CO₂-ekv/km, jolloin 53,5 % osakuormalla päästökertoimeksi saadaan 1 338 g CO₂-ekv/km. (VTT 2017f.) Vältetyn dieselin valmistuksen päästöt mallinnetaan GaBista löytyvän prosessin EU-28: Diesel mix at filling station avulla.

Näillä tiedoilla ja oletuksilla biokaasulaitoksella tuotetusta biometaanista Lappeenrannan ja Imatran kuiva- ja biojätteiden kuljetuksessa saataisiin hyödynnettyä 16 %, loput 84 % hyödynnettäisiin muissa ajoneuvoissa. Arvioidaan seuraavaksi päästövähennyksiä, joita saadaan, kun Etelä-Karjalan Jätehuollon omasta käytöstä ylijäänyt biometaanin hyödynnetään muissa ajoneuvoissa. Biokaasulaitoksella tuotetusta biometaanista 982 400 m³/a hyödynnettäisiin muissa ajoneuvoissa. Tutkitaan seuraavaksi Suomen autokantaa, jotta voidaan karkeasti arvioida, kuinka paljon biometaanin hyödynnettäisiin raskaammissa ajoneuvoissa ja kuinka paljon henkilöautoissa. Vuoden 2020 alussa Suomessa oli liikennekäytössä 11 515 kaasuautoa, jotka ovat tyypeiltään henkilöautoja, pakettiautoja, kuorma-autoja sekä linja-autoja (Kaasuautoilijat ry 2020 alkuperäinen lähde: Traficom). Tämän mukaan Suomen liikennekäytössä olevista kaasuautoista noin 91 % on henkilöautoja ja loput 9 % raskaampia ajoneuvoja. Kaasuautojen määrän lisääntyessä arvioidaan tämän suhteen pysyvän suunnitteen samana. Tämän perusteella oletetaan, että 91 % muissa ajoneuvoissa hyödynnettävästä biometaanista korvaa bensiinin käyttöä henkilöautoissa ja 9 % dieselin käyttöä raskaammissa ajoneuvoissa. Tällöin bensiinin käyttöä korvaisi 894 000 m³/a biometaanin ja dieselin käyttöä 88 400 m³/a biometaanin. Lasketaan edellä mainituille ajoneuvotyypeille päästökerroimet sekä polttoaineenkulutukset Lipasto-tietokannan tietojen avulla. Henkilöautojen päästö- ja kulutustietoja arvioidaan bensiinikäyttöisen henkilöauton keskimääräisen ajon

perusteella, josta 27 % on katuajoa ja 73 % on maantieajoa. Tällä ajoneuvolla päästökerroin olisi 159 g CO₂-ekv/km ja bensiinin kulutus 7,3 l/100 km (VTT 2017a). Kun biometaanin oletetaan korvaavan bensiiniä energiasisältöjen suhteessa 1:1 ja bensiinin tiheydeksi oletetaan 0,744 kg/l ja lämpöarvoksi 41,9 MJ/kg (Tilastokeskus 2020), saadaan vältetyn bensiinin määräksi 1 030 m³ vuodessa. Aiemmin oletetulla kulutuksella, saadaan biometaanilla korvattua bensiinikäyttöisellä ajoneuvolla ajoa 14,1 milj.km/a. Vältetyn bensiinin valmistuksen päästöt mallinnetaan GaBista löytyvän prosessin EU-28: Gasoline mix (premium) at filling station avulla. Tämä prosessi huomioi raakaöljystä sekä biokomponenteista valmistetun bensiinin päästöt, bioperäisen bensiinin osuudeksi on määritetty 5,49 %. Tämä prosessi ottaa huomioon bensiinin valmistuksen päästöt aina raaka-aineiden hankinnasta ja kuljetuksesta siihen, kun valmis bensiini kuljetetaan tankkausasemille. (GaBi 9.1.)

Pakettiautojen päästö- ja kulutustietoja arvioidaan kokonaismassaltaan 2,7 t ja kantavuudeltaan 1,2 t ajoneuvon jakeluajon perusteella, jossa maantieajon osuudeksi on arvioitu 30 %. Kuorma-autojen tietoja arvioidaan kokonaismassaltaan 6 t ja kantavuudeltaan 3,5 t pienen jakelukuorma-auton jakeluajon perusteella, jossa maantieajon osuudeksi on arvioitu 30 %. Linja-auton tietoja arvioidaan kaupunkibussien tietojen perusteella, sillä on todennäköisempää, että biometaani tultaisiin hyödyntämään taajamissa ajavissa kaupunkibusseissa. Käytetään laskennassa kokonaismassaltaan 18 t ja kantavuudeltaan 6 t kaupunkibussin tietoja. Kun kulutuksia ja päästökertoimia määritetään näille edellä mainituille ajoneuvotyypeille, oletetaan ajoneuvojen osakuorman olevan 50 %. Lasketaan näille ajoneuvotyypeille yhteinen päästökerroin sekä polttoaineenkulutus painotettuna keskiarvona niiden määrien suhteellisiin osuuksiin perustuen. Seuraavassa taulukossa 6 on esitetty edellä mainittujen ajoneuvotyyppien päästökertoimet sekä polttoaineen kulutukset.

Taulukko 6. Vuoden 2020 alussa Suomessa liikennekäytössä oleva kaasuautokanta, kun liikennekäyttöön oli rekisteröity 11 515 ajoneuvoa, joista 91 % oli henkilöautoja ja loput raskaampia ajoneuvoja. Raskaimmille ajoneuvoille esitetty osuudet kaikista kaasuautoista, sekä arvioidut päästökertoimet ja polttoaineenkulutukset, kun ajoneuvot ovat dieselsäilyttäisiä.

Ajoneuvotyyppi	Osuus kaikista kaasuautoista	Päästökerroin [g CO ₂ -ekv/km]	Polttoaineen kulutus [l/100 km]	Lähde
Pakettiauto	7,0 %	238	10,1	VTT 2017d
Kuorma-auto	1,7 %	326	13,6	VTT 2017e
Linja-auto	0,5 %	1 014	42,9	VTT 2017c
Painotettu keskiarvo		293	12,3	

Kun biometaanin oletetaan korvaavan dieseliä energiasisältöjen suhteessa 1:1, saadaan vältetyn dieselin määräksi muissa ajoneuvoissa 88 800 litraa vuodessa. Taulukon 6 tietoihin perustuen biometaanilla saadaan korvattua dieselsäilyttäisellä ajoneuvolla ajoa 719 900 km/a. Vältetyn dieselin valmistuksen päästöt mallinnetaan GaBista löytyvän prosessin EU-28: Diesel mix at filling station avulla. Seuraavassa taulukossa 7 on esitetty jäteautoissa sekä muissa ajoneuvoissa hyödynnetyt biometaanimäärät sekä tällä biometaanilla korvattujen polttoaineiden määrät.

Taulukko 7. Biometaanilla korvattujen polttoaineiden määrät jäteautoissa sekä muissa ajoneuvoissa. Lisäksi eritelty eri ajoneuvoissa hyödynnettävän biometaanin määrät sekä biometaanilla saatu ajosuorite.

Keräysalue	Ajosuoritus korvatulla polttoaineella [km]	Vältetty polttoaine [l]	Korvatun polttoaineen energiasisältö [MWh]	Hyödynnetty biometaanin [m ³]	Osuus kaikesta tuotetusta biometaanista
Dieselmääräiset jäteuutot, kun kuiva- ja biojätteen keräys Lappeenrannan ja Imatran alueelta	331 500	188 200	1 880	187 500	16 %
Muut bensakäyttöiset ajoneuvot, kun kuiva- ja biojätteen keräys Lappeenrannan ja Imatran alueelta	14 100 000	1 030 000	8 940	894 000	76 %
Muut dieselmääräiset ajoneuvot, kun kuiva- ja biojätteen keräys Lappeenrannan ja Imatran alueelta	719 900	88 800	880	88 400	8 %

Skenaario 2

Vuonna 2019 koko Etelä-Karjalan Jätehuollon toiminta-alueelta kuiva- ja biojätteiden keräyksestä ajokilometrejä aiheutui 588 600 km, tämä ajosuoritus kulutti dieseliä 281 400 litraa (Oksman-Takalo 2020). Tämän dieselmäärän energiasisältö on 2 800 MWh, joka saavutetaan 280 400 m³ metaanilla. Kun ajokilometrit ja polttoaineenkulutus on tiedossa, saadaan koko Etelä-Karjalan Jätehuollon toiminta-alueen kuiva- ja biojätteiden keräyksen polttoaineenkulutukseksi keskimäärin 47,8 l/100 km. Tämä kulutus on ensimmäisessä skenaariossa määritettyä alhaisempi, sillä Etelä-Karjala on pinta-alaltaan laaja alue, jossa sijaitsee asukasluvultaan pienempiä kuntia. Tällöin maantieajon osuus on suurempi ja keräyspisteet ovat Lappeenrannan ja Imatran keräyspisteistä harvemmassa, joten näin ollen polttoaineenkulutus on alhaisempi. Aikaisemmin arvioitiin Lappeenrannan ja Imatran kuiva- ja biojätteiden kuljetukselle päästökerroin Lipasto-tietokannan tietojen perusteella puoliperävaunuyhdistelmälle, käytetään nyt polttoaineenkulutuksen ja päästökertoimen laskemisessa näitä samoja tietoja. Koska nyt polttoaineenkulutus on alhaisempi, saavutetaan tällä ajoneuvoyhdistelmällä edellä mainittu polttoaineenkulutus 23,3 % osakuormalla. Tällä osakuormalla päästökertoimeksi saadaan 1 127 g CO₂-ekv/km. (VTT 2017f.)

Näillä tiedoilla ja oletuksilla biokaasulaitoksella tuotetusta biometaanista Etelä-Karjalan Jätehuollon koko toiminta-alueen kuiva- ja biojätteiden kuljetuksessa saataisiin hyödynnettyä 24 %, loput 76 % hyödynnettäisiin muissa ajoneuvoissa. Tässä tapauksessa biokaasulaitoksella tuotetusta biometaanista 889 600 m³/a hyödynnetään muissa ajoneuvoissa. Oletetaan myös tässä tapauksessa, että 91 % muissa ajoneuvoissa hyödynnettävästä biometaanista korvaa bensiinin käyttöä ja 9 % dieselin käyttöä. Tällöin bensiinin käyttöä korvaisi 809 500 m³/a biometaania ja dieselin käyttöä korvaisi 80 100 m³/a biometaania. Kun määritetään vältetyn dieselin ja bensiinin määriä tässä tapauksessa, käytetään laskennassa samoja oletuksia ja laskenta-arvoja kuin ensimmäisen skenaarion osalta. Seuraavassa taulukossa 8 on esitetty jäteautoissa sekä muissa ajoneuvoissa hyödynnetyt biometaanimäärät sekä tällä biometaanilla korvattujen polttoaineiden määrät.

Taulukko 8. Biometaanilla korvattujen polttoaineiden määrät jäteautoissa sekä muissa ajoneuvoissa. Lisäksi eritelty eri ajoneuvoissa hyödynnettävän biometaanin määrät sekä biometaanilla korvattu ajosuorite.

Keräysalue	Ajosuoritus korvatulla polttoaineella [km]	Vältetty polttoaine [l]	Korvatus polttoaineen energiasisältö [MWh]	Hyödynnetty biometaani [m ³]	Osuus kaikesta tuotetusta biometaanista
Dieselmikäyttöiset jäteuotot, kun kuiva- ja biojätteen keräys Lappeenrannan ja Imatran alueelta	588 600	281 400	2 800	280 400	24 %
Muut bensakäyttöiset ajoneuvot, kun kuiva- ja biojätteen keräys Lappeenrannan ja Imatran alueelta	12 800 000	934 900	8 100	809 500	69 %
Muut dieselmikäyttöiset ajoneuvot, kun kuiva- ja biojätteen keräys Lappeenrannan ja Imatran alueelta	651 800	80 400	800	80 100	7 %

Mädätysjäännökset

Biokaasulaitoksen biojätelinjalta mädätysjäännöstä syntyy 6 900 t/a ja puhdistamolietelinjalta 15 500 t/a (Oksman-Takalo 2020). Biojätelinjalta mädätysjäännöstä syntyy enemmän kuin prosessiin on syötetty raaka-ainetta, sillä esikäsittelyssä biojätteen sekaan lisätään tukiaineeksi puutarhajätettä ja risuja. Puhdistamolietteen sekaan taas syötetään esikäsittelyssä

vettä, jolloin myös tässä linjassa syntyvän mädätysjäännöksen määrä on prosessiin syötetyn raaka-aineen määrää suurempi.

Mädätysjäännökset erotetaan mädätteeksi ja nestejakeeksi, jolloin biojätelinjan mädätysjäännöksestä saadaan mädätettä 4 000 t/a ja nestejakeetta 2 900 t/a (Oksman-Takalo 2020). Mädätteellä sekä nestejakeella voidaan korvata teollisten typpi- ja fosforilannoitteiden käyttöä. Teollisten lannoitteiden korvaamisesta saadut päästöhyvitykset lasketaan vältetyn lannoitteen sekä mädätteen ja nestejakeen sisältämien kasveille käyttökelpoisten ravinteiden mukaan. Lasketaan hyvitykset erikseen typpi- ja fosforilannoitteille. Kuten aikaisemmin mainittiin, biojätteen fosforipitoisuuden arvioitiin olevan 3 kg/t ja typpipitoisuuden 8 kg/t (Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy 2017, 8). Mädätyksen aikana fosforiravinteita ei häviä, eli raaka-aineen sisältämä fosfori siirtyy kokonaisuudessaan mädätysjäännökseen. Kun biojätettä mädätetään vuodessa 6 300 t, fosforin määrä biojätteen mädätysjäännöksessä olisi 19 t. Kaikki mädätysjäännöksen sisältämä fosforia ei kuitenkaan ole kasveille käyttökelpoisessa muodossa. Oletetaan 40 % biojätteen mädätysjäännöksen sisältämästä fosforista olevan kasveille käyttökelpoisessa muodossa, jolloin lannoitteena hyödynnettävän fosforin määrä olisi 8 t/a. Koska kyseessä on kuivamädätys, oletetaan 96 % mädätysjäännöksen sisältämästä fosforista siirtyvän mädätysjäännöksen separoinnissa mädätteeseen ja 4 % nestejakeeseen. (Mönkäre et al. 2016, 24–25.) Biojätteen nestejake on käyttökelpoista sellaisenaan, mutta biojätteen mädäte käsitellään vielä edelleen kompostoimalla. Kuten aiemmin kompostointilaitoksen osalta oletettiin, sen aikana fosforiravinteita ei häviä. Oletetaan nyt, ettei kompostointi muuta biojätteen mädätteen sisältämän fosforin käyttökelpoisuutta, vaikka todellisuudessa se voikin mädätteen sisältämän fosforin liukoisuutta parantaa. Lasketaan fosforilannoitteen korvaamisesta saatavat hyvitykset GaBi prosessin Triple superphosphate (TSP, 46 % P_2O_5) avulla. Tässä prosessissa lannoitteen fosforipitoisuus on 46 % ja se sisältää fosforilannoitteen valmistuksen päästöt kehdestä portille (GaBi 9.1). Oletetaan kaiken lannoitteen sisältävän fosforin olevan kasveille käyttökelpoisessa muodossa. Biojätteen mädätteellä voidaan korvata 16 t fosforilannoitetta vuodessa, kun taas nestejakeella vastaava korvattavuus olisi 660 kg.

Kuten kompostoinnissa, myös mädätyksen aikana typpiravinteita poistuu prosessista. Oletetaan biojätteen mädätyksen aikaiseksi typpipoistumaksi 13 %, jolloin typen määrä biojätteen

mädätysjäännöksessä olisi 44 t. Oletetaan 55 % biojätteen mädätysjäännöksen sisältämästä tyyppistä olevan kasveille käyttökelpoisessa muodossa, jolloin lannoitteena hyödynnettävän typen määrä olisi 24 t. Mädätysjäännöksen sisältämästä tyyppistä 83 % siirtyisi separoinnissa mädätteeseen ja 17 % nestejakeeseen. (Mönkäre et al. 2016, 24–25.) Aiemmin todettiin kompostoinnin aikana poistuvan 30 % käsittelemättömän raaka-aineen tyyppistä. Oletetaan, ettei mädätyksellä ole vaikutusta mädätteen kompostoinnin typpihäviöihin, eli typpihäviöitä aiheutuisi saman verran kuin jos kompostoitaisiin käsittelemätöntä raaka-ainetta. Oletetaan, ettei kompostointi muuta biojätteen mädätteen sisältämän typen käyttökelpoisuutta, vaikka todellisuudessa se voisi mädätteen sisältämän typen liukoisuutta parantaa. Lasketaan typpilannoitteen korvaamisesta saatavat hyvitykset GaBi prosessin Ammonium nitrate (AN, 35,5 % N) avulla. Tämä prosessi sisältää typpihaposta valmistetun ammoniumnitraattilannoitteen päästöt kehdosta portille (GaBi 9.1). Ammoniumnitraattilannoitteen typpipitoisuus on 33,5 % ja oletetaan sen kaiken olevan liukoisessa muodossa. Biojätteen mädätteellä voidaan korvata 42 t typpilannoitetta vuodessa, kun taas nestejakeella vastaava korvattavuus olisi 12 t. Typpilannoitteen päästöhyvitysten osalta huomioidaan teollisen lannoitteen valmistuksen päästöt. Laskennassa ei huomioida typpilannoitteen hajoamisesta syntyneitä typpioksiduulipäästöjä, sillä oletetaan niitä muodostuvan yhtä paljon riippumatta siitä, tuleeko typpi maaperään mädätysjäännöksestä vai teollisista lannoitteista.

Biojätelinjan mädätysjäännöksen tapaan myös puhdistamolietelinjan mädätysjäännös separoidaan, jolloin siitä saadaan mädätettä 5 500 t/a ja nestejakeetta 10 000 t/a (Oksman-Takalo 2020). Mädätteellä voidaan korvata teollisten typpi- ja fosforilannoitteiden käyttöä, nestejakeella korvataan urean käyttöä metsäteollisuuden vedenpuhdistuksessa. Teollisten lannoitteiden korvaamisesta saadut päästöhyvitykset lasketaan vältetyn lannoitteen ravinteiden sekä mädätteen sisältämien kasveille käyttökelpoisten ravinteiden mukaan. Urean korvaamisesta saadut päästöhyvityksen lasketaan vältetyn urean typen määrän sekä nestejakeen sisältämän typen määrän mukaan. Puhdistamolietteen fosforipitoisuuden arvioitiin olevan 4,6 kg/t ja typpipitoisuuden 8 kg/t (Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy 2017, 8). Kun puhdistamolietettä mädätetään vuodessa 13 700 t, fosforin määrä puhdistamolietteen mädätysjäännöksessä olisi 63 t. Koska kyseessä on lietepohjainen mädätysjäännös, oletetaan 40 % sen sisältämästä fosforista olevan kasveille käyttökelpoisessa muodossa, jolloin lannoitteena hyödynnettävän fosforin määrä 25 t. Koska kyseessä on kuivamädätys, oletetaan 99 % mädätysjäännöksen

sisältämästä fosforista siirtyvän mädätteeseen (Mönkäre at al. 2016, 24–25). Puhdistamolietteen mädäte jälkikypsytetään vielä separoinnin jälkeen. Oletetaan ettei jälkikypsytyksen aikana häviä fosforiravinteita, eikä jälkikypsytyks muuta puhdistamolietteen mädätteen sisältämän fosforin liukoisuutta. Lasketaan fosforilannoitteen korvaamisesta saatavat hyvitykset GaBi prosessin Triple superphosphate (TSP, 46 % P_2O_5) avulla. Puhdistamolietteen mädätteellä voidaan korvata 54 t fosforilannoitetta vuodessa.

Puhdistamolietteen mädätyksen aikaiseksi typpipoistumaksi oletetaan 2 %, jolloin typen määrä puhdistamolietteen mädätysjäännöksessä olisi 107 t. Mädätysjäännöksen sisältämästä typestä 77 % siirtyisi separoinnissa mädätteeseen ja 23 % nestejakeeseen. (Mönkäre at al. 2016, 24–25.) Oletetaan 55 % mädätysjäännöksen sisältämästä typestä olevan kasveille käyttökelpoisessa muodossa. Jälkikypsytyksen aikana ei arvioida tapahtuvan typpihäviöitä, eikä jälkikypsytyksen oleteta muuttavan puhdistamolietteen mädätteen sisältämän typen käyttökelpoisuutta. Tällöin käsitellyssä puhdistamolietteen mädätteessä lannoitteena hyödynnettävää typpeä olisi 46 t. Lasketaan typpilannoitteen korvaamisesta saatavat hyvitykset GaBi prosessin Ammonium nitrate (AN, 33,5 % N) avulla. Puhdistamolietteen mädätteellä voidaan korvata 136 t typpilannoitetta vuodessa. Edellä mainituilla oletuksilla puhdistamolietteen nestejakeessa olisi 25 t typpeä. Oletetaan tämän kaiken soveltuvan kokonaisuudessaan typpilisäykseksi vedenpuhdistusprosessiin korvaamaan urean käyttöä. Lasketaan urean korvaamisesta saatavat hyvitykset GaBi-prosessin EU-28: Urea (46 % N) avulla. Tämä prosessi sisältää rakeistetun urean valmistuksen päästöt kehdestä portille (GaBi 9.1). Puhdistamolietteen nestejakeella voidaan korvata 54 t ureaa vuodessa. Seuraavassa taulukossa 9 on esitetty mädätysprosessin inventaariodata kokonaisuudessaan. Taulukosta käy ilmi mädätysprosessissa kulutettujen syötteiden, tuotettujen tuotosten sekä vältettyjen aineiden määrät.

Taulukko 9. Mädätysprosessin inventaariodata, joka sisältää biokaasulaitokselle tulevien syötteiden, tuosten sekä vältettyjen aineiden määrät. Esitetty laskennassa käytetty arvo, sekä annettu vaihteluväli.

Syöte	Arvo	Vaihteluväli	Yksikkö	Lähde
Biojäte	6 300	6 300	t	Primääridata; Lohilahti 2020
Puhdistamoliete	13 700	13 700	t	Primääridata; Lohilahti 2020
Sähkö	1 500	1 000–2 000	MWh	Primääridata; Lohilahti 2020
Rikkihappo	3,6	1–5	t	Primääridata; Lohilahti 2020
Lipeä	4,2	1,5–7	t	Primääridata; Lohilahti 2020
Aktiivihiihi	12	5–20	t	Primääridata; Lohilahti 2020
Diesel	3 360		l	Oletettu
Tuotos				
CH ₄ päästöt	1,08		kg CH ₄ /t	Laskettu
Biometaani	1 170 000		m ³	Primääridata; Oksman-Takalo 2020
Biojätteen mädäte	4 000		t	Primääridata; Oksman-Takalo 2020
Biojätteen nestejäte	2 900		t	Primääridata; Oksman-Takalo 2020
Puhdistamolietteen mädäte	5 500		t	Primääridata; Oksman-Takalo 2020
Puhdistamolietteen nestejäte	10 000		t	Primääridata; Oksman-Takalo 2020
Hyvitys				
Vältetty diesel ensimmäisessä skenaariossa	277 000		l	Laskettu
Vältetty bensiini ensimmäisessä skenaariossa	1 030 000		l	Laskettu
Vältetty diesel toisessa skenaariossa	361 800		l	Laskettu
Vältetty bensiini toisessa skenaariossa	934 900		l	Laskettu
Vältetty fosforilannoite	71		t	Laskettu
Vältetty typpilannoite	190		t	Laskettu
Vältetty urea	54		t	Laskettu

Seuraavassa taulukossa 10 on esitetty mädätysprosessiin liittyviä kuljetustietoja. Taulukosta käy ilmi syötteen kuljetukseen käytetty ajoneuvotyyppi sekä kuljetukselle oletettu osakuorma, päästökerroin sekä polttoaineenkulutus.

Taulukko 10. Mädätysprosessin syötteiden kuljetustiedot, josta käy ilmi syötteiden kuljetukseen käytetty ajoneuvotyyppi sekä kuljetukselle oletettu osakuorma, päästökerroin sekä polttoaineenkulutus.

Syöte	Kuljetus	Päästökerroin [g CO ₂ -ekv/km]	Polttoaineenkulutus [l/100 km]
Rikkihappo	Suuri jakelukuorma-auto (Kantavuus 9 t, osakuorma 7 %)	378	15,8
Lipeä	Suuri jakelukuorma-auto (Kantavuus 9 t, osakuorma 8 %)	379	15,8
Aktiivihiihi	Suuri jakelukuorma-auto (Kantavuus 9 t, osakuorma 17 %)	385	16,1
Biojätteen mädäte	Kuorma-auto (Kantavuus 21 t, osakuorma 36 %)	662	27,9
Puhdistamolietteen mädäte	Kuorma-auto (Kantavuus 21 t, osakuorma 50 %)	699	29,5

5 TULOKSET

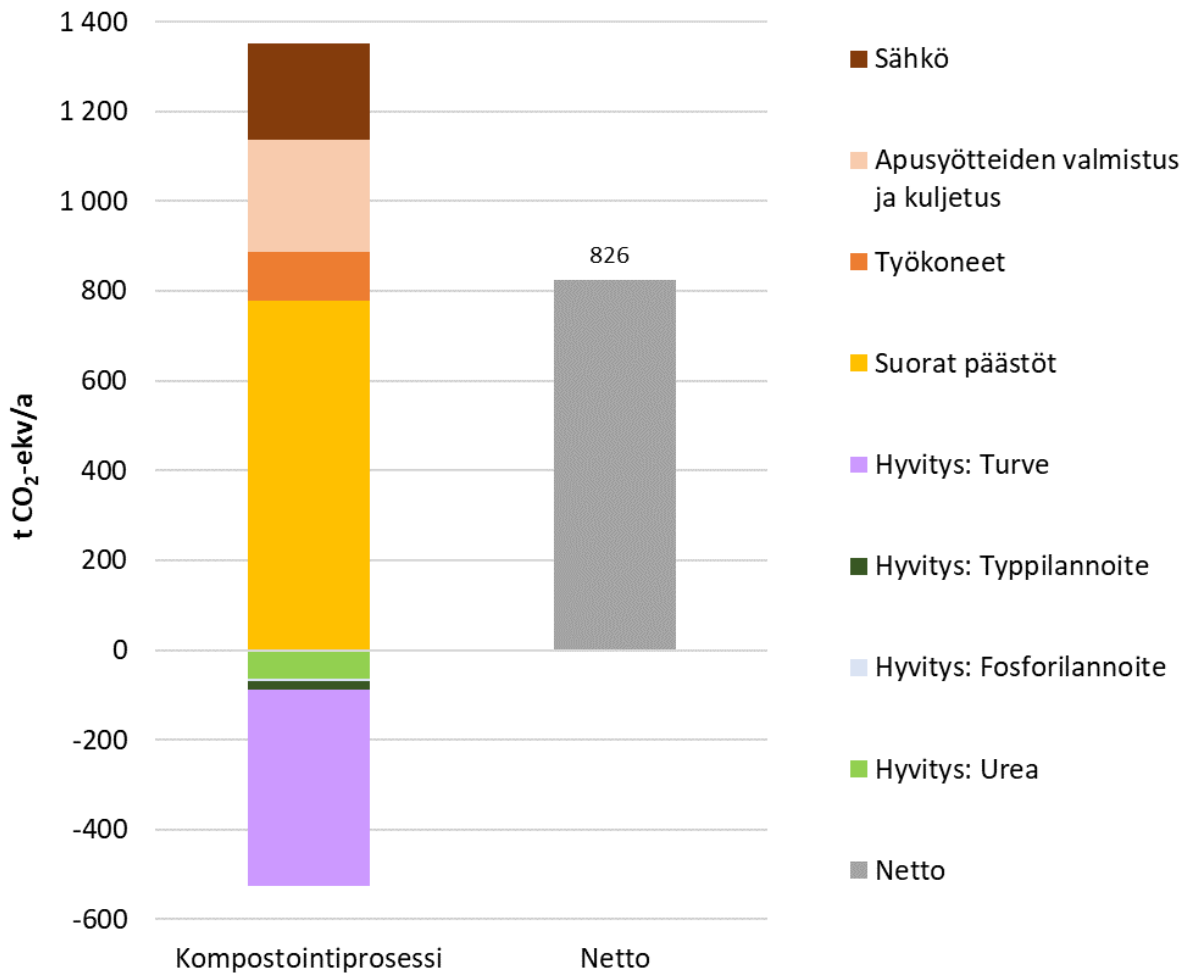
Tässä kappaleessa tullaan esittämään laskennan tulokset, eli kompostointiprosessin sekä mädätysprosessin ilmaston lämpenemisvaikutukset. Mädätysprosessista aiheutuvat ilmaston lämpenemisvaikutukset tullaan esittämään kahdelle skenaariolle:

1. Biokaasulaitoksessa syntynyt biometaani hyödynnetään ensisijaisesti Lappeenrannan ja Imatran alueen kuiva- ja biojätteen keräyksessä. Tästä ylijäänyt biometaani hyödynnetään muissa ajoneuvoissa.
2. Biokaasulaitoksessa syntynyt biometaani hyödynnetään ensisijaisesti koko Etelä-Karjalan Jätehuollon alueen kuiva- ja biojätteen keräyksessä. Tästä ylijäänyt biometaani hyödynnetään muissa ajoneuvoissa.

Koska ympäristövaikutuksia tarkastellaan ilmaston lämpenemispotentiaalin näkökulmasta, laskennan tuloksissa esitetään absoluuttisesti vuoden aikana syntyneet kasvihuonekaasupäästöt yksikössä t CO₂-ekv. Tulosten esittämisen ja analysoinnin jälkeen tehdään herkkyystarkastelu, jossa selvitetään tuloksiin merkittävimmin vaikuttavien parametrien ja olettusten muuttamisen vaikutus tuloksiin. Lopuksi verrataan laskennan tuloksia vastaaviin olemassa oleviin tutkimuksiin.

5.1 Kompostointiprosessi

Kompostointiprosessissa syntyvät kasvihuonekaasupäästöt on jaoteltu eri prosesseihin kappaleen 4.3.1 mukaisesti. Kompostointiprosessin kasvihuonekaasupäästöt on esitetty seuraavassa kuvassa 5, jossa kompostoinnista syntyvät päästöt esitetään positiivisena ja päästöhyvitykset negatiivisena. Näiden lisäksi kuvassa 5 esitetään nettopäästö, joka huomioi sekä aiheutuneet päästöt että päästöhyvitykset, jolloin saadaan selville kompostointiprosessin aiheuttama todellinen ilmaston lämpenemisvaikutus.



Kuva 5. Biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnin vuotuinen ilmaston lämpenemisvaikutus, kun raakaa biojätettä kompostoidaan 6 300 t ja puhdistamolietettä kompostoidaan 13 700 t.

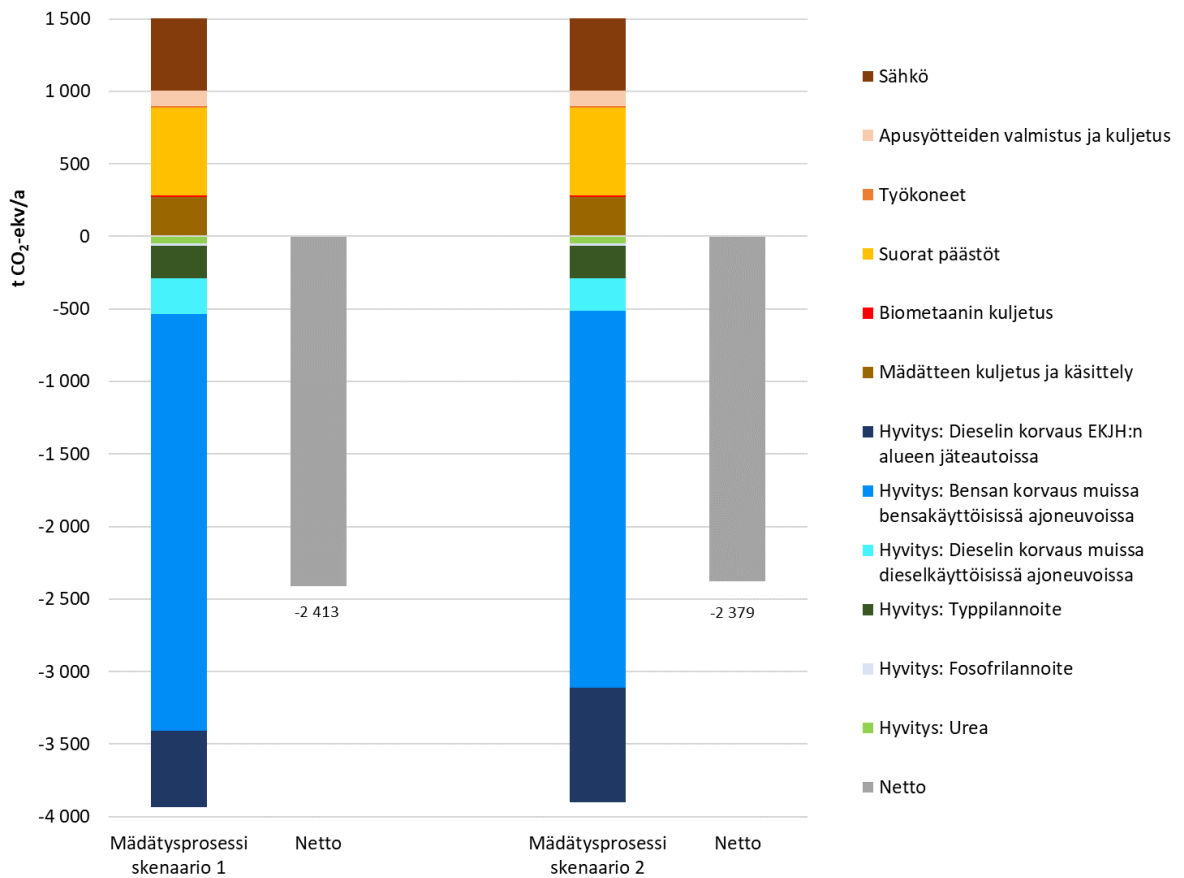
Kuvasta 5 huomataan kompostointiprosessista aiheutuvan kasvihuonekaasupäästöjä yhteensä 1 350 t CO₂-ekv/a, josta 58 % aiheutuu suorista metaani- ja typpioksiduulipäästöistä. Apusyötteiden valmistus ja kuljetus aiheuttaa kaikista päästöistä 19 % ja sähköntuotanto 16 %. Apusyötteiden valmistuksen ja kuljetuksen päästöt ovat näin merkittävät pääasiassa tukiaineen käytön takia, sillä sitä käytetään laitoksella suuri määrä vuodessa ja sen kuljetusmatka on pitkä. Apusyötteiden valmistuksen ja kuljetuksen päästöistä 83 % aiheutuu juuri tukiaineen käytöstä. Jos tukiaineena käytettävien tasauspätkien valmistuksen päästöt olisi allokoitu tälle metsäteollisuuden sivutuotteelle massaperusteisen sijasta kustannusperusteisesti, olisi tukiaineen valmistuksen päästöt olleet nyt esitettyä hieman alhaisemmat. Apusyötteiden kuljetuksen osalta jouduttiin tekemään paikoin karkeitakin oletuksia, tuloksista kuitenkin huomataan apusyötteiden kuljetusten merkityksen olevan vähäinen

verrattuna niiden valmistuksen päästöihin. Apusyötteiden kuljetuksen osuus niiden valmistuksen ja kuljetuksen päästöstä on vain 9 %, joten kuljetuksille tehdyt oletukset ovat kokonaisuuden kannalta riittävät. Vaikka työkoneiden käyttö on kompostointiprosessissa merkittävää, aiheutuu sitä vain 8 % kaikista päästöistä.

Päästövähennyksiä syntyy yhteensä 524 t CO₂-ekv/a, josta 83 % saavutetaan turpeen noston välttämisestä. Suurin osa päästövähennyksistä aiheutuu turpeen noston välttämisestä, sillä suurin osa muodostuvasta kompostista (75 %) hyödynnetään maanparannuskäytössä olettaen korvaavan turvetta. Lannoitehyvitykset ovat vain 5 % kaikista päästöhyvityksistä, joten niiden osuutta ei voida pitää kokonaisuuden kannalta merkittävänä. Vähäiseen lannoitehyvitysten määrään vaikuttaa alhainen lannoitteena hyödynnettävän kompostin osuus (25 %). Tämän lisäksi kompostin sisältämän kasveille käyttökelpoisen typen ja fosforin määrä on oletettu verrattain vähäiseksi, sillä kasveille käyttökelpoisen fosforin määrän oletettiin olevan 40 % kokonaisfosforista ja kasveille käyttökelpoisen typen määrän oletettiin olevan vain 20 % kokonaistypestä. Päästövähennyksistä 12 % saavutetaan urean käytön välttämisestä, kun sitä korvataan ammoniumsulfaattipitoisella pesurivedellä. Kompostointiprosessin päästöt ovat noin 2,5 kertaiset verrattuna saatuihin päästöhyvityksiin, tällöin prosessin nettopäästö jää reilusti positiiviseksi, sen ollessa 826 t CO₂-ekv/a. Yksityiskohtaisemmat numeeriset tiedot kompostointiprosessin kasvihuonekaasupäästöistä löytyvät liitteestä 3.

5.2 Mädätysprosessi

Mädätysprosessissa syntyvät kasvihuonekaasupäästöt on jaoteltu eri prosesseihin kappaleen 4.3.2 mukaisesti. Mädätysprosessin kasvihuonekaasupäästöt molemmissa skenaarioissa on esitetty seuraavassa kuvassa 6, skenaarioiden väliset tulokset poikkeavat toisistaan vain biometaanin hyödyntämisestä saatavien päästöhyvitysten osalta. Mädätysprosessin päästöt esitetään kuvassa 6 positiivisena ja päästöhyvitykset negatiivisena. Näiden lisäksi kuvassa 6 esitetään nettopäästöt, joissa huomioidaan sekä aiheutuneet päästöt että päästöhyvitykset, jolloin saadaan selville nykytilanteen aiheuttama todellinen ilmaston lämpenemisvaikutus.



Kuva 6. Biojätteen ja puhdistamolietteen mädätyksen vuotuiset ilmaston lämpenemisvaikutukset eri skenaarioissa, kun raakaa biojätettä mädätetään 6 300 t ja puhdistamolietettä mädätetään 13 700 t.

Kuvasta 6 huomataan mädätyksprosessista aiheutuvan kasvihuonekaasupäästöjä yhteensä 1 520 t CO₂-ekv/a, josta 40 % aiheutuu suorista päästöistä, eli jalostuksen aikana tapahtuvista metaanihäviöistä. Sähköntuotanto aiheuttaa kaikista päästöistä 34 % ja mädätteiden sisäinen kuljetus käsittelyyn ja käsittely aiheuttaa kaikista päästöistä 18 %. Mädätteiden sisäisen kuljetuksen ja käsittelyn päästöt aiheutuvat kuitenkin käytännössä vain mädätteen käsittelystä. Mädätteen kuljetus biokaasulaitokselta käsittelyyn on huomioitu, mutta kuljetusmatkan ollessa lyhyt, siitä aiheutuvat päästöt ovat mitättömät. Suuret mädätteen käsittelyn päästöt johtuvat biojätelinjan mädätteen kompostoinnista, josta aiheutuu sekä suoria että epäsuoria päästöjä kuvassa 5 esitettyjen suhteiden mukaisesti. Apusyötteiden valmistus ja kuljetus aiheuttaa 7 % kaikista päästöistä, näiden osalta jouduttiin kuitenkin tekemään paljon oletuksia. Polymeerijauheen valmistus ja kuljetus jätettiin kokonaan tarkastelun ulkopuolelle, sillä niistä ei ollut saatavilla laskennan kannalta tarpeeksi tietoa. Koska apusyötteiden valmistuksen ja kuljetuksen päästöt eivät ole tämän suuremmat, voidaan todeta tehtyjen

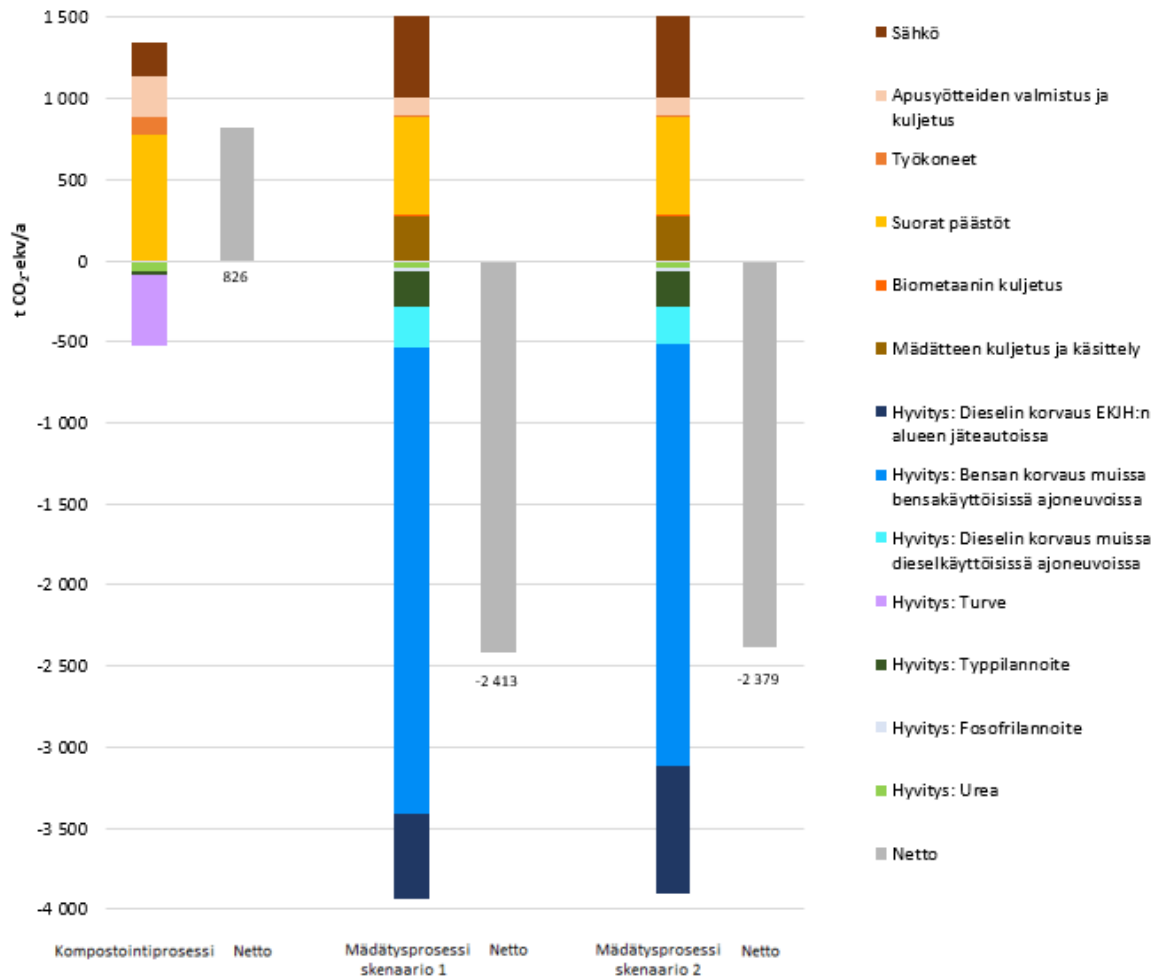
oletuksien olevan kokonaisuuden kannalta riittävät. Käytetyn polymeerijauheen määrän ollessa vähäinen, ei sen valmistuksen ja kuljetuksen päästöjen huomioimisella olisi ollut tuloksiin käytännön merkitystä. Työkoneiden käytön sekä biometaanin kuljetuksen päästöt ovat yhteensä vain 2 % kokonaispäästöistä, joten nämä olisi perustellusti voinut jättää laskennan ulkopuolelle, niiden vähäiseen merkityksellisyys perustuen. Näiden merkityksellisyttä ei kuitenkaan osattu arvioida selvityksen aiemmassa vaiheessa, joten nämä prosessit on laskennassa huomioitu.

Mädätysprosessissa saavutetaan merkittäviä päästövähennyksiä, pääasiassa biometaanin hyödyntämisen ansiosta. Jos biometaania hyödynnetään ensisijaisesti Etelä-Karjalan Jätehuollon toiminnoissa Lappeenrannan ja Imatran kuiva- ja biojätteen keräyksessä, voitaisiin saavuttaa 3 930 t CO₂-ekv/a päästövähennys. Jos biometaania hyödynnetään ensisijaisesti koko Etelä-Karjalan Jätehuollon toiminta-alueen kuiva- ja biojätteen keräyksessä, voitaisiin saavuttaa 3 900 t CO₂-ekv/a päästövähennys. Tämä ero skenaarioiden välillä johtuu siitä, että ensimmäisessä skenaariossa biometaanilla voidaan korvata enemmän bensiinin käyttöä, kuin toisessa skenaariossa. Skenaariosta riippumatta dieselin ja bensiinin käytön välttäminen kattaa 93 % kaikista päästövähennyksistä. Suuret päästövähennykset johtuvat suuresta biometaanin tuotannosta, johon vaikuttaa prosessin raaka-aineen lisäksi myös merkittävästi melko alhaiseksi (2,5 %) oletettu kalvojalostuksen metaanihäviö. Alhainen metaanihäviö vaikuttaa tuloksiin positiivisesti myös niin, ettei metaania pääse vapautumaan niin paljon ilmaan, jolloin mädätysprosessista aiheutuvat suorat päästöt jäävät alhaisemmaksi. Ensimmäisessä skenaariossa biometaanin hyödyntämisestä saadaan 3 650 t CO₂-ekv/a päästövähennys, josta 79 % kohdistuu kaasukäyttöisille henkilöautoille, joissa vältetään bensiinin käyttöä. Vähennyksistä 14 % kohdistuu jäteautoille, joissa vältetään dieselin käyttöä. Loput biometaanin hyödyntämisestä saadut päästövähennykset saavutetaan muissa raskaammissa ajoneuvoissa, joissa vältetään dieselin käyttöä. Toisessa skenaariossa biometaanin hyödyntämisestä saadaan 3 610 t CO₂-ekv/a päästövähennys, josta 72 % kohdistuu kaasukäyttöisille henkilöautoille, joissa vältetään bensiinin käyttöä. Vähennyksistä 22 % kohdistuu jäteautoille, joissa vältetään dieselin käyttöä. Loput biometaanin hyödyntämisestä saadut päästövähennykset saavutetaan muissa raskaammissa ajoneuvoissa, joissa vältetään dieselin käyttöä. Jos biometaania hyödynnetään koko Etelä-Karjalan Jätehuollon alueen kuiva- ja biojätteen keräyksessä, jäteautoille kohdistuvat päästövähennykset kasvavat 50 % verrattuna

siihen, jos biometaania hyödynnetään vain Lappeenrannan ja Imatran kuiva- ja biojätteen keräyksessä. Tällöin mädätysprosessin kokonaispäästövähennykset pienenevät kuitenkin 1,4 %. Eri skenaariot eroavat toisistaan käytännössä vain siten, kuinka biometaanin hyödyntämisestä saatavat päästövähennykset jakautuvat eri prosessien kesken. Mädätysprosessin kaikista päästövähennyksistä lannoitehyvitykset kattavat vain 6 %, loput saavutetaan urean käytön välttämiseksi. Mädätysprosessin päästövähennykset ovat noin 2,5 kertaiset verrattuna aiheutuneisiin päästöihin, jolloin käsittelymenetelmän nettopäästö jää reilusti negatiiviseksi. Ensimmäisessä skenaariossa nettopäästö on -2 410 t CO₂-ekv/a, kun taas toisessa skenaariossa nettopäästö on -2 380 t CO₂-ekv/a. Yksityiskohtaisemmat numeeriset tiedot mädätysprosessin kasvihuonekaasupäästöistä löytyvät liitteestä 4.

5.3 Tulosten analysointi

Seuraavassa kuvassa 7 on yhteenveto tämän tutkimuksen tuloksista. Kuvassa on esitetty kompostointiprosessin sekä eri skenaarioisten mädätysprosessien vuosittainen ilmaston lämpenemisvaikutus.



Kuva 7. Biojätteen ja puhdistamolietteen kompostoinnin ja mädätyksen vuotuiset ilmaston lämpenemisvaikutukset, kun raakaa biojätettä käsitellään 6 300 t ja puhdistamolietettä käsitellään 13 700 t.

Kuvasta 7 huomataan mädätysprosessista aiheutuvan 13 % enemmän päästöjä kuin kompostointiprosessista. Mädätysprosessissa aiheutuu kuitenkin noin 7,5 kertaiset päästövähennykset verrattuna kompostointiprosessiin. Jotta näitä ilmaston lämpenemisvaikutuksia voidaan hahmottaa paremmin, verrataan niitä suomalaisen hiilijalanjälkeen. Sitra on määrittänyt keskivertosuomalaisen hiilijalanjäljeksi 10 300 kg CO₂-ekv/a (Sitra 2018), joten kompostointiprosessin aiheuttama netto ilmaston lämpenemisvaikutus vastaa 80 suomalaisen vuosittain aiheuttamaa ilmaston lämpenemisvaikutusta. Mädätysprosessin aiheuttama netto päästövähennys vastaa noin 230 suomalaisen vuosittaista ilmaston lämpenemisvaikutusta.

Kun biojätettä ja puhdistamolietettä mädätetään kompostoinnin sijasta, saavutetaan käsitteilymenetelmän muutoksella ensimmäisessä skenaariossa 3 240 t CO₂-ekv/a ja toisessa

skenaariossa 3 210 t CO₂-ekv/a kokonaispäästövähennys. Näiden jätejakeiden käsittelymenetelmän muutoksesta saatu päästövähennys vastaa noin 310 suomalaisen vuosittaista ilmaston lämpenemisvaikutusta. Vaikka kompostointilaitoksella käsiteltävien jätteiden kokonaismäärän ei oleteta merkittävästi muuttuvan uuden biokaasulaitoksen myötä, voidaan kuitenkin arvioida Etelä-Karjalan alueen kokonaispäästöjen laskevan kompostointiprosessin ja mädätysprosessin nettopäästöjen summan verran. Tämä perustuu siihen oletukseen, että kompostointilaitoksella käsiteltävät biojätettä ja puhdistamolietettä korvaavat syötteet on myös aiemmin käsitelty jotenkin, jolloin niiden käsittely Kekkilän kompostointilaitoksessa ei enää lisää Etelä-Karjalan maakunnan kokonaispäästöjä. Uuden biokaasulaitoksen myötä Etelä-Karjalan alueen kokonaispäästöjen voidaan arvioida laskevan tarkasteltavasta skenaariosta riippuen ainakin noin 3 210 t CO₂-ekv/a. Vuonna 2017 Lappeenrannan kuntasektorin kulutusperusteiset kasvihuonekaasupäästöt olivat 301 000 t CO₂-ekv/a, tässä luvussa huomioidaan sähkön ja lämmönkulutus, maatalous, jätehuolto, liikenne sekä muu polttoainekäyttö. (LCA Consulting 2019.) Jos koko Etelä-Karjalan maakunnan päästöt arvioidaan Lappeenrannan kasvihuonekaasupäästöjen mukaan kuntien asukasluokuihin perustuen, olisivat Etelä-Karjalan maakunnan kasvihuonekaasupäästöt noin 528 000 t CO₂-ekv/a. Tähän arvioon verraten biojätteen ja puhdistamolietteen käsittelymenetelmän muutoksella saataisiin vähennettyä Etelä-Karjalan maakunnan kokonaispäästöjä noin 0,6 % arvioidusta vuoden 2017 tasosta.

Tarkastellaan seuraavaksi uuden biokaasulaitoksen vaikutusta pelkästään liikennesektorin päästöihin. Liikenteen päästöjen muutosta laskettaessa tarkastellaan vain biometaanin tuotannolle allokoituvat päästöt sekä vain biometaanin hyödyntämisestä saadut päästöhyvitykset. Koska biometaanin on selkeästi biokaasulaitoksen päätuote, kohdistetaan kaikki biokaasulaitoksen päästöt biometaanille. Kun kuvan 7 tuloksista vähennetään mädätteiden käsittelyyn liittyvät prosessit, kuten mädätteen kuljetus käsittelyyn sekä mädätteen käsittely, saadaan pelkästään biometaanin tuotannon päästöiksi 1 250 t CO₂-ekv/a. Jos mädätteen kuljetus, käsittely ja sen hyödyntämisestä saatavat päästöhyvitykset jätetään tarkastelun ulkopuolelle, olisi biometaanin tuotannon nettopäästö ensimmäisessä skenaariossa -2 400 t CO₂-ekv/a ja toisessa skenaariossa -2 360 t CO₂-ekv/a. Nämä luvut kertovat siis pelkästään liikenne sektorille allokoituvat nettopäästöt, jotka kattavat biometaanin valmistuksen päästöjen lisäksi myös vältetyn dieselin ja bensiinin valmistuksesta ja poltosta aiheutuneet

päästövähennykset. Etelä-Karjalan alueen liikenteen päästöjen voidaan arvioida laskevan skenaariosta riippuen ainakin noin 2 360 t CO₂-ekv/a, joka vastaa noin 230 suomalaisen vuosittaista ilmaston lämpenemisvaikutusta. Vuonna 2017 Lappeenrannan kaupungin liikenteen kasvihuonekaasupäästöt olivat 136 500 t CO₂-ekv/a (LCA Consulting 2019). Jos koko Etelä-Karjalan maakunnan liikenteen päästöjä arvioidaan Lappeenrannan liikenteen päästöjen mukaan kuntien asukasluokuihin perustuen, olisivat Etelä-Karjalan maakunnan liikenteen kasvihuonekaasupäästöt noin 239 000 t CO₂-ekv/a. Tähän arvoon verraten biojätteen ja puhdistamolietteen käsittelyn muutoksella saataisiin vähennettyä Etelä-Karjalan maakunnan liikenteen päästöjä noin 1 % arvioidusta vuoden 2017 tasosta.

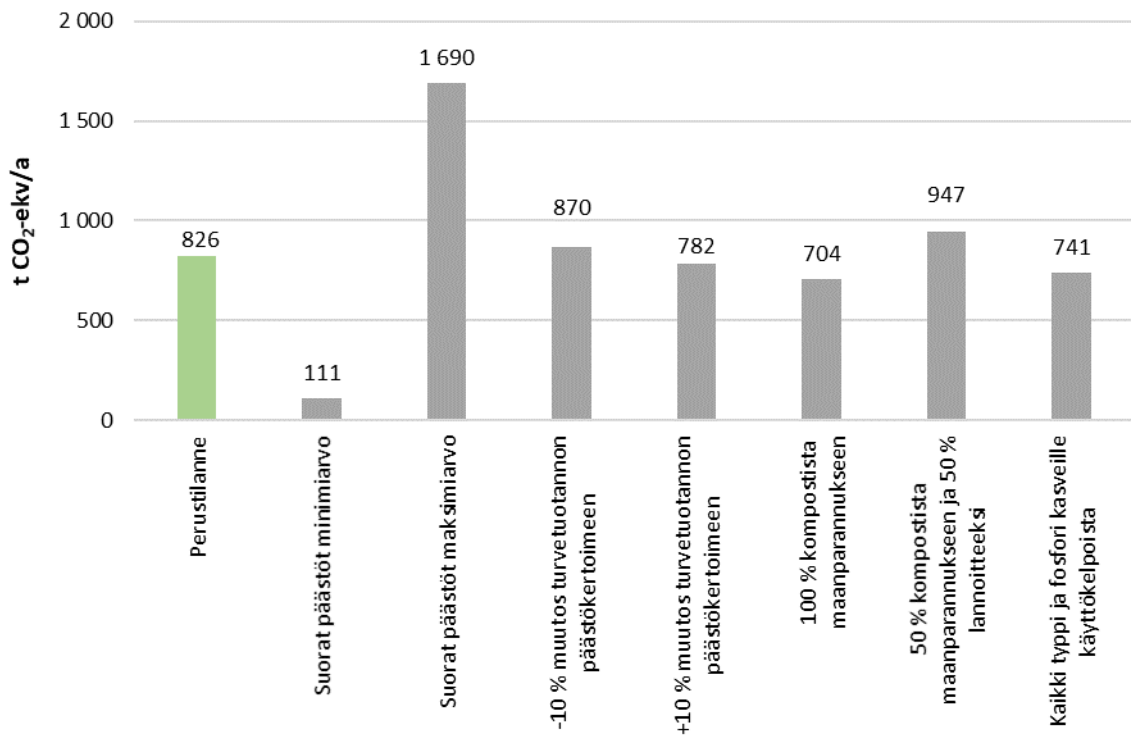
5.4 Herkkyystarkastelu

Herkkyystarkastelu tehdään merkittävimmin kasvihuonekaasupäästöihin vaikuttaville prosesseille. Kun näiden prosessien lähtötietoja tai oletuksia muutetaan, saadaan selville niiden vaikutus kokonaistuloksiin.

5.4.1 Kompostointiprosessi

Kompostointiprosessin osalta eniten kasvihuonekaasupäästöjä todettiin aiheutuvan kompostointilaitoksen suorista metaani- ja typpioksiduulipäästöistä. Boldrin et al. (2009), Myllymaa et al. (2008) ja Virtavuori (2009) tutkimuksiin perustuen metaanipäästöiksi oletettiin 0,9 kg CH₄/t ja typpioksiduulipäästöiksi 0,052 kg N₂O/t. Boldrin et al. (2009) tutkimuksessa biojätteen kompostoinnin metaanipäästöjen esitettiin vaihtelevan laajalla välillä 0,02–1,8 kg CH₄/t ja typpioksiduulipäästöjen vaihtelevan välillä 0,01–0,12 kg N₂O/t. Hyödynnetään herkkyystarkastelussa kompostointilaitoksen suorille päästöille esitettyjä minimi ja maksimi arvoja. Merkittävimpien päästöhyvitysten todettiin aiheutuvan turpeen noston välttämisestä. Turpeen noston päästökertoimeksi esitettiin aiemmin 14,4, g CO₂-ekv/MJ, joten tehdään herkkyystarkastelu turpeen noston päästöille, jolloin päästökertoimen oletetaan olevan ± 10 % perustilanteen päästöarvosta. Tällöin päästökerroin olisi 12,96 g CO₂-ekv/MJ sekä 15,84 g CO₂-ekv/MJ. Perustilanteessa määritettiin, että 75 % muodostuvasta kompostista hyödynnettäisiin maanparannusaineena korvaamaan turvetta ja 25 % hyödynnettäisiin lannoitteena. Tuloksista huomattiin kompostin maanparannuskäytöllä saavutettavan suhteellisesti

suuremmat päästöhyvitykset kuin kompostin lannoitekäytöllä. Tarkastellaan herkkyystar-
kastelussa tilannetta, jossa puolet muodostuvasta kompostista hyödynnettäisiin maanparan-
nusaineena ja puolet lannoitteena. Tarkastellaan myös tilannetta, jossa muodostuva kom-
posti hyödynnettäisiin kokonaisuudessaan maanparannusaineena. Koska laskennassa oli
epävarmuutta siitä, kuinka paljon kompostin sisältämistä ravinteista kasvit voivat todellisu-
udessa hyödyntää, tehdään myös epätodellinen tarkastelu tilanteelle, jossa kaikki lannoitteena
hyödynnettävän kompostin (25 % kokonaiskompostista) typpi ja fosfori olisi kasveille käyt-
tökelpoisessa muodossa. Tämä auttaa hahmottamaan näiden oletusten merkittävyyttä,
vaikka tilanne ei todellinen olekaan. Seuraavassa kuvassa 8 on tehty herkkyystar-
kastelun suorille metaani- ja typpioksiduulipäästöille, turpeen noston päästökertoimelle,
kompostin hyödyntämiselle sekä ravinteiden käyttökelpoisuudelle.



Kuva 8. Kompostointiprosessin parametrien herkkyystar-
kastelu.

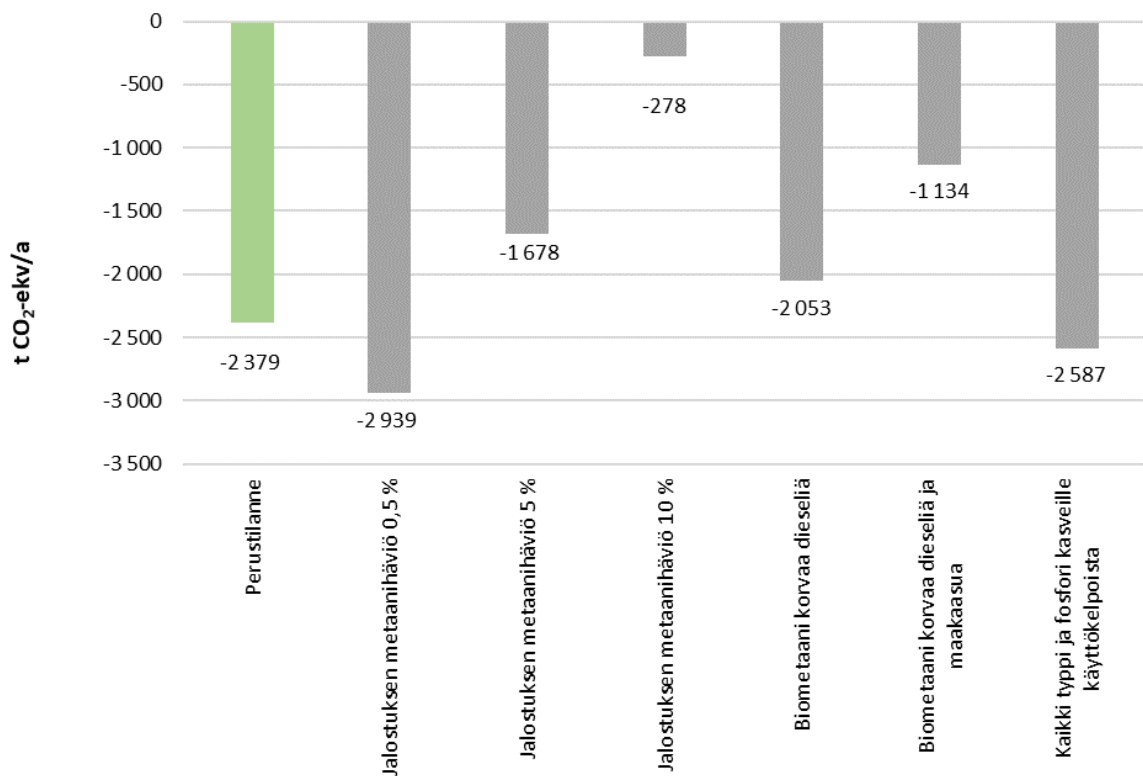
Kompostointilaitoksen suorille metaani- ja typpioksiduulipäästöille esitetyn vaihteluvälin
ollessa näin laaja, aiheutuu näiden parametrien muuttamisesta herkkyystar-
kastelun suurin vaihtelu. Jos kompostointilaitoksen suorat päästöt olisi laskettu minimiarvojen mukaan, olisi

kompostoinnin suorat päästöt enää noin 8 % alkuperäisistä päästöistä, jolloin nettopäästöt pienenevä jopa 87 %. Jos kompostointilaitoksen suorat päästöt olisi laskettu maksimiarvojen mukaan, olisi kompostoinnin suorat päästöt sekä nettopäästöt noin kaksinkertaiset verrattuna perustilanteeseen. Tämä tarkastelu osoittaa, että oletetulla kompostointilaitoksen suorilla metaani- ja typpioksiduulipäästöillä on suuri merkitys tuloksiin. Kuvasta 8 huomataan, ettei turvetuotannon päästökertoimen muutoksella ole kokonaisuuden kannalta kriittistä merkitystä. Jos muodostunut komposti hyödynnettäisiin kokonaisuudessaan maanparannusaineena ja sillä vältettäisiin turpeen nostoa, saavutettaisiin sillä 15 % vähemmän päästöjä verrattuna perustilanteeseen. Jos kaikki lannoitteena hyödynnettävän kompostin sisältämä typpi ja fosfori olisi kasveille käyttökelpoista, saavutettaisiin perustilanteeseen nähden 10 % vähemmän päästöjä. Päästöt eivät laskisi tämän enempää, vaikka tämä olisi lannoitehyvitysten kannalta paras mahdollinen tilanne. Tämän tilanteen ollessa kuitenkin kaukana todellisuudesta, voidaan todeta ravinteiden hyödyntämisestä tehtyjen oletusten olevan tämän työn kannalta riittävät.

5.4.2 Mädätysprosessi

Mädätysprosessin osalta eniten kasvihuonekaasupäästöjä todettiin aiheutuvan suorista metaanipäästöistä, jotka koostuvat biokaasun jalostuksesta aiheutuvista metaanihäviöistä. Sun et al. (2015) selvityksessä todetaan kalvojalostuksen metaanihäviöiden vaihtelevan laajasti välillä 0,5–20 vol-%. Keskimäärin edellä mainitussa tutkimuksessa esitetyt kalvojalostuksen metaanihäviöt olivat noin 10 % luokkaa, tämän tutkimuksen perustilanteessa jalostuksen metaanihäviöiksi oletettiin kuitenkin vain 2,5 %. Tehdään herkkyystarkastelu nyt 0,5 %, 5 % ja 10 % metaanihäviöille. Kun metaanihäviöiden herkkyyttä tutkitaan, muuttuvat suorien päästöjen lisäksi myös prosessista saadut päästövähennykset, sillä hyödynnettävän biometaanin määrä muuttuu metaanihäviöiden myötä. Tutkitaan herkkyystarkastelussa myös vaihtoehtoja sille, mitä polttoainetta biometaanilla korvaisi. Perustilanteessa biometaanilla korvataan dieselin käyttöä jäteautoissa ja raskaammissa ajoneuvoissa sekä bensiinin käyttöä henkilöautoissa. Tehdään herkkyystarkastelu tilanteelle, jossa biometaanilla korvataan dieselin käyttöä kaikissa ajoneuvoissa. Tarkastellaan tämän lisäksi vielä tilannetta, jossa biometaanilla korvataan dieselin käyttöä jäteautoissa ja raskaammissa ajoneuvoissa sekä maakaasun käyttöä henkilöautoissa. Koska myös mädätysprosessin osalta oli epävarmuutta

mädätysjäännöksen sisältämien ravinteiden hyödynnettävyydestä, tehdään epätodellinen tarkastelu tilanteelle, jossa kaikki lannoitteena hyödynnettävän mädätteen ja nestejakeen typpi ja fosfori olisi kasveille käyttökelpoisessa muodossa. Seuraavassa kuvassa 9 on tehty herkkyystarkastelu mädätysprosessin jalostuksen metaanihäviöille, biometaanin hyödyntämiselle sekä mädätysjäännöksen ravinteiden käyttökelpoisuudelle. Herkkyystarkastelu on tehty nyt vain skenaarion kaksi tuloksille.



Kuva 9. Mädätysprosessin parametrien herkkyystarkastelu.

Kuvasta 9 huomataan biokaasun jalostuksen metaanihäviöiden vaikuttavan kriittisesti mädätysprosessin nettopäästöihin. Jos jalostuksen metaanihäviö on 0,5 %, nettopäästövähennys kasvaa 24 %. Kun metaanihäviöt ylittävät 10 %, lähestytään tilannetta, jossa mädätysprosessista aiheutuisi enemmän päästöjä, kuin siitä saataisiin päästövähennyksiä. Näin suuri metaanihäviö laskee huomattavasti hyödynnettäväksi jäävän biometaanin määrää, jolloin saadut päästövähennykset pienenevät merkittävästi. Biometaanin hyödyntämisen osalta suurimmat päästövähennykset saavutetaan perustilanteessa, jossa biometaanilla vältetään bensiinin ja dieselin käyttöä. Jos biometaanilla vältetään kokonaisuudessaan dieselin käyttöä,

nettopäästövähennys pienenee perustilanteeseen nähden 14 %. Jos biometaanilla vältetään maakaasun käyttöä henkilöautoissa, nettopäästövähennys pienenee perustilanteeseen nähden 52 %. Jos kaikki lannoitteena hyödynnettävän mädätysjäätännöksen sisältämä typpi ja fosfori olisi kasveille käyttökelpoista, kasvaisi nettopäästövähennys perustilanteeseen nähden 9 %. Nettopäästövähennys ei kasvaisi tämän enempää, vaikka tämä olisi lannoitehyvitusten kannalta paras mahdollinen tilanne. Tämän tilanteen ollessa kuitenkin kaukana todellisuudesta, voidaan todeta ravinteiden hyödyntämisestä tehtyjen oletusten olevan tämän työn kannalta riittävät. Sen sijaan biokaasun jalostuksen metaanihöviöillä on tuloksiin erittäin kriittinen vaikutus. Pienikin muutos jalostuksen metaanihöviöissä vaikuttaa tuloksiin huomattavasti, joten tällä parametrilla on suurin herkkyys. Tuloksiin vaikuttaa merkittävästi myös biometaanin hyödyntäminen, eli minkä polttoaineen käyttöä sillä vältetään.

5.5 Tulosten vertailu

Seuraavaksi vertaillaan tässä työssä saatuja mädätysprosessin tuloksia muihin vastaavanlaisiin biometaanin tuotannon elinkaariarviointien tuloksiin. Kappaleessa 3.2 tutustuttiin erilaisiin kansainvälisiin biometaanin tuotannosta tehtyihin elinkaariselvityksiin. Näiden tutkimusten läpikäymisen yhteydessä todettiin tutkimusten vertailun toisiinsa olevan hankalaa, paikoin jopa mahdotonta. Selvitykset on tehty eri raaka-aineille ja laitostekniikoille eri maantieteellisillä alueilla, jolloin eri selvitykset ovat keskenään heikosti vertailukelpoisia. Vertailtavuuteen vaikuttaa myös tutkimusten erilaiset rajaukset ja oletukset, jolloin myös samaa raaka-ainetta ja laitostekniikkaa käsitteleviä selvityksiä ei voi enää täysin verrata toisiinsa. Koska tässä tutkimuksessa on tarkasteltu biojätteen ja puhdistamolietteen käsittelyä, tehdään tulosten vertailu aikaisemmin taulukossa 3 esitettyihin tutkimuksiin, jotka on tehty biojätteelle. Nämä biojätteen mädätystä koskevat elinkaariarvioinnit ja niiden tulokset ovat koottuna seuraavaan taulukkoon 11.

Taulukko 11. Biometaanin tuotannosta aiheutuvia kasviuonekaasupäästöjä, kun raaka-aineena on biojäte. Kasviuonekaasupäästöt on esitetty yksikössä g CO₂-ekv/MJ.

Raaka-aine	Tuotanto ja kuljetus	Mädätys	Jalostus	Tuotteiden käsittely	Yhteensä	Lähde
Yhdyskuntien orgaaninen jäte	5	4	6	3	18	Börjesson & Berglund 2006
Biojäte	7	11	23	4	45	Pertl et al. 2010
Biojäte	3	6	3	10	22	Uusitalo et al. 2014

Tarkempia tietoja taulukossa 11 esitetyistä tutkimuksista ja niiden rajauksista löytyy kappa-leesta 3.2. Seuraavassa taulukossa 12 esitetään tämän tutkimuksen tulokset yksikössä g CO₂-ekv/MJ. Tulokset on karkeasti jaoteltu taulukon 11 mukaisiin prosesseihin.

Taulukko 12. Mädätysprosessista aiheutuvat kasviuonekaasupäästöt, kun raaka-aineena on biojäte (6300 t) ja puhdistamoliete (13 700 t) ja biometaania tuotetaan 42 120 000 MJ. Kasviuonekaasupäästöt on esitetty yksikössä g CO₂-ekv/MJ.

Raaka-aine	Tuotanto ja kuljetus	Mädätys	Jalostus	Tuotteiden käsittely	Yhteensä
Biojäte ja puhdistamoliete	-	15	14	7	36

Tähän tutkimukseen ei ole sisällytetty raaka-aineiden kuljetuksesta aiheutuneita päästöjä, sillä tavoitteena oli vertailla käsittelymenetelmien ympäristövaikutuksia, jolloin raaka-aineiden kuljetuksen huomioimisella ei ollut merkitystä sen pysyessä vakiona käsittelymenetelmien välillä. Mädätyksen, jalostuksen ja tuotteiden käsittelystä aiheutuvat päästöt ovat yhteensä 36 g CO₂-ekv/MJ. Mädätyksen päästöt sisältävät sähkönkulutuksen, apusyötteiden valmistuksen ja kuljetuksen sekä työkoneiden käytön. Jalostuksen päästöissä on huomioitu vain metaanihöviöt, tämä ei sisällä jalostuksen energiankulutusta. Tuotteiden käsittely sisältää biometaanin kuljetuksen tankkausasemille, mädätteiden kuljetuksen käsittelyyn sekä mädätteiden käsittelyyn.

Taulukossa 11 esitettyjen vertailututkimusten kasviuonekaasupäästöt vaihtelevat välillä 18–45 g CO₂-ekv/MJ, jolloin näiden keskiarvo on 28 g CO₂-ekv/MJ. Tässä tutkimuksessa

laskettu mädätysprosessin ilmaston lämpenemisvaikutus osuu hyvin tälle vaihteluvälille, mutta se on kuitenkin muiden vertailututkimusten keskiarvoa huomattavasti suurempi, vaikka raaka-aineiden kuljetusta ei tässä ole otettu huomioon. Jos taulukon 11 tuloksissa ei huomioida raaka-aineiden kuljetusta, saataisiin kasvihuonekaasupäästöjen keskiarvoksi 23 g CO₂-ekv/MJ, jolloin tässä tutkimuksessa saadut tulokset eroavat vertailututkimusten tuloksista entistä enemmän.

Jos tutkimuksessamme saatuja mädätyksen päästöjä verrataan olemassa oleviin tutkimuksiin, huomataan sen olevan kaksinkertainen vertailututkimusten keskiarvoon verrattuna. Mädätyksen aikaisiin päästöihin vaikuttaa muun muassa mädätystekniikka sekä biokaasun puhautudelle asetettu taso. Kaikissa taulukon 11 tutkimuksissa mädätyksen päästöt sisältävät energiankulutuksesta aiheutuneet päästöt. Tutkimassamme laitoksessa pelkästään energiankulutuksen päästöiksi saadaan 12 g CO₂-ekv/MJ, jolloin se on hieman lähempänä vertailututkimusten keskiarvoa. Koska tarkasteltava biokaasulaitos ei ole vielä toiminnassa, perustuu laitoksen energiankulutus arvioon, joka aiheuttaa tuloksiin epävarmuutta.

Vertailututkimuksissa jalostuksesta aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen keskiarvo on 11 g CO₂-ekv/MJ. Börjesson & Berglund (2006) tutkimuksessa huomioitiin kuitenkin vain jalostuksen energiankulutuksesta aiheutuneet päästöt, eli siinä ei ole huomioitu sen aikana aiheutuvia metaanihäviöitä. Tällöin tämän vertailututkimuksen jalostuksen päästöt jäävät luonnollisesti tutkimuksemme päästöjä huomattavasti pienemmäksi. Pertl et al. (2010) tutkimuksessa on esitetty päästöjä eri jalostustekniikoille. Taulukossa 11 esitetty päästö 23 g CO₂-ekv/MJ aiheutuu PSA jalostuksen seurauksena. Jos jalostustekniikka olisi sama kuin tämän tutkimuksen laitoksessa (kalvojalostus), olisi jalostuksen päästö tämän vertailututkimuksen mukaan lähes 38–39 g CO₂-ekv/MJ. Tässä vertailututkimuksessa esitetty jalostuksen päästö on jo lähes kolminkertainen verrattuna tämän tutkimuksen tuloksiin. Uusitalo et al. (2014) tutkimuksessa jalostuksen kasvihuonekaasupäästöt koostuvat amiinipesun energiankulutuksesta, mutta siinä on huomioitu myös metaanihäviöt. Jalostuksen päästöt ovat todella voimakkaasti riippuvaisia jalostustekniikasta sekä halutusta biometaanin metaanipitoisuudesta, joten tämän parametrin vertaileminen on todella haasteellista. Tutkimuksessamme saatu jalostuksen päästö osuu kuitenkin hyvin vertailututkimusten vaihteluvälille.

Vertailututkimuksissa tuotteiden käsittelystä aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen keskiarvo on 6 g CO₂-ekv/MJ. Tutkimuksessamme suurin osa tuotteiden käsittelyn päästöistä koostuu mädätteiden käsittelystä, joita ei missään vertailututkimuksissa ole huomioitu ollenkaan. Tuotteiden käsittelyn osalta tutkimuksemme ja vertailututkimusten rajaukset ovat niin erilaiset, ettei niiden vertailu ole järkevää. Näiden arvojen voidaan kuitenkin todeta olevan samassa suuruusluokassa keskenään.

Kuten aiemmin mainittiin, näiden tutkimusten tarkka vertailu on mahdotonta, sillä laitostekniikka ja tarkasteluun sisällytetyt prosessit eroavat toisistaan. Tulosten vertailusta voidaan kuitenkin huomata tutkimuksemme tulosten olevan samaa suuruusluokkaa vertailututkimusten tulosten kanssa, joka lisää tulosten luotettavuutta.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa tarkoituksena oli määrittää Etelä-Karjalan Jätehuollon omistaman uuden biokaasulaitoksen vaikutus ilmaston lämpenemiseen. Tutkimuksessa perehdyttiin siihen, kuinka paljon biojätteen ja puhdistamolietteen käsittelymenetelmän muutoksella voidaan saada vähennettyä Etelä-Karjalan maakunnan kasvihuonekaasupäästöjä. Tämän lisäksi arvioitiin myös sitä, kuinka paljon liikennesektorin kasvihuonekaasupäästöjä saataisiin vähennettyä Etelä-Karjalan alueella.

Kun tutkittiin uuden biokaasulaitoksen vaikutusta biojätteen ja puhdistamolietteen käsittelyn kasvihuonekaasupäästöihin, täytyi ilmaston lämpenemispotentiaalit määrittää sekä vanhalle (kompostointiprosessi) että uudelle (mädätysprosessi) käsittelylle. Kompostointiprosessin ilmaston lämpenemisvaikutus määritettiin, sillä uuden biokaasulaitoksen myötä raakaa biojätettä ja puhdistamolietettä ei enää kompostoida, jolloin näiden jätejakeiden käsittelyn kasvihuonekaasupäästöt vähenevät kompostointiprosessin nettopäästön verran. Mädätysprosessista aiheutuu myös kasvihuonekaasupäästöjä, jotka ovat jopa kompostointiprosessin päästöjä korkeammat. Biojätteen ja puhdistamolietteen mädätyksen seurauksena saadaan kuitenkin tuotettua niin paljon biometaania, jolloin saadaan kompostointiprosessiin verrattuna moninkertaiset päästövähennykset. Biojätteen ja puhdistamolietteen käsittelymenetelmän muutoksen vaikutus Etelä-Karjalan maakunnan kasvihuonekaasupäästöihin saatiin laskettua kompostointiprosessin ja mädätysprosessin nettopäästöjen summana. Jos biometaania hyödynnettäisiin koko Etelä-Karjalan Jätehuollon toiminta-alueen kuiva- ja biojätteenkeräyksessä sekä muissa diesel- ja bensiinikäyttöisissä ajoneuvoissa, uuden biokaasulaitoksen myötä Etelä-Karjalan maakunnan kokonaispäästöjä saataisiin vähennettyä 3 210 t CO₂-ekv/a. Tämä vastaa noin 310 suomalaisen kokonaisvuosipäästöjä. Sitran tutkimuksen mukaan keskimääräisen suomalaisen liikkuminen henkilöautolla aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä 2 240 kg CO₂-ekv/a (Sitra 2018), tämä jätteiden käsittelymenetelmän muutoksen aiheuttama päästövähennys vastaa siis noin 1 430 suomalaisen henkilöautoilusta aiheutuvia vuosipäästöjä.

Kun mädätysprosessissa huomioidaan vain biometaanin valmistuksen ja sen hyödyntämisen päästöt, saadaan liikennesektorille kohdistuvat päästövähennykset. Biometaanin

hyödyntämisen myötä Etelä-Karjalan liikenteen päästöjä voitaisiin vähentää 2 360 t CO₂-ekv/a. Tämä perustuu oletukseen, jossa 24 % tuotetusta biometaanista hyödynnettäisiin jäteautoissa (vältetään dieseliä), 69 % hyödynnettäisiin henkilöautoissa (vältetään bensiiniä) ja 7 % hyödynnettäisiin muissa raskaimmissa ajoneuvoissa (vältetään dieseliä).

Biojätteen ja puhdistamolietteen käsittelymenetelmän muutoksella on positiivisia vaikutuksia ympäristöön, sillä näillä orgaanisilla jätejakeilla on merkittävää biometaanin tuottopotentiaalia, joka kannattaa ehdottomasti hyödyntää. Kompostointiin verrattuna mädätyksestä saatavat ympäristöhyödyt perustuvatkin juuri biometaanin tuotantoon ja sen tehokkaaseen hyödyntämiseen. Koska liikenteen käyttövoimana käytetään pääosin fossiilisia polttoaineita kuten bensiiniä tai dieseliä, on liikennesektorilla suuri biometaanin hyödyntämispotentiaali. Kun biometaania hyödynnetään liikennepolttoaineena, saadaan vältettyä fossiilisten polttoaineiden valmistuksesta sekä poltosta aiheutuvia päästöjä.

Ilmaston lämpenemispotentiaalin kannalta ei ole niin merkittävää, millaisissa ajoneuvotyypeissä biometaania hyödynnetään. Ajoneuvoa merkittävämpää on se, mitä polttoainetta biometaanilla korvataan. Bensiinin käytön välttämisestä saadaan suuremmat ympäristöhyödyt kuin dieselin käytön välttämisestä, koska bensiinin palamisesta aiheutuu ajokilometriä kohden suuremmat kasvihuonekaasupäästöt. Lisäksi käyttövoimanaan bensiiniä käyttävä henkilöauto kuluttaa ajokilometriä kohden enemmän polttoainetta kuin dieselauto, jolla on siten vaikutusta polttoaineen tuotannosta aiheutuviin päästöihin. Tämän takia mädätysprosessin ensimmäisessä skenaariossa saadaan suuremmat päästövähennykset, sillä siinä biometaanilla on korvattu enemmän bensiinin käyttöä kuin mädätysprosessin toisessa skenaariossa, jossa biometaania hyödynnetään enemmän jäteautoissa. Koska ilmaston lämpenemispotentiaalien ero mädätysprosessien eri skenaarioiden välillä on niin vähäinen ensimmäisen skenaarion hyväksi, voisi biometaanin hyödynnettävyyden kannalta toinen skenaario nousta ensimmäistä paremmaksi. Koska kaasuautokanta ei ole Suomessa vielä niin suuri, ei voida antaa takuita tämän tuotetun biometaanin kysynnälle liikennepolttoaineena. Biometaanin kaupallisen tuotannon alkaessa, täytyy kiinnittää huomiota biometaanin ympäristöhyötyjen sekä uusien tankkausasemien markkinointiin. Jos biometaania hyödynnettäisiin jäteautoissa niin paljon kuin mahdollista, olisi biometaanille varmaa menekkiä, mutta se myös lisäisi kaasuautojen sekä biometaanin hyödyntämisen näkyvyyttä. Kaasukäyttöiset jäteautot

olisivat näkyvä osa katukuvaa, joka voisi motivoida kuntalaisia investoimaan uuteen kaasuautoon tai muuttamaan oman bensiinikäyttöisen autonsa hybridiautoksi, joka toimisi myös kaasulla. Bensiinikäyttöisen auton muuttaminen kaasukäyttöiseksi hybridiautoksi ei vaadi niin merkittävää investointia kuin uuden kaasuauton ostaminen, joten tätä vaihtoehtoa voisi nostaa enemmän esille biometaanin markkinoinnissa.

Etelä-Karjalan Jätehuollon uuden biokaasulaitoksen arvioidaan tuottavan vuodessa 1 170 000 m³ liikennepolttoaineena hyödynnettävää biometaania. Jos biometaania hyödynnetään Etelä-Karjalan Jätehuollon koko toiminta-alueen kuiva- ja biojätteen keräyksessä, jätteenkeräys kuluttaisi tuotetusta biometaanista 24 %. Jäteautoilta käyttämättä jääneestä biometaanista 91 % arvioitiin hyödynnettävän henkilöautoissa ja 9 % muissa raskaissa ajoneuvoissa. Näihin tietoihin perustuen henkilöautoissa voitaisiin siis hyödyntää kaikesta tuotetusta biometaanista noin 69 % eli 809 500 m³. Jos oletetaan kaasuauton kulutukseksi 4 kg/100 km (VTT 2017b) ja yhdellä henkilöautolla vuosittain ajettavaksi määräksi 14 000 km (Lahtinen 2018), voitaisiin tällä tuotetulla biometaanimäärällä kattaa jopa 1 040 henkilöauton vuosittainen biometaanin kulutus. Biokaasulaitoksella tuotetulla biometaanilla olisi siis kapasiteettia lisätä Etelä-Karjalan alueelle 1 040 uutta kaasukäyttöistä henkilöautoa joidenkin jäteautojen ja raskaampien ajoneuvojen lisäksi. Vuoden 2020 alussa Suomessa oli 10 466 kaasukäyttöistä henkilöautoa (Kaasuautoilijat ry 2020 alkuperäinen lähde: Traficom), joten tällä investoinnilla olisi potentiaalia kasvattaa kaasukäyttöisten henkilöautojen määrää Suomessa jopa 10 %.

Etelä-Karjala on Hinku-maakuntana sitoutunut ilmastonmuutoksen hillitsemiseen, joten se on hyvin ympäristötietoista aluetta. Biometaanin onnistuneen markkinoinnin seurauksena on täysin mahdollista, että Kukkuroinmäen uuden biokaasulaitoksen myötä kaasuautojen määrää saataisiin Etelä-Karjalassa merkittävästi kasvatettua ja biokaasulaitoksella tuotettu biometaani näin ollen kokonaisuudessaan hyödynnettyä liikennepolttoaineena.

7 YHTEENVETO

Tämä diplomityö tehtiin Etelä-Karjalan Jätehuollon toimeksiantona. Tässä työssä tavoitteena oli selvittää Etelä-Karjalan Jätehuollon uuden biokaasulaitoksen vaikutus Etelä-Karjalan maakunnan kasvihuonekaasupäästöihin sekä Etelä-Karjalan liikennesektorin kasvihuonekaasupäästöihin. Nämä tavoitteet saavutettiin tutkimalla vanhan (kompostointiprosessi) ja uuden (mädätysprosessi) biojätteen ja puhdistamolietteen käsittelymenetelmän ympäristövaikutuksia ilmaston lämpenemispotentiaalin näkökulmasta.

Liikennesektorilla on paljon päästövähennyspotentiaalia, joten fossiilisten polttoaineiden käyttöä pyritään vähentämään ja niitä korvaamaan biopolttoaineilla. Biokaasulaitoksissa tuotettu biometaani soveltuu liikennepolttoaineeksi korvaamaan fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Biometaanin tuotannon ympäristövaikutuksia voidaan tutkia elinkaariarvioinnin avulla, mutta tämän työn teoriaosassa havaittiin eri elinkaariarviointien tulosten huono vertailtavuus toisiinsa. Biokaasulaitosten elinkaariarvioinneissa tuloksiin vaikuttaa merkittävästi muun muassa raaka-aine ja sen ominaisuudet, laitostekniikka sekä tuotosten hyödyntäminen. Lisäksi eri tutkimuksissa on usein käytetty hieman erilaisia rajauksia ja oletuksia, jolloin tutkimuksen tulokset kertovat vain kyseisestä tapauksesta. Tässä työssä tutkimusmenetelmänä käytettiin standardeihin ISO 14040 ja ISO 14044 perustuvaa elinkaariarviointia, joka toteutettiin GaBi-elinkaarimallinnusohjelmalla. Elinkaariarviointit tehtiin kompostointiprosessille sekä mädätysprosessille vuoden 2020 keväällä kerättyihin inventaariotietoihin perustuen.

Biojätteen ja puhdistamolietteen mädätys aiheuttaa moninkertaisesti vähemmän nettopäästöjä kuin niiden kompostointi. Uuden biokaasulaitoksen myötä Etelä-Karjalan maakunnan kokonaispäästöjä olisi mahdollista saada vähennettyä ainakin 3 210 t CO₂-ekv/a, joka vastaa 310 suomalaisen kokonaisvuosipäästöjä. Liikenteen päästöjä voitaisiin vähentää ainakin 2 360 t CO₂-ekv/a, joka vastaa 230 suomalaisen kokonaisvuosipäästöjä. Jos tuotetusta biometaanista 69 % hyödynnettäisiin henkilöautoissa korvaamaan bensiinin käyttöä, olisi tällä potentiaalia lisätä liikenteeseen 1 040 uutta kaasukäyttöistä henkilöautoa. Tämä määrä kasvattaisi kaasukäyttöisten henkilöautojen määrää Suomessa jopa 10 % verrattuna vuoden 2020 alun kaasuautokantaan. Todellisuudessa uudella biokaasulaitoksella tuotetun

biometaanin liikennekäytön myötä kaasuautokantaa voitaisiin lisätä tätäkin enemmän, sillä 31 % tuotetusta biometaanista hyödynnetään raskaammissa ajoneuvoissa. Tässä työssä ei kuitenkaan otettu kantaa siihen, kuinka paljon tuotetulla biometaanilla olisi kapasiteettia lisätä kaasuautojen määrää muissa ajoneuvotyypeissä.

Biokaasulaitoksen toiminnalla voisi olla potentiaalia myös laskettua suuremmille päästövähennyksille. Suurin päästövähennysten kasvattamispotentiaali kohdistuisi todennäköisesti mädätysjäännökselle. Biokaasulaitoksessa syntyvää kiintojaetta eli mädätettä on ajateltu hyödynnettävän lannoitteena, jolloin sillä voitaisiin välttää teollisten lannoitteiden käyttöä. Jos mädätettä ei enää erikseen kompostoitaisi, ei mädätteen käsittely aiheuttaisi näin paljon päästöjä, jolloin nettopäästövähennyksiä saataisiin enemmän. Tällöin myös hyödynnettäviä ravinteista säilyisi mädätteessä enemmän, jolloin lannoitehyvitysten määrä voisi olla hieman suurempi. Tätä enemmän päästövähennyksiä voitaisiin kuitenkin saavuttaa, jos mädäte hyödynnettäisiin maanparannusaineena ravinnehyötykäytön sijasta. Kompostointiprosessin ilmaston lämpenemisvaikutusta laskettaessa huomattiin kompostin maanparannuskäytöllä saavutettavan suhteellisesti ravinnehyötykäyttöä suuremmat päästövähennykset. Tämä perustui siihen oletukseen, että kompostilla vältettäisiin turpeen nostoa. Jos biokaasulaitoksen mädäte hyödynnettäisiin maanparannusaineena ja sillä voitaisiin välttää turpeen nostamista, saavutettaisiin sillä todennäköisesti huomattavasti enemmän päästövähennyksiä kuin jos mädäte hyödynnettäisiin lannoitteena. On kuitenkin vaikea arvioida, olisiko tämä muutos nettopäästöihin merkittävä, mutta vaihtoehtoisia mädätysjäännöksen hyödyntämismenetelmiä kannattaa tulevaisuudessa vertailla.

Toisella biokaasulaitoksen tuotteella biometaanilla ei arvioida olevan niin merkittävää päästövähennysten kasvattamispotentiaalia kuin mädätysjäännöksellä. Tämä johtuu siitä, että biometaania hyödynnetään liikennepolttoaineena ja laskennassa sen on oletettu korvaavan fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Biometaanin osalta suurempia päästövähennyksiä voidaan saavuttaa oikeastaan vain tuottamalla enemmän liikennepolttoaineena hyödynnettävää biometaania. Tämä voisi olla mahdollista erilaisella biokaasun jalostustekniikalla, josta aiheutuisi vähemmän metaanihäviöitä. Tätä vaihtoehtoa on kuitenkin turha pohtia sen enempää, sillä uusi jalostustekniikka vaatisi uusia merkittäviä investointeja.

Suurempia päästövähennyksiä voitaisiin saavuttaa myös esimerkiksi biokaasusta erotetun hiilidioksidin hyödyntämisellä. Hiilidioksidia voisi hyödyntää esimerkiksi polttoaineiden raaka-aineena tai kasvihuoneen lannoitteena. Hiilidioksidin hyötykäytöllä voitaisiin saavuttaa myös taloudellista hyötyä.

Tämän työn lopputulosten kannalta merkittävää oli oletus, jossa tuotetun biometaanin ajateltiin korvaavan bensiinin sekä dieselin käyttöä. Jos biometaanin olisi oletettu korvaavan osittain myös maakaasun käyttöä, olisi se vaikuttanut laskennan tuloksiin merkittävästi vähentäen mädätysprosessista saatavia nettopäästöhyvityksiä noin puolella. Merkittävä vaikutus oli myös oletuksilla liittyen kompostointiprosessin suoriin päästöihin sekä biokaasun jalostuksen metaanihäviöihin.

Yksi suurimmista epävarmuuksista aiheutunee kuitenkin biokaasulaitoksen lähtöarvojen epätarkkuudesta. Mädätysprossin numeeriset lähtöarvot ovat epätarkkoja, sillä tämä työ on toteutettu ennen laitoksen kaupallista käyttöönottoa. Mädätysprosessin osalta laskennassa hyödynnettiin parhaisiin arvioihin perustuvia lähtöarvoja, jolloin esimerkiksi todellinen biokaasulaitoksella kulutetun energian määrä ja tuotetun biokaasun määrä voi hieman poiketa arvioidusta.

LÄHTEET

Adelt, Marius et al. 2011. LCA of biomethane. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 3(2011): 646–650.

Alakangas, Eija et al. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Tampere: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 229s. ISBN 978-951-38-8419-2.

Angelidaki, Irini et al. 2018. Biogas Upgrading and Utilization: Current Status and Perspectives. *Biotechnology Advances* 36(2): 452-66.

Bernstad, Jansen et al. 2012. Review of comparative LCAs of food waste management systems – Current status and potential improvements. *Waste Management* 32(2012):2439–2455.

Boldrin, Alessio et al. 2009. Composting and compost utilization: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research* 2009: 27:800–812.

Buratti, Cinzia et al. 2013. Assessment of GHG emissions of biomethane from energy cereal crops in Umbria, Italy. *Applied Energy* 108(2013): 128–136.

Börjesson, Pål & Berglund, Maria. 2006. Environmental systems analysis of biogas systems – Part I: Fuel-cycle emissions. *Biomass and Bioenergy* 30(2006): 469–485.

Chiu, Sam et al. 2016. Reviewing the anaerobic digestion and co-digestion process of food waste from the perspectives on biogas production performance and environmental impacts. *Environmental Science and Pollution Research* 23(2016):24435–24450.

Ecochain. Impact Categories (LCA) – Overview. [Verkkosivu]. [Viitattu 1.6.2020]. Saatavissa: <https://ecochain.com/knowledge/impact-categories-lca/>

European Commission. Climate action. EU Action. 2030 climate & energy framework. [Verkkosivu]. [Viitattu 19.3.2020] Saatavissa: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en

Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy. 2017. Kuivamädätyslaitoksen sekä biokaasun jalostus- ja tankkausaseman suunnittelu ja KVR-urakka. KVR-urakan suunnitteluperusteet.

Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy. 2018. Vuosikertomus 2018. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 8.4.2020]. Saatavissa: https://indd.adobe.com/view/05fac4d1-d0b2-41d3-8ed0-ff5e47b15aaf_s.4

Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy. 2019a. Biokaasulaitoksen ympäristöluvan ESAVI/6316/2016 mukainen selvitys mädätteen ja rejektiveden käsittelystä sekä asetettavasta vakuudesta.

Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy. 2019b. Biokaasulaitos. Kukkuroinmäen biokaasulaitos – polttoainetta paikallisista jätteistä. [Verkkosivu]. [Viitattu 27.3.2020]. Saatavissa: <https://www.ekjh.fi/index.php/biokaasulaitos-2/>

Etelä-Suomen aluehallintovirasto. 2014. Päätös Nro 64/2014/1.

Etelä-Karjalan liitto. Tietopalvelu. Karttapankki. [Verkkosivu]. [Viitattu 17.4.2020]. Saatavissa: <http://demo.ekarjala.com/www.ekarjala.fi/htdocs/liitto/tietopalvelu/karttapankki/>

Huttunen, Markku J. et al. 2018. Suomen Biokaasulaitosrekisteri N:O21. Itä-Suomen yliopisto. 50s. ISBN 978-952-61-2857-3.

Huttunen, Suvi et al. 2014. Combining biogas LCA reviews with stakeholder interviews to analyse life cycle impacts at a practical level. *Journal of Cleaner Production* 80(2014): 5–16.

Galezia Tomasz. 2017. Time usage and efficiency of machinery during stump crushing. *Forest Research Papers Vol. 78(4): 271–276.*

Gu, Hongmei et al. 2018. Life cycle assessment of activated carbon from woody biomass. *Wood and Fiber Science* 50(3):1–15.

Halinen, Arja et al. 2006. Jätekompostit lannoitteena peltoviljelyssä – biologiset ja kemialliset vaikutukset. *Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus* 81. 105s. ISBN 952-487-025-8.

Hijazi, Omar et al. 2016. Review of life cycle assessment for biogas production in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54(2016):1291–1300.

ISO 14040. 2006. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. 48s.

ISO 14044. 2018. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. 107s.

Jarva, Kimmo. Polulla vähähiiliseen kaupunkiin – tavoitteita, tekoja, tuloksia. Lappeenranta strategia 2033. [Powerpoint]. [Viitattu 27.3.2020]. Saatavissa: <https://www.kuntaliitto.fi/sites/default/files/media/file/Kimmo%20Jarva.pdf>

Kaakkois-Suomen ympäristökeskus. 2009. Päätös Nro A 2017.

Kaasuautoilijat ry 2020; alkuperäinen lähde Traficom. Kaasuautojen markkinat Suomessa ja Euroopassa. [Verkkosivu]. [Viitattu 27.5.2020] Saatavissa: <https://kaasuautoilijat.fi/2019/07/24/kaasuautomarkkinoiden-kehitys/>

Kahiluoto, Helena et al. 2011. Potential of agrifood wastes in mitigation of climate change and eutrophication – Two case regions. *Biomass and Bioenergy* 35(2011):1983–1994.

Kymäläinen, Maritta & Pakarinen, Outi. 2015. Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Suomen Biokaasuyhdistys ry. Hämeen ammattikorkeakoulu. Forssa: Forssa Print Oy. 203s. ISBN 978- 951-784-770-4.

Lahtinen, Sami. 2018. Henkilöautoilla ajettiin edellisvuosien lailla – maanteiden tavarankuljetukset tehostuivat. Tilastokeskuksen artikkeli. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 3.7.2020]. Saatavissa: <https://www.stat.fi/tietotrendit/artikkelit/2018/henkiloautoilla-ajettiin-edellisvuosien-lailla-maanteiden-tavarankuljetukset-tehostuivat/>

Latvala, Markus. 2009. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT), Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Suomen ympäristökeskus 24/2009. Helsinki: Edita Prima Oy. 114s. ISBN 978-952-11-3498-2.

LCA Consulting. 2019. Lappeenrannan kasvihuonekaasupäästöt 2017. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 3.7.2020]. Saatavissa: <https://www.lappeenranta.fi/loader.aspx?id=771a0b79-cac0-4c42-a4c2-d99093fa1af2>

Lohilahti, Henri. 2020. EcoProtech Oy. Mädätysprosessia koskevat tiedot. Primääridata. [Sähköpostiviesti]. [Vastattu 17.4.2020].

Luonnonperintösäätiö. Etelä-Karjala. [Verkkosivu]. [Viitattu 17.4.2020]. Saatavissa: <https://www.luonnonperintosaatio.fi/fi/english/places-we-protect/etela-karjala>

Luonnonvarakeskus. Tietoa luonnonvaroista. Suota ja ilmasto. [Verkkosivu]. [Viitattu 13.5.2020]. Saatavissa: <https://www.luke.fi/tietoa-luonnonvaroista/metsa/metsat-ja-ilmastomuutos/soiden-erityinen-kasvihuonevaikutus/>

Motiva Oy. 2013. Biokaasun tuotanto maatilalla. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 8.4.2020]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf

Myhre, Gunnar et al. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 4.5.2020]. Saatavissa: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf

Myllymaa, Tuuli et al. 2008. Jätteiden kierrätyksen ja polton käsittelyketjujen ympäristökuormitus ja kustannukset. Inventaarioraportti. Suomen ympäristökeskus 28/2008. 82s. ISBN 978-952-11-3251-3.

Mönkäre, Tiina et al. 2016. Ravinnevisio: Selvitys Pirkanmaan puhdistamolietteiden ja biojätteiden ravinteista ja niiden potentiaalisesta käytöstä. Pirkanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen raportti 74/2016. Tampere. 56s. 978-952-314-489-7.

Nagarajan, Dillirani et al. 2019. Integration of anaerobic digestion and microalgal cultivation for digestate bioremediation and biogas upgrading. *Bioresource Technology* 290(June): 122804.

Oksman-Takalo, Heidi. 2020. Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy. Biokaasulaitosta koskevat tiedot. Primääridata. [Sähköpostiviestit]. [Vastattu kevät 2020].

Ovaskainen, Heikki. 2017. CO₂-eq päästöt ja energiatehokkuus metsäbiomassojen toimitusketjuissa – terminaalien vaikutus. Metsätehon tulosalvosarja 4a/2017. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 15.5.2020]. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tulosalvosarja_2017_04a_Co2-eq-paastot_ja_energiatehokkuus_metsabiomassojen.pdf

Pakarinen, Annukka et al. 2015. Rejektivesi ja mädätteet keinolannoitteen korvaajana viljanviljelyssä. Peltokoe HAMK-Mustialassa 2014. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 22.5.2020]. Saatavissa: <https://www.hamk.fi/wp-content/uploads/2018/07/Peltoviljelykoheet.pdf>

Pertl, Andreas et al. 2010. Climate balance of biogas upgrading systems. *Waste Management* 30(2010): 92–99.

Rigby, Hannah et al. 2016. A critical review of nitrogen mineralization in biosolids-amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment. *Science of the Total Environment* 541(2016):1310–1338.

Ryckebosch, Eline et al. 2011. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy* 35(2011): 1633–1645.

Sanchez, Antoni et al. 2015. Greenhouse gas emissions from organic waste composting. *Environ Chem Lett* (2015) 13:223–238.

Scarlat, Nicolae et al. 2018. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy* 129(2018): 457–472.

Sitra. 2018. Keskiwertosuomalaisen hiilijalanjälki. [Verkkosivu]. [Viitattu 24.6.2020]. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/artikkelit/keskiwertosuomalaisen-hiilijalanjalki/>

Sun, Qie et al. 2015. Selection of appropriate biogas upgrading technology – a review of biogas cleaning, upgrading and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51(2015): 521–523.

Tampio, Elina et al. 2016. Liqui fertilizer products from anaerobic digestion of food waste: mass, nutrients and energy balance of four digestate liquid treatment systems. *Journal of Cleaner Production* 125(2016): 22–32.

Tilastokeskus. 2019. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 1990–2018. Ympäristö ja luonnonvarat 2019. Helsinki: Tilastokeskus. 80s. ISBN 978-952-244-616-9.

Tilastokeskus. 2020. Kasvihuonekaasuinventaario. Polttoaineluokitus 2020. [Excel]. [Viitattu 4.5.2020]. Saatavissa: https://www.tilastokeskus.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html

Traficom. 2020 Ajoneuvokannan tilastot. Taulukko: Liikennekäytössä olevat ajoneuvot ajoneuvoluokittain ja käyttövoimittain 31.12.2010. [Excel]. [Viitattu 27.3.2020]. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/tilastot/ajoneuvokannan-tilastot>

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 4/2017. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö. 119s. ISBN 978-952-327-190-6.

Työtehoseura ry. 2019. Siipikarjanlannan käytön tehostaminen. Teholanta-hankkeen loppuraportti TSS:n julkaisuja 435. Nurmijärvi. 106s. ISSN 2489-8341.

UMOE Advanced Composites. Transport modules for CNG and Biogas. [Verkkosivu]. [Viitattu 25.6.2020]. Saatavissa: <https://www.uac.no/container-transportation-solutions/cngbiogas/>

UPM. 2019. Artikkelit: Kekkilän kompostissa valmistuu herkkuateria UPM Kukaan vedenpuhdistamon mikro-organismeille. [Verkkosivu]. [Viitattu 4.5.2020]. Saatavissa: <https://www.upm.com/fi/ajankohtaista/artikkelit/2019/03/kekkilan-kompostissa-valmistuu-herkkuateria-upm-kukaan-vedenpuhdistamon-mikro-organismeille/>

UPM Timber. UPM Korkeakosken saha. [Verkkosivu]. [Viitattu 6.5.202]. Saatavissa: <https://www.upmtimber.com/fi/tietoa-meista/tuotantolaitokset/upm-korkeakosken-saha/>

Uusitalo et al. 2013. Economics and greenhouse gas balance of biogas use systems in the Finnish transportation sector. *Renewable Energy* 51(2013): 132–140.

Uusitalo, Ville et al. 2014. Greenhouse gas emissions of biomethane for transport: Uncertainties and allocation methods. *Energy Fuels* (2014): 1901–1910.

Vinokurov, Mihail. 2020. Kekkilä. Kompostointiprosessia koskevat tiedot. [Sähköpostiviesti]. [Vastattu 17.4.2020].

Virtavuori, Veera. 2009. Biojätteen käsittelyvaihtoehdot pääkaupunkiseudulla. Kasvihuonekaasupäästöjen vertailu. YTV:n julkaisu 8/2009. 40s. ISBN 978-951-798-735-6.

VTT 2017a. Lipasto – Henkilöliikenteen yksikköpäästöt. Bensiinikäyttöinen henkilöauto. [Verkkosivu]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/henkiloliikenne/tieliikenne/henkiloautot/habens.htm>

VTT 2017b. Lipasto – Henkilöliikenteen yksikköpäästöt. Kaasukäyttöinen (CNG) henkilöauto. [Verkkosivu]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/henkiloliikenne/tieliikenne/henkiloautot/hakaasu.htm>

VTT 2017c. Lipasto – Henkilöliikenteen yksikköpäästöt. Kaupunkibussi, katuajo (Kokonaismassa 18 t, kantavuus 6 t). [Verkkosivu]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/henkiloliikenne/tieliikenne/linja-autot/bussikatu.htm>

VTT 2017d. Lipasto – Tavaraliikenteen yksikköpäästöt. Pakettiauto, jakeluajo (Kokonaismassa 2,7 t, kantavuus 1,2 t). [Verkkosivu]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/tieliikenne/padiesjakelu.htm>

VTT 2017e. Lipasto – Tavaraliikenteen yksikköpäästöt. Pieni jakelukuorma-auto, jakeluajo (Kokonaismassa 6 t, kantavuus 3,5 t). [Verkkosivu]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/tieliikenne/kajakpienijakelu.htm>

VTT 2017f. Lipasto – Tavaraliikenteen yksikköpäästöt. Puoliperävaunuyhdistelmä, katuajo (Kokonaismassa 40 t, kantavuus 25 t). [Verkkosivu]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/tieliikenne/kappkatu.htm>

VTT 2017g. Lipasto – Tavaraliikenteen yksikköpäästöt. Puoliperävaunuyhdistelmä, maantieajo (Kokonaismassa 40 t, kantavuus 25 t). [Verkkosivu]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/tieliikenne/kapptie.htm>

VTT 2017h. Lipasto – Tavaraliikenteen yksikköpäästöt. Suuri jakelukuorma-auto, maantieajo (Kokonaismassa 15 t, kantavuus 9 t). [Verkkosivu]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/tieliikenne/kajaksuuritie.htm>

VTT 2017i. Lipasto – Tavaraliikenteen yksikköpäästöt. Täysperävaunuyhdistelmä, maantieajo (Kokonaismassa 60 t, kantavuus 40 t). [Verkkosivu]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/tieliikenne/kavp60tie.htm>

VTT 2017j. Lipasto – Tavaraliikenteen yksikköpäästöt. Täysperävaunuyhdistelmä, maantieajo (Kokonaismassa 76 t, kantavuus 51 t). [Verkkosivu]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/tieliikenne/kavp76tie.htm>

VTT 2017k. Lipasto – Työkoneiden yksikköpäästöt. Työkoneet. [Verkkosivu]. Saatavissa: http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/muut/tyokoneet/tyokoneet_litra.htm

Väisänen, Sanni et al. 2013. Peat production in high-emission level peatlands – a key to reducing climatic impacts? *Energy & Environment*, 24(5): 757–778.

Winqvist, Erika et al. 2018. Suomen biokaasualan haasteet ja mahdollisuudet. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 47/2018. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 21s. ISBN 978-952-326-630-8.

Zeeman, Grietje et al. 2003. Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes. Teoksessa: *Bio-methane & Bio-hydrogen: Status and perspectives of biological methane and hydrogen production*. Alankomaat. ISBN 90-9017165-7. 165s.

Zhao et al. 2020. Towards the circular nitrogen economy – a global meta analysis of composting technologies reveals much potential for mitigating nitrogen losses. *Science of the Total Environment* 704(2020):135401.

Zhou, Man et al. 2019. Methanogenic activity and microbial communities characteristics in dry and wet anaerobic digestion sludges from swine manure. *Biochemical Engineering Journal* 152(September): 107390.

Liite I: Kompostointilaitoksen laskentatiedot

Syötteiden valmistus	Prosessi	Prosessin data	Datan maa	Datan vuosi
Sähkö	Electricity grid mix	GaBi	FI	2016
Tasauspätkä	Timber pine (12 % moisture; 10,7 % H ₂ O content)	GaBi	EU-28	2019
Rikkihappo	Sulphuric acid (96 %)	GaBi	EU-28	2019
Kantomurske	Kantomurskeen valmistus	Ovaskainen	FI	2017
Diesel	Diesel mix at filling station	GaBi	EU-28	2016
Diesel (työkoneet)	Diesel mix at refinery	GaBi	EU-28	2016
Syötteiden kuljetus				
Tasauspätkä	Täysperävaunuyhdistelmä (Kantavuus 50 t)	Lipasto-tietokanta	FI	2017
Rikkihappo	Säiliöauto (kantavuus 18 t)	Lipasto-tietokanta	FI	2017
Kantomurske	Täysperävaunuyhdistelmä (Kantavuus 38 t)	Lipasto-tietokanta	FI	2017
Hyvitys				
Turve	Turpeen nosto	Väisänen et al.	FI	2013
Fosforilannoite	Triple superphosphate (TSP, 46 % P ₂ O ₅)	GaBi	EU-28	2019
Typpilannoite	Ammonium nitrate (AN, 33,5 % N)	GaBi	EU-28	2019
Urea	Urea (46 % N)	GaBi	EU-28	2019

Liite II: Määtysprosessin laskentatiedot

Syötteiden valmistus	Prosessi	Prosessin data	Datan maa	Datan vuosi
Sähkö	Electricity grid mix	GaBi	FI	2016
Rikkihappo	Sulphuric acid (96 %)	GaBi	EU-28	2019
Lipeä	Sodium hydroxide mix (50 %)	GaBi	EU-28	2019
Aktiivihiili	Aktiivihiilen valmistus	Gu et al.		2018
Diesel	Diesel mix at filling station	GaBi	EU-28	2016
Diesel (työkoneet)	Diesel mix at refinery	GaBi	EU-28	2016
Syötteiden kuljetus				
Rikkihappo	Suuri jakelukuorma-auto (Kantavuus 9 t)	Lipasto-tietokanta	FI	2017
Lipeä	Suuri jakelukuorma-auto (Kantavuus 9 t)	Lipasto-tietokanta	FI	2017
Aktiivihiili	Suuri jakelukuorma-auto (Kantavuus 9 t)	Lipasto-tietokanta	FI	2017
Polymeerijauhe	Suuri jakelukuorma-auto (Kantavuus 9 t)	Lipasto-tietokanta	FI	2017
Hyvitys				
Diesel	Diesel mix at filling station	GaBi	EU-28	2016
Bensiini	Gasoline mix (premium) at filling station	GaBi	EU-28	2016
Fosforilannoite	Triple superphosphate (TSP, 46 % P ₂ O ₅)	GaBi	EU-28	2019
Typpilannoite	Ammonium nitrate (AN, 33,5 % N)	GaBi	EU-28	2019
Urea	Urea (46 % N)	GaBi	EU-28	2019

Liite III: Kompostointiprosessin tulokset

Kompostointiprosessi	Päästö [kg CO₂-ekv/a]	Päästö [kg CO₂-ekv/t]
Sähkö	213 900	10,7
Apusyötteiden valmistus ja kuljetus	250 700	12,5
Työkoneet	106 200	5,3
Suorat päästöt	779 600	39,0
Hyvitys: Turve	-436 300	-21,8
Hyvitys: Typpilannoite	-19 600	-1,0
Hyvitys: Fosforilannoite	-4 380	-0,2
Hyvitys: Urea	- 64 200	-3,2
Nettopäästö	825 900	41,3

Liite IV: Mädätysprosessin tulokset

Mädätysprosessi	Päästö, skenaario 1 [kg CO ₂ -ekv/a]	Päästö, skenaario 1 [kg CO ₂ -ekv/t]	Päästö, skenaario 2 [kg CO ₂ -ekv/a]	Päästö, skenaario 2 [kg CO ₂ -ekv/t]
Sähkö	513 400	25,7	513 400	25,7
Apusyötteiden valmistus ja kuljetus	108 500	5,4	108 500	5,4
Työkoneet	10 400	0,5	10 400	0,5
Suorat päästöt	604 800	30,2	604 800	30,2
Biometaanin kuljetus	13 300	0,7	13 300	0,7
Mädätteen kuljetus käsittelyyn ja käsittely	270 300	13,5	270 300	13,5
Hyvitys: Dieselin korvaus jäteautoissa	-527 100	-26,4	-788 300	-39,4
Hyvitys: Dieselin korvaus muissa ajoneuvoissa	-250 800	-12,5	-227 100	-11,4
Hyvitys: Bensiinin korvaus henkilöautoissa	-2 869 000	-143,4	-2 598 000	-129,9
Hyvitys: Typpilannoite	-222 300	-11,1	-222 300	-11,1
Hyvitys: Fosforilannoite	-17 500	-0,9	-17 500	-0,9
Hyvitys: Urea	-47 000	-2,3	-47 000	-2,3
Nettopäästö	-2 413 000	-120,6	-2 379 000	-119,0