

**SELVITYSTYÖ MAATILAMITTALUOKAN BIOKAASULAITOKSEN  
PERUSTAMISESTA HELSINGIN YLIOPISTON VIIKIN OPETUS- JA  
TUTKIMUSTILALLE**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö  
Bio- ja elintarviketekniikka, Hämeenlinnan korkeakoulukeskus  
Kevät 2021  
Tiina Pummi

---

Tekijä	Tiina Pummi	Vuosi 2021
Työn nimi	Selvitystyö maatilamittaluokan biokaasulaitoksen perustamisesta Helsingin yliopiston Viikin opetus- ja tutkimustilalle	
Ohjaaja	Maritta Kymäläinen	

---

## TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää Helsingin yliopiston Viikin opetus- ja tutkimustilalle perustettavan biokaasulaitoksen toimintaedellytyksiä. Työssä kartoitettiin biokaasuprosessiin sopivia, lähiseudulla helposti saatavilla olevia syötteitä, ja selvitettiin kartoituksen tuloksena valittuun syöteseokseen sopivia biokaasulaitosratkaisuja.

Syötteiksi valikoituivat Viikin opetus- ja tutkimustilan maatalousyötteiden lisäksi Vanhankaupunginlahden järviruoko, läheisen ratsastuskeskuksen hevosenlanta sekä lähiseudun pienpanimon olutmäski. Useilta biokaasulaitostoimittajilta saatiin tarjouksia biokaasulaitoksista, jotka perustuivat kolmeen eri biokaasun tuotantoprosessiin: märkä- ja kiintomädätykseen, kuivamädätykseen ja kaksivaiheiseen mädätykseen. Kaikki tarjotut teknologiat soveltuivat valitulle syöteseokselle. Biokaasulaitoksen tuottama biokaasu on taloudellisesti kannattavampaa jalostaa metaaniksi kuin tuottaa siitä sähköä ja lämpöä Viikin opetus- ja tutkimustilan tarpeisiin. Koska kysyntä hiilineutraalille metaanille on suurta, jalostettu metaani voitaisiin hyödyntää joko liikkeenpolttoaineena tai kaasunjakeluverkossa.

Investointi- ja kannattavuuslaskelmien perusteella biokaasulaitoksesta ei todennäköisesti tulisi kannattavaa, vaikka investointikustannuksiin saataisiinkin Työ- ja elinkeinoministeriön energiatukea.

Opinnäytetyö tehtiin tilaustyönä Helsingin yliopiston Tilat ja kiinteistöt -yksikölle.

Avainsanat Biokaasu, märkämädätys, kuivamädätys, biokaasun jalostus, mädäte

Sivut 75 sivua, ei liitteitä

---

Author	Tiina Pummi	Year 2021
Subject	Establishment of Biogas Plant at Viikki Research Farm of the University of Helsinki	
Supervisor	Maritta Kymäläinen	

---

**ABSTRACT**

The University of Helsinki aims to establish a biogas plant at Viikki Research Farm. The scope of this thesis was to find prerequisites for the establishment of the plant. Relevant biomass resources nearby the farm were scanned and suitable biogas technologies were sought. The feedstock included biomass from Viikki Research Farm e.g., manure, grass silage and straw, common reed of the sea bay Vanhankaupunginlahti, horse manure from a nearby riding school and mash from a local artisan brewery.

Several offers were received from biogas plant providers. The offers were based on three different fermentation techniques, namely wet digestion, dry digestion, and two-stage anaerobic digestion. All offered digestion techniques and biogas plants were suitable for the chosen feedstock composition. Profitability ratio calculations showed that the biogas plant would most likely not be profitable, even though energy aid granted by Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland was considered. Refining biogas to methane would probably be more profitable than producing heat and power from it. There is high demand on carbon-neutral methane, and therefore biomethane could either be used in gas fuelled cars or transferred into the gas grid.

This thesis was an assignment by the Properties and Facilities ("Tilat ja kiinteistöt") Department of the University of Helsinki.

Keywords biogas, wet digestion, dry digestion, biogas upgrading, digestate

Pages 75 pages and no appendices

## Sisälllys

1	Johdanto .....	1
2	Yleiskuvaus biokaasun muodostumisesta anaerobisessa prosessissa .....	2
3	Biokaasun muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä .....	4
3.1	Lämpötila.....	4
3.2	pH.....	5
3.3	Ravinteet .....	6
4	Biokaasutuotannon syötteen .....	7
4.1	Biokaasutuotannon syötteen kirjo.....	7
4.2	Syötteen vaikutus biokaasuprosessiin .....	8
4.2.1	Syötteen kuiva-aineen (TS) ja orgaanisen aineen (VS) merkitys.....	8
4.2.2	Syötteen vaikutus biokaasuprosessin orgaaniseen kuormitukseen ....	9
4.2.3	Syötteen vaikutus biokaasuprosessin viipymäaikaan .....	10
4.2.4	Orgaanisen kuormituksen ja viipymäajan keskinäinen suhde .....	11
5	Biokaasun tuotantoprosessit.....	11
5.1	Biokaasun tuotantoprosessien periaatteet .....	11
5.1.1	Märkämädätysprosessi .....	12
5.1.2	Kuivämädätysprosessi.....	12
5.1.3	Kaksivaiheinen anaerobinen mädätysprosessi .....	13
5.2	Suomalaisten laitetoimittajien kaupallisia maatilamittaluokan biokaasulaitosratkaisuja.....	14
5.2.1	Biovoima Oy .....	14
5.2.2	Demeca Oy .....	14
5.2.3	Doranova Oy.....	15
5.2.4	EcoProtech Oy .....	16
5.2.5	Metener Oy .....	16
5.2.6	Watrec Oy.....	17
6	Biokaasuprosessin lopputuotteiden käsittely .....	17
6.1	Biokaasun hyödyntäminen.....	18
6.2	Mädätteen hyödyntäminen .....	19
6.2.1	Mädätteen ravinteiden hyödyntäminen.....	19
6.2.2	Mädätteen käyttäminen eläinten kuivikkeena .....	20
7	Biokaasulaitostoiminnan vaatimat luvat ja ilmoitukset .....	20
7.1	Ympäristölupa .....	21

7.2	Laitoshyväksyntä .....	22
7.3	Tuotehyväksyntä .....	23
7.4	Rakennuslupa .....	23
7.5	Räjähdyssuojausasiakirja .....	23
7.6	Ilmoitus pelastusviranomaisille.....	24
8	Biokaasulaitosinvestoinnin tukimuodot.....	24
8.1	Maatalouden investointituki ja valtiontakaus .....	24
8.2	Työ- ja elinkeinoministeriön energiatuki .....	25
9	Biokaasulaitos Viikin opetus- ja tutkimustilalle.....	25
9.1	Viikin opetus- ja tutkimustila .....	26
9.2	Saatavilla olevat syötteet .....	26
9.2.1	Viikin koetilan syötteet .....	27
9.2.2	Helsingin yliopiston Viikin kampuksen muut syötteet.....	28
9.2.3	Hevosen kuivikelanta lähistön ratsastuskeskuksesta .....	29
9.2.4	Vanhankaupunginlahden järviruokobiomassa .....	30
9.2.5	Pienpanimon mäski .....	31
9.2.6	Syötteiden vuotuiset massamäärät ja niiden metaanituottopotentiaali .....	32
9.3	Syöteseoksen valintaan vaikuttavia tekijöitä.....	34
9.3.1	Syötteiden massamäärien suhteellinen jakauma .....	34
9.3.2	Syötteiden orgaanisen kuiva-aineen suhteellinen jakauma .....	35
9.3.3	Syötteiden vuotuinen metaanituottopotentiaalijakauma.....	36
9.3.4	Syöteseoksen valintaan vaikuttavia muita tekijöitä .....	37
9.4	Biokaasulaitoksen tuotantoprosessin arvioiminen ja syöteseoksen valinta .	40
9.4.1	Biokaasulaskuri.....	40
9.4.2	Potentiaaliset syöteseokset biokaasuprosessia varten .....	40
9.4.3	Eri syöteseosten vaikutus biokaasun energiamäärään ja hyödyntämiseen .....	41
9.4.4	Eri syöteseosten vaikutus ravinne- ja mädättemäärään.....	45
9.4.5	Syöteseoksen valinta .....	47
9.4.6	Biokaasulaitoksen massa- ja energiatase.....	47
9.4.7	Biokaasulaitoksen Worst case -skenaarioita.....	48
9.5	Viikin koetilan biokaasulaitosratkaisut .....	50
9.6	Biokaasulaitosratkaisujen vertailu ja muut huomiot .....	51
9.6.1	Prosessi- ja reaktorivalintojen erot .....	51

9.6.2	Viipymäaika, HRT.....	52
9.6.3	Orgaaninen kuormitus, OLR.....	53
9.6.4	Biokaasulaitosten operointi.....	54
9.6.5	Muut huomiot.....	55
9.7	Biokaasun käyttövaihtoehdot.....	56
9.7.1	Biokaasusta sähköä ja lämpöä.....	56
9.7.2	Biokaasun jalostus metaaniksi.....	57
9.7.3	Metaani liikennepolttoaineeksi.....	58
9.7.4	Metaanin syöttö kaasuverkkoon.....	58
9.8	Mädätteen käyttö.....	62
9.9	Biokaasulaitoksen investointi- ja kannattavuuslaskelmia.....	62
9.9.1	Eri syöteseosten vaikutus biokaasulaitosinvestointiin.....	62
9.9.2	Valitun syöteseosten vaikutus biokaasulaitosinvestointiin.....	63
10	Johtopäätökset.....	65
	Lähteet.....	70

## Kuvat, taulukot ja kaavat

Kuva 1	Orgaanisen aineksen hajoaminen biokaasuksi anaerobisissa olosuhteissa.....	3
Kuva 2	Syötteiden vuotuinen massamäärä ja metaanintuottopotentiaali.....	33
Kuva 3	Vuotuinen kaikkien saatavilla olevien syötteiden massamäärien suhteellinen jakauma. .....	35
Kuva 4	Vuotuinen kaikkien saatavilla olevien syötteiden orgaanisen kuiva-aineen (VS) suhteellinen jakauma. ....	36
Kuva 5	Syötteiden vuotuisen metaanituoton jakauma, kun hevosenlanta sisältää olkipohjaista kuiviketta. ....	37
Kuva 6	Syötteiden vuotuisen metaanituoton jakauma, kun hevosenlanta sisältää puupohjaista kuiviketta. ....	38
Kuva 7	Syöteseosten vuotuinen massa sekä niiden metaanintuottopotentiaali puu- ja olkipohjaisilla hevosenlantakuivikkeilla. ....	41
Kuva 8	Biokaasulaitoksen massa- ja energiatase, kun syöteseos sisältää kaikki saatavilla olevat syötteet ja mädätystekniikkana käytetään kiintomädätystä. ....	48
Kuva 9	Syötteiden vaikutus energiantuottoon ja jalostetun biokaasun myyntituloon. .	49

Kuva 10 Syötteiden vaikutus sähkön ja lämmön tuotantoon. ....	50
Kuva 11 ”Perinteinen” kaasunsyöttö jakeluverkkoon. ....	59
Kuva 12 Biokaasun jalostus ja toimitus kaasun erillisverkkoon. ....	60
Kuva 13 Jalostetun metaanin paineistus tai nesteytys. ....	61
Taulukko 1 Saatavilla olevien syötteiden massamäärät, ja tämän työn laskelmissa käytetyt TS- ja VS-pitoisuudet sekä metaanintuottopotentiali. ....	33
Taulukko 2. Eri syöteseosten vaikutus biokaasulaitoksessa tuotetun energian kokonaismäärään sekä sähkön- ja lämmöntuotantoon CHP-yksikössä ....	44
Taulukko 3 Eri syöteseosten ja mädätysprosessien vaikutus syntyvään ravinne- ja mädätemäärään ....	46
Taulukko 4 Biokaasulaitostoimittajien laitosratkaisujen vertailu ....	52
Taulukko 5 Investointi- ja kannattavuuslaskelma biokaasulaitosinvestointikustannusten muuttuessa ....	64

## **Liitteet**

-

## 1 Johdanto

Metaania sisältävää biokaasua muodostuu luonnossa hapettomissa oloissa kuten soiden ja järvien pohjasedimenteissä ja lehmän pötsissä. Ihmisen toiminnan vuoksi metaania sisältävää biokaasua vapautuu ilmakehään esimerkiksi kaatopaikoilta biohajoavan jätteen maatuessa. Biokaasua voidaan käyttää myös hyödyksi. Sitä on osattu hyödyntää lämmityksessä ja valaistuksessa jo 1900-luvun vaihteessa Englannissa, missä tuotettiin biokaasua jätevedestä. Suomessa tavanomaisin tapa tuottaa biokaasua on ollut mädättää jätevesiliete biokaasuksi. (Kinnunen & Rintala, 2015, ss. 7–10; ks. myös Motiva, 2013, s. 3)

Biokaasuprosessissa syntyy biokaasua ja mädätettä. Biokaasu on hiilineutraalia kaasua, jota voidaan sellaisenaan polttaa energiaksi tai jalostaa edelleen esimerkiksi liikennepolttoaineeksi. Biokaasuprosessista jäljelle jäävä mädäte sisältää helposti kasvien hyödynnettävissä olevia ravinteita kuten typpeä ja fosforia. Mädätettä voidaan käyttää lannoitteena joko sellaisenaan tai separoituna neste- ja kuivajakeiksi tai siitä voidaan tehdä lannoitevalmisteita. (Kinnunen & Rintala, 2015, s. 7)

Alun perin biokaasuprosessin lähtökohtana on ollut käsitellä orgaaninen jäte, lietteet ja jätevesi ympäristölle haitattomaan muotoon. Samalla siitä on saatu energiaa metaanin muodossa. Ilmastonmuutoksen vuoksi hiilineutraalia biokaasun tuotantoa on ryhdytty tarkastelemaan myös fossiilisen energian korvaamisen ja ravinteiden kierrättämisen näkökulmasta. Biokaasuteknologialla voidaankin vastata kolmeen ympäristön kannalta tärkeään maailmanlaajuiseen haasteeseen: uusiutuvaan energiantuotantoon, ravinteiden kierrättämiseen ja materiaalikierrätykseen. Pääministeri Sanna Marinin hallituksen vuonna 2019 laatiman hallitusohjelman tavoitteena on, että Suomi olisi hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Jotta tähän päästään, pyrkimyksenä on lähes päästötön sähkön- ja lämmöntuotanto sekä fossiilisten polttoaineiden puolittaminen liikenteessä vuoteen 2030 mennessä ja muuttaminen nollapäästöiseksi vuoteen 2045 mennessä. Tavoitteen saavuttamiseksi pyritään päästöttömän sähkön- ja lämmöntuotannon lisäksi lisäämään myös kiertotaloutta, pienentämään rakentamisen hiilijalanjälkeä ja suosimaan ympäristöystävällistä ruokapolitiikkaa. (Kinnunen & Rintala, 2015, ss. 7–10; Ympäristöministeriö, 2020; Valtioneuvosto, 2019)



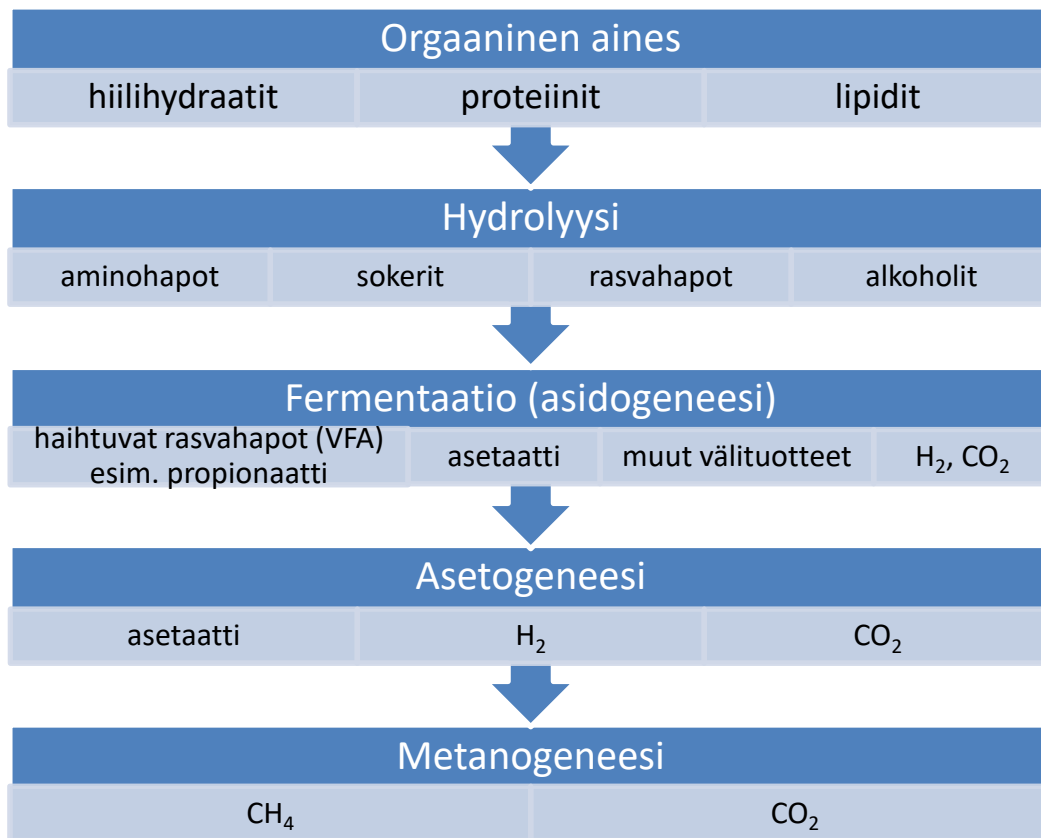
Tämä opinnäytetyö vastaa hallitusohjelman asettamista tavoitteista pyrkimykseen lähes päästöttömästä sähkön- ja lämmöntuotannosta, fossiilittoman liikenteen edistämisestä sekä paremmasta ravinteiden kierrättämisestä.

## 2 Yleiskuvaus biokaasun muodostumisesta anaerobisessa prosessissa

Biokaasua tuotetaan orgaanisesta materiaalista mädättämällä, joka on orgaanisen aineksen biologista hajoamista hapettomissa olosuhteissa. Sen seurauksena osa orgaanisesta materiaalista muuttuu metaanin (CH<sub>4</sub>) ja hiilidioksidin (CO<sub>2</sub>) seokseksi, biokaasuksi. Mätänemisen saavat aikaan mikrobit, joista osa pilkkoo orgaanista materiaalia – hiilihydraatteja, proteiineja ja rasvaa – pienemmiksi, liukoisessa muodossa oleviksi yhdisteiksi, mm. asetaatiksi. Näitä yhdisteitä vuorostaan metaanibakteerit käyttävät hyödykseen tuottaen biokaasua. Biokaasun metaanipitoisuus on keskimäärin 55–75 % ja hiilidioksidipitoisuus 25–45 %. Lisäksi biokaasu sisältää 1–5 % typpeä (N<sub>2</sub>), hieman vetyä (H<sub>2</sub>) ja hiilimonoksidia (CO) sekä epäpuhtautena mm. rikkivetyä (H<sub>2</sub>S). Biokaasu voidaan joko polttaa sellaisenaan kaasukattilassa lämmöksi, tuottaa siitä CHP-yksikössä (Combined Heat and Power) sähköä ja lämpöä tai jalostaa sitä liikennepolttoaineeksi. (Motiva, 2013, ss. 2–3)

Orgaaninen aines hajoaa anaerobisissa olosuhteissa kuvan 1 (s. 3) mukaisesti. Orgaanisen aineksen hajoamisen tuloksena syntyy biokaasua ja mädätettä. Hydrolyysivaiheessa orgaanisen biomassan hiilihydraatit, proteiinit ja rasvat pilkkoutuvat yksinkertaisemmiksi yhdisteiksi: sokereiksi, aminohapoiksi ja rasvahapoiksi. Hydrolyysiin osallistuvilla hydrolyyttisillä bakteereilla on ominaista, että ne tuottavat entsyymejä solun ulkopuolelle. Entsyymit pilkkovat suurikokoiset hiilihydraatti-, proteiini- ja rasvayhdisteet pienemmiksi, veteen liukeneviksi yhdisteiksi. Amylaasit pilkkovat hiilihydraatteja sokereiksi, proteaasit proteiineja aminohapoiksi ja lipaasit rasvan rasvahapoiksi ja glyseroliksi. (Kymäläinen, 2015a, s. 61; ks. myös Motiva, 2013, s. 4)

Kuva 1 Orgaanisen aineksen hajoaminen biokaasuksi anaerobisissa olosuhteissa (muokattu lähteestä Kymäläinen, 2015, s. 60).



Fermentaatiovaiheessa, jota kutsutaan myös asidogeneesiksi, fermentatiiviset mikrobit muodostavat sokereista, aminohapoista ja rasvahapoista orgaanisia happoja ja alkoholeja. Asidogeneesivaiheeseen osallistuvat ainakin osittain samat mikrobit kuin hydrolyysivaiheeseenkin, mutta mikrobipopulaatioon vaikuttavat mm. syötteen koostumus ja vallitsevat olosuhteet kuten lämpötila. Tässä vaiheessa syntyneitä rasvahappoja kutsutaan haihtuviksi rasvahapoiksi (engl. volatile fatty acids, VFA). Orgaaniset hapot esiintyvät lähinnä negatiivisesti varautuneina ioneina, esimerkiksi propionihappo propionaattina ja butyyrihappo butyraattina, prosessin neutraalin tai lievästi emäksisen pH:n vuoksi. Prosessissa muodostuu myös hiilidioksidia, vetyä ja ammoniakkia. (Kymäläinen, 2015a, s. 62; Wellinger ym., 2013, ss. 106–107)

Asetogeneesissä, jota kutsutaan myös anaerobiseksi hapettumiseksi, fermentaatiovaiheessa muodostuneet haihtuvat rasvahapot ja alkoholit hajotetaan edelleen asetaatiksi, vedyksi ja hiilidioksidiksi. Koska vallitsevat olosuhteet ovat anaerobiset eikä molekulaarista happea O<sub>2</sub>

ole, mikrobit käyttävät elektronien vastaanottajina hapettuneita yhdisteitä kuten nitraattia ( $\text{NO}_3^-$ ), sulfaattia ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ja karbonaattia ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). (Kymäläinen, 2015a, s. 62)

Metanogeneesissä metanogeeniset bakteerit muodostavat asetaatista, vedystä ja hiilidioksidista metaania ja hiilidioksidia. Osa metanogeenisistä bakteereista muodostaa metaania asetaatista ja osa käyttää metaanin tuottoon vetyä. Metaania muodostuu arviolta 70 % asetaatin kautta ja loput vedyn kautta. Metanogeenisten bakteerien kasvu on hidasta ja sillä on suuri merkitys biokaasureaktorin viipymäaikoja määrittäessä. Koska asetogeeniset bakteerit tuottavat vetyä ja vastaavasti metageeniset bakteerit kuluttavat sitä, nämä bakteerit elävät symbioosissa. Symbioottinen tasapaino on herkkä, ja termodynaamisten rajoitteiden mukaisesti vetyä tuottavat bakteerit voivat käyttää haihtuvia rasvahappoja vain silloin, kun vetypitoisuus on riittävän matala. Toisaalta taas metaanin muodostumisen kannalta vetypitoisuuden on oltava riittävän korkea. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että vetypitoisuuden on oltava 0,001–0,1 mbar, jotta metaania muodostuisi optimaalisesti. (Kymäläinen, 2015a, ss. 62–63; Wellinger ym., 2013, s. 107)

### **3 Biokaasun muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä**

Orgaanisen aineksen mätäneminen ja biokaasun muodostuminen ovat mahdollisia, kun lämpötila ja pH ovat mikrobitoiminnalle suotuisat eikä happea ole läsnä. Mikrobin toimintaan vaikuttavat myös orgaanisen aineksen sisältämät ravinteet. (Kymäläinen, 2015a, ss. 63–64)

#### **3.1 Lämpötila**

Biokaasuprosessissa lämpötila on tavanomaisesti joko mesofiilinen (yleensä 35–43 °C) tai termofiilinen (yleensä 50–55 °C). Käytännössä absoluuttisella lämpötilalla ei ole kovin suurta merkitystä. Sen sijaan lämpötilan tulisi olla tasainen eikä se saisi vaihdella muutamaa astetta enempää, koska metanogeeniset bakteerit ovat herkkiä lämpötilan vaihtelulle. Mesofiilisen biokaasuprosessin hyvinä puolina ovat hyvä biokaasuntuotto ja vakaa prosessi, haittana taas prosessin hitaus. Termofiilinen mädätysprosessi taas voi olla jopa puolet mesofiilistä prosessia nopeampi, mutta se on herkkä häiriöille. Lisäksi termofiilisen prosessin huonona puolena on mesofiilistä mädätysprosessia suurempi energiankulutus suuremman

lämmitystarpeen vuoksi. Termofiilisellä prosessilla voidaan kuitenkin tuhota rikkakasvien siemeniä ja patogeenisia mikrobeja, jolloin erillinen syötteen hygienisointi saattaa olla tarpeeton (Kymäläinen, 2015a, s. 74; Ruokavirasto, 2019a). (Kymäläinen, 2015a, ss. 63–64; Motiva, 2013, s. 6)

Anaerobisessa mädätysprosessissa ei orgaanisen aineksen hajoaminen tuota juurikaan lämpöä, toisin kuin kompostoinnissa, koska energia sitoutuu pääosin muodostuvaan metaaniin. Biokaasun energiasisältö on 19–26 MJ/Nm<sup>3</sup> (Wellinger ym., 2013, s. 105). On arvioitu, että vain 3–5 % lähtömateriaalin energiasisällöstä muuttuisi prosessin aikana lämmöksi (Motiva, 2013, s. 5). Tämän vuoksi biokaasuprosessi vaatii pääsääntöisesti ulkoisen lämmönlähteen prosessilämpötilan pitämiseksi tasaisena. Biokaasulaitoksissa lämmitys hoidetaan syötteen esilämmittämällä ja/tai reaktorin lämmityksellä ja hyvällä eristämällä. (Kymäläinen, 2015a, ss. 63–64; Motiva, 2013, s. 6; ks. myös Wellinger ym., 2013, s. 115)

### 3.2 pH

Biokaasuprosessin toimivuuden kannalta pH on tärkeä parametri. Asetogeeniset ja metanogeeniset bakteerit tarvitsevat neutraalin tai lievästi emäksisen olosuhteen, kun taas hydrolysoivat ja happoa muodostavat asidogeeniset bakteerit viihtyvät parhaiten happamissa oloissa. pH-arvoksi on valittava neutraali tai lievästi emäksinen pH, noin pH 7–8, koska happamissa olosuhteissa metaania ei muodostu. pH-arvon laskiessa, toisin sanoen vetyionien määrän kasvaessa, biokaasuprosessi menee häiriötilaan, ns. ”hapoille”, ja se vaikuttaa prosessin mikrobien keskinäiseen suhteeseen. Hydrolysoivat ja asidogeeniset bakteerit jatkavat orgaanisten happojen muodostamista alentaen pH:ta, mutta hapoista ei enää muodostukaan asetaattia ja edelleen metaania, koska metanogeeniset bakteerit eivät pysty alhaisessa pH:ssa toimimaan. (Motiva, 2013, ss. 6–7; Kymäläinen, 2015a, s. 65)

Syötteen koostumus ja syöttönopeus vaikuttavat mädätysprosessin pH-arvoon. Paljon hiilihydraatteja sisältävä syöte saa aikaan pH:n laskua runsaan orgaanisten happojen muodostumisen vuoksi, kun taas proteiinipitoiset syötteen nostavat pH:ta ammoniakkin muodostumisen vuoksi. Reaktorin sisällön pH-arvoon voidaan vaikuttaa syötteen syöttönopeudella ja syötteen koostumuksella. Mitä enemmän syötettä lisätään, sitä

enemmän hydrolysoivat ja asidogeeniset bakteerit tuottavat happoja ja sitä huonommin asetogeeniset ja metageeniset bakteerit toimivat pH:n alenemisen vuoksi. Mikäli näin käy, syötteen lisääminen on lopetettava ja odotettava metanogeneesiin toipumista. Tarvittaessa nopea pH:n kohoaminen saadaan aikaan lisäämällä lipeää (NaOH-liuosta). Se ei ole normaaliprosessissa kannattavaa, koska se lisää käyttökustannuksia, työmäärää ja on vain ”oireenmukaista hoitoa”, ei pH-laskun syyn selvittämistä. (Motiva, 2013, ss. 6–7; Kymäläinen, 2015a, s. 65)

Tasainen pH on hyvin toimivan mädätysprosessin edellytys. Kun pH pysyy neutraalina, prosessin tuottama hiilidioksidi liukenee vetykarbonaattimuotoon ( $\text{HCO}_3^-$ ). Muodostunut vetykarbonaatti neutraloi syntyviä happoja ja haihtuvia rasvahappoja (VFA), ja sen seurauksena mädätysprosessin pH pysyy tasaisena. Mädätysprosessin puskurointikyky on silloin hyvä. Mitä parempi liuoksen puskurointikyky on, sitä vakaampi mädätysprosessi ja pienempi pH-vaihteluiden riski on. Syötteellä tulisivin olla hyvä puskurointikyky, eli kyky neutraloida muodostuneet orgaaniset hapot pH-tasapainon ylläpitämiseksi. Siksi syötteenä käytetään, mikäli mahdollista, karjan lantaa, jolla on hyvä puskurikyky pH-muutoksia vastaan. (Kymäläinen, 2015a, s. 65)

### 3.3 Ravinteet

Biokaasuprosessi tarvitsee ravinteita sopivassa suhteessa vakaan prosessin aikaansaamiseksi. Pääravinteet ovat hiili (C), typpi (N), fosfori (P) ja rikki (S). Hiilen ja typen tavoiteltavaksi C/N-suhteeksi on esitetty arvoja 10–30. Suhdeluku toimii kuitenkin vain arviona hiilen ja typen suhteellisesta määrästä, sillä kaikki hiili tai typpi ei ole helposti mikrobien käytettävissä. (Kymäläinen & Luostarinen, 2015, ss. 26–27; Kymäläinen, 2015b, ss. 66–67)

Biokaasuprosessiin syötetyllä orgaanisella materiaalilla on olennainen merkitys tasapainoisessa biokaasun tuotannossa. Liian hiilihydraattipitoinen syöte, eli liian korkea C/N-suhde, edistää haponmuodostusta ja alentaa pH:ta. Proteiinipitoinen syöte, eli matala C/N-suhde, taas nostaa ammoniakkin määrää, joka kohtuullisessa pitoisuudessa on ravinne, mutta suurina pitoisuuksina inhiboi biokaasun muodostumista. Typen puute taas alentaa

biokaasun muodostumista varsinkin silloin, kun mädätetään ainoastaan kasvibiomassaa. (Kymäläinen & Luostarinen, 2015, ss. 26–27; Kymäläinen, 2015b, ss. 66–67)

Pääravinteiden lisäksi tarvitaan mikrobien entsyymitoimintaa varten useita eri hivenaineita ja vitamiineja. Mikäli hivenaineita ei ole riittävästi esim. silloin, kun syöte on yksipuoleista, voidaan prosessiin lisätä hivenaineita ja vitamiineja (Kymäläinen, 2015b, ss. 66–67).

Prosessiin erikseen annosteltavat hivenaineet ja vitamiinit kuitenkin lisäävät prosessin käyttökuluja, mikä luonnollisesti vaikuttaa toiminnan kannattavuuteen.

## **4 Biokaasutuotannon syötteen**

Biokaasua voidaan periaatteessa tuottaa kaikesta orgaanisesta aineksesta, mutta käytännössä biokaasuprosessiin sopii biomassa, joka hajoaa luonnostaankin helposti. Syötteen määrä ja koostumus vaikuttavat biokaasun tuottoon ja laatuun. (Motiva, 2013, ss. 8, 10)

### **4.1 Biokaasutuotannon syötteen kirjo**

Maatilalla biokaasua voidaan tuottaa esimerkiksi tuotantoeläinten lietelannasta, ylijäämärehusta, nurmesta, oljesta, juuresten naateista sekä kasviksista, joita ei voida muutoin hyödyntää. Myös muuta kuin maatilalla syntyvää kasvibiomassaa voidaan käyttää biokaasun tuotannossa. Rehevöityneistä vesistöistä voidaan poistaa järvibiomassaa, kuten järviruokoa, ja tuottaa siitä biokaasua. Kasvupaikalle jätettynä järvibiomassa mätännee tuottaen kasvihuonekaasuja. (Motiva, 2013, s. 8; Vitie, 2009, s. 2)

Paljon kuitua ja ligniiniä sisältävässä biomassassa, kuten puussa, orgaaninen aines ei ole helposti hajoavassa muodossa, joten sen käyttö biokaasuprosessissa ei välttämättä ole taloudellisesti kannattavaa (Motiva, 2013, s. 8).

Biojätettä ja elintarviketeollisuuden sivu- ja jätevirtoja voidaan myös mädättää.

Elintarviketeollisuuden sivu- ja jätevirtoja käytetään mielellään biokaasutuotannossa, koska ne tuottavat kasviperäistä biomassaa enemmän biokaasua. Tämä johtuu siitä, että ne sisältävät kasvimassaa enemmän proteiinia ja rasvaa, joiden metaanituottopotentiaali on

suurempi. Proteiineista muodostuu metaania 850 litraa CH<sub>4</sub>/kg VS ja rasvasta 1 000 litraa CH<sub>4</sub>/kg VS, kun hiilihydraatista saa metaania 420 litraa CH<sub>4</sub>/kg VS. Esimerkiksi Jeppo Biogas Ab käyttää biokaasuprosessissaan mm. perunankuoria ja lihajalostustehdas Oy Snellman Ab:n lietettä (Jeppo Biogas Ab, n.d.; Snellman Oy Ab, 2019). Panimoravintola Bryggeri Helsingin oluenvalmistuksen sivuvirta taas kuljetetaan Labio Oy:n biokaasutehtaalle Lahteen ja mäskestä tuotettu metaani kuljetetaan takaisin panimoravintolaan energiakäyttöön (Bryggeri Helsinki, n.d.). (Kymäläinen & Luostarinen, 2015, s. 29)

## **4.2 Syötteen vaikutus biokaasuprosessiin**

Syötteet vaikuttavat biokaasun tuotantoon. Niiden perusteella valitaan muun muassa tuotantoprosessitekniikka ja olennaiset prosessiparametrit. (Motiva, 2013, s. 10)

### **4.2.1 Syötteen kuiva-aineen (TS) ja orgaanisen aineen (VS) merkitys**

Syöte koostuu vedestä ja kuiva-aineesta. Kuiva-aine (engl. Total Solids, TS) muodostuu orgaanisesta aineksestä (engl. Volatile Solids, VS) ja epäorgaanisesta aineksestä eli tuhkasta. Biokaasua syntyy kuiva-aineen orgaanisen aineksen hajotessa, ja siksi tehokkaan biokaasuprosessin kannalta olisi suotuisaa, että kuiva-aineesta mahdollisimman suuri osa olisi orgaanista kuiva-ainetta. Esimerkiksi naudan lietelannan kuiva-ainepitoisuus on 5–8 % ja apilasäilörehun noin 35 % (Motiva, 2013, s. 10). Molempien syötteiden keskimääräinen orgaanisen aineen määrä on noin 80–90 % kuiva-ainepitoisuudesta (Kymäläinen & Luostarinen, 2015, s. 24). (Kymäläinen & Luostarinen, 2015, ss. 23–25)

Teoreettisesti biokaasutuotanto on tehokkaimmillaan silloin, kun mahdollisimman suuri osa syötteen kuiva-aineesta (TS) on helposti hajoavaa orgaanista materiaalia (VS), eli VS/TS-suhde on mahdollisimman korkea. Biokaasuprosessin veden määrään taas voidaan vaikuttaa valitsemalla joko sopiva biokaasun tuotantoprosessi saatavilla oleville syötteille tai valitsemalla olemassa olevaan biokaasuprosessiin sopiva syöteseos. Veden määrä optimoidaan käyttö- ja investointikustannusten vuoksi, sillä mitä enemmän syöte sisältää vettä, sitä suurempi reaktori tarvitaan ja sitä enemmän tarvitaan energiaa reaktorin lämmittämiseen. Kuiva-ainetta suhteessa veteen ei kuitenkaan voi olla liian paljon, koska mikrobit tarvitsevat toimiakseen vettä. Jatkuvatoimisessa märkä- ja kiintoprosessissa

syötteen on myös oltava pumpattavaa. Käytännössä biokaasuprosessin potentiaalisista raaka-aineista pyritään tekemään syöteseos, joka on kompromissi kuiva-aineen, orgaanisen aineen, veden määrän ja biokaasun tuottopotentiaalın välillä. Tavoitteena on, että prosessiin ei lisättäisi vettä, koska se lisää käyttökustannuksia ja on yksi työvaihe lisää. (Motiva, 2013, s. 8; Kymäläinen & Luostarinen, 2015, ss. 23–25)

#### 4.2.2 Syötteen vaikutus biokaasuprosessin orgaaniseen kuormitukseen

Syötteen orgaanisen kuiva-aineen (VS) määrä vaikuttaa biokaasuprosessin orgaaniseen kuormittavuuteen. Syötettä, jossa on vähän orgaanista ainetta, esimerkiksi naudon lietelanta, voidaan syöttää biokaasuprosessiin enemmän kuin sellaista syötettä, jossa on paljon orgaanista ainesta kuten biojätettä. (Kymäläinen, 2015b, ss. 72–73)

Reaktorin orgaanisella kuormituksella (Organic Loading Rate, OLR) tarkoitetaan syötteen orgaanisen aineksen enimmäismäärää, joka voidaan syöttää biokaasureaktoriin vuorokaudessa häiritsemättä biokaasuprosessin tasapainoa. Orgaaninen kuormitus, joka ilmaistaan yksiköllä  $\text{kgVS (m}^3\text{vrk)}^{-1}$ , lasketaan jakamalla syötteen orgaanisen kuiva-aineen (VS) vuorokautinen syöttömäärä reaktorin tilavuudella. Jos esimerkiksi syötteen orgaaninen kuiva-ainepitoisuus (VS) olisi 8 %, syötemäärä 200 l/vrk ja reaktorin koko  $4 \text{ m}^3$ , niin orgaaniseksi kuormittavuudeksi saataisiin  $4 \text{ kgVS (m}^3\text{vrk)}^{-1}$  olettaen syötteen tiheydeksi 1 kg/l (laskutoimitus:  $(200 \text{ l/vrk} \times 0,08 \text{ kgVS/l})/4 \text{ m}^3 = 4 \text{ kgVS (m}^3\text{vrk)}^{-1}$ ). (Kymäläinen, 2015b, s. 72)

Biokaasuprosessin sopivaa kuormitustasoa voidaan käytännössä testata nostamalla kuormitusta asteittain ja seuraamalla kuormitusnoston vaikutusta biokaasuprosessiin. Kun orgaaninen kuormitus nousee liian korkealle tasolle, biokaasun muodostuminen alenee mikrobitasapainon häiriintymisen vuoksi. Orgaanisen aineksen hajottajabakteerien määrä kasvaa ja hajoamistuotteita syntyy enemmän kuin metaanintuottobakteerit pystyvät niitä käyttämään hyväkseen. Lopputuloksena reaktorimassan pH alenee eivätkä metaanintuottobakteerit pysty enää kasvamaan ja tuottamaan biokaasua. (Kymäläinen, 2015b, ss. 72–73; Wellinger ym. 2013, s. 137)



Tasaisen biokaasun tuoton ja häiriöttömän tuotantoprosessin vuoksi biokaasureaktoriin ajettavan syötteen tulisi olla koostumukseltaan tasalaatuista ja syöttömäärä vakio. Mikäli syötteen koostumusta muutetaan, orgaanistakuormitusta kannattaa alentaa, jotta reaktorin mikrobit pystyvät mukautumaan uuteen syötekoostumukseen. Tällöin vältetään prosessin häiriötilanteilta. (Kymäläinen, 2015b, s. 73)

#### **4.2.3 Syötteen vaikutus biokaasuprosessin viipymäaikaan**

Syötteen orgaanisen kuiva-aineen (VS) määrä ja koostumus vaikuttavat biokaasuprosessin viipymäaikaan. Vähän orgaanista ainetta tai helposti hajoavaa orgaanista ainesta sisältävän syötteen viipymäaika voi olla lyhyempi kuin syötteen, joka sisältää hitaasti hajoavaa orgaanista materiaalia. (Kymäläinen, 2015b, s. 74)

Reaktorin viipymäajalla (Hydraulic Retention Time, HRT) tarkoitetaan aikaa, jonka kuluessa täyssekoitteen reaktorin sisältämä biomassa laskennallisesti vaihtuu kokonaan uudeksi. Mikäli kyseessä on reaktori, jossa sekoitusta ei ole, esim. panostoiminen reaktori, käytetään termiä Solid Retention Time (SRT). Tällöin viipymäaika on ajanjakso, joka alkaa prosessin panostamisesta ja loppuu panoksen purkamiseen. Laskennallisesti viipymäaika, HRT määritellään reaktorin koon ja orgaanisen kuormittavuuden (OLR) suhteena. Esimerkiksi jos luvun 4.2.2 (s. 9) esimerkin 4 m<sup>3</sup> reaktoriin ajetaan syötettä 200 l/vrk (0,2 m<sup>3</sup>/vrk), niin syötteen viipymäajaksi saadaan 20 vrk (laskutoimitus: 4 m<sup>3</sup> / (0,2 m<sup>3</sup>vrk)<sup>-1</sup> = 20 vrk). (Kymäläinen, 2015b, s. 74)

Viipymäajan pituuteen vaikuttavat syötteen koostumus, biokaasureaktorin tyyppi, prosessin lämpötila sekä orgaanisen aineksen hajoamiselle asetettu tavoitetaso. Mitä helpommin syötteen sisältämä orgaaninen aines hajoaa, sitä lyhyempi on viipymäaika, ja mitä pidemmälle orgaanisen aineksen halutaan hajoavan, sitä pidempi viipymäaika valitaan. Esimerkiksi biojäte hajoaa helposti ja siksi viipymäaika on tyypillisesti 15–20 vrk, kun taas peltobiomassan hajoaminen tarvitsee paljon pidemmän ajan, usein 30–50 vrk. Termofiilisessä prosessilämpötilassa orgaaninen aines hajoaa nopeammin kuin mesofiilisessä prosessissa, joten prosessilämpötilan noustessa viipymäaika lyhenee. (Kymäläinen, 2015b, s. 74)

#### 4.2.4 Orgaanisen kuormituksen ja viipymääjan keskinäinen suhde

Reaktorin orgaaninen kuormitus ja viipymääika ovat sidoksissa toisiinsa. Mitä korkeampi reaktorin orgaaninen kuormitus on, sitä lyhyemmäksi viipymääika muuttuu, kun reaktorin koko pysyy samana. Kun orgaaninen kuormitus kasvaa ja viipymääika sen vuoksi lyhenee, biokaasun tuotanto pysyy samalla tasolla, kunnes saavutetaan viipymääjan pituuden alaraja. Alaraja viipymääjan pituudelle ja yläraja orgaaniselle kuormitukselle määräytyvät metaanintuottobakteerien kasvunopeuden mukaan. Metanogeeniset bakteerit kasvavat hitaasti ja siksi täyssekoitteisissa märkämädätysreaktoreissa, joissa syötemassa on jatkuvassa liikkeessä, viipymääjan on oltava vähintään 10–12 vrk. Mikäli viipymääika on tätä lyhyempi, metanogeeniset bakteerit huuhtoutuvat mädätteen mukana pois reaktorista ja biokaasun muodostuminen loppuu. Tämän lisäksi orgaanisen kuormituksen ja viipymääjan keskinäiseen suhteeseen vaikuttaa biokaasuprosessin syötekoostumus. Jos syöteseos sisältää esim. paljon kasviperäistä biomassaa, se vaatii pitkän viipymääjan, ja sen vuoksi orgaanisen kuormituksen on oltava alhainen. (Kymäläinen, 2015b, ss. 74–75; Wellinger ym., 2013, s. 137)

## 5 Biokaasun tuotantoprosessit

Biokaasun tuotantoprosessi valitaan syötemateriaalin ja -määrän perusteella. Jotta mikrobit pystyvät käyttämään hyväkseen biomassaa ja sitä voidaan biokaasulaitoksessa käsitellä, syötteen on oltava melko hienojakoista. Tarvittaessa syötemateriaalia muokataan, esimerkiksi murskataan, ennen biokaasuprosessia. (Luostarinen, 2015, ss. 82–83)

### 5.1 Biokaasun tuotantoprosessien periaatteet

Biokaasun tuotantoprosessi jaetaan perinteisesti märkämädätys- ja kuivämädätystekniikkaan. Ero näiden kahden prosessin välillä on syötteen kuiva-ainepitoisuus. Märkämädätyksessä syötteen kuiva-ainepitoisuus (TS) on enintään 15 % ja kuivämädätyksessä syötteen kuiva-ainepitoisuus on yleensä 20–40 %, eli syöte pysyy kasalla. Lisäksi käytetään termiä kiintomädätys biokaasuprosessista, jossa syötteen kuiva-ainepitoisuus on korkeampi kuin perinteisessä märkämädätyksessä, mutta kuitenkin enintään 20 % (Luke, n.d.). (Luostarinen, 2015, s. 83)

### 5.1.1 Märkämädätysprosessi

Märkämädätysperiaatteella toimiva biokaasuprosessi sisältää jatkuvatoimisen, täyssekoitteen reaktorin. Siinä syötettä pumpataan reaktoriin ja vastaavasti reaktorista pumpataan sama määrä mädätettä pois. Reaktorissa biomassaa sekoitetaan mekaanisesti ja reaktorin lämpötilaa pidetään yllä yleensä lämmittämällä reaktorin sisältöä ja eristämällä reaktori hyvin. Märkämädätysprosessiin voidaan lisätä nestemäisen syötteen, esimerkiksi naudun lietelannan, lisäksi myös kuivia syötteitä, kunhan ne on käsitelty hienojakoiseksi eikä reaktoriin pumpattavan syöteseoksen kuiva-ainepitoisuus ole yli 15 %. Mikäli syötteen kuiva-ainepitoisuus nousee yli 15 %, nesteen lisääminen syötteeseen on mahdollista, mutta ei ehkä kannattavaa, sillä se todennäköisesti lisää sekä työmäärää että laiteinvestointi- ja laitoksen operointikuluja. Nesteenä voidaan käyttää esimerkiksi mädätteen nestejätettä, joka kierrätetään prosessin alkuun. (Luostarinen, 2015, s. 83)

### 5.1.2 Kuivamädätysprosessi

Kuivamädätysprosessi voi olla joko panostoiminen tai jatkuvatoiminen. Panostoimisessa kuivamädätysprosessissa reaktori täytetään syötteellä, suljetaan ja mikrobien annetaan tuottaa biokaasua syötteestä haluttu aika, minkä jälkeen reaktorin sisältö tyhjenetään. Reaktoriin lisätään aiemman panosprosessin mädätettä ”ympiksi”, jotta mätäneminen alkaa nopeasti. Tasaisen kaasuntuoton turvaamiseksi reaktoreita on useita, joista jokainen on mädätysprosessin eri vaiheessa. Panostoimisen kuivamädätyksen hyvänä puolena on helppohoitoisuus ja toimintavarmuus, huonona puolena taas mahdolliset hajuhaitat reaktoria täytettäessä ja tyhjäyttäessä. Lisäksi panostoimisen mädätysprosessin kaasuntuotanto ei ole vakio. Prosessin alussa muodostuu enemmän hiilidioksidia kuin metaania, myöhemmin päinvastoin. Prosessin lopussa biokaasun tuotanto hiipuu. (Luostarinen, 2015, ss. 83, 87; Motiva, 2013, s. 17; Metener Oy, 2017)

Kuivamädätysprosessi voi olla myös jatkuvatoiminen. Prosessi perustuu vaakatasossa olevaan reaktoriin ja tulppavirtaukseen. Biokaasureaktorin toisesta päästä kuivaa syötettä annostellaan reaktoriin yhdessä ”ympin” kanssa ja toisesta päästä mädäte puretaan pois. ”Ympin” sekoittaminen syötteeseen takaa biokaasuntuotannon nopean aloituksen ja tasaisen biokaasun tuotannon. Jatkuvatoiminen kuivamädätysprosessi soveltuu lähinnä

suurelle määrälle kuivaa syötettä, ja siksi se on lähinnä suurten biokaasulaitosten käytössä (Luostarinen, 2015, s. 86; Doranova Oy, n.d.a). Lisäksi kuivamädätysprosessissa reaktorin sisällön sekoittuminen voi olla haasteellista, jolloin mädäte sellaisenaan ei välttämättä ole kelvollista lannoitustarkoitukseen. (Luostarinen, 2015, s. 86)

### 5.1.3 Kaksivaiheinen anaerobinen mädätysprosessi

Anaerobisen mädätysprosessin haaste perinteisessä yksivaiheisessa prosessissa on reaktoriolosuhteiden pitäminen sellaisena, että sekä orgaanisen materiaalin hajoaminen eli alun hydrolyysivaihe että varsinainen metaanintuotto, metanogeneesi, ovat mahdollisia. Prosessin pullonkaulana voi olla joko orgaanisen aineksen hidas hajoamisvaihe, esimerkiksi paljon lignoselluloosaa sisältävillä syötteillä, tai metanogeneesi, jossa orgaaninen aines, kuten biojäte, hajoaa huomattavasti nopeammin kuin biokaasua muodostuu (Srisowmeya ym., 2020). Orgaanisen aineksen hajoamisen ja metaanintuoton erottamisella kahteen eri reaktoriin voidaan optimoida orgaanisen aineksen hydrolyysiprosessia tai metanogeneesiä häiritsemättä toista prosessia. (Micolucci ym., 2018; Kymäläinen, 2015b, ss. 62–63)

Kaksivaiheinen mädätysprosessi perustuu siihen, että mädätysprosessin hydrolyysi-, fermentaatio- ja asetogeneesivaihe tapahtuvat yhdessä reaktorissa ja metanogeneesi pääosin jälkimmäisessä reaktorissa (Kuva 1, s. 3). Kaksivaiheisen biokaasuprosessin mikrobipopulaatiot molemmissa reaktoreissa vaihtelevat syötteen mukaan (Rajendran ym., 2020). Kun metaania tuotetaan helposti hajoavasta orgaanisesta materiaalista kuten biojätteestä, ensimmäisen vaiheen reaktorin viipymäaika (HRT) pidetään lyhyenä (2–3 vrk), orgaaninen kuormitus korkeana ja pH happamana (pH 5,5–6,5). Näissä olosuhteissa orgaanisen aineksen hajoaminen (fermentaatiovaihe) tapahtuu nopeasti ja mikrobit muodostavat vetyä ja haihtuvia rasvahappoja (volatile fatty acids, VFA). Metaanin muodostuminen haihtuvista rasvahapoista tapahtuu jälkimmäisessä reaktorissa, jossa olosuhteet suosivat metaanibakteerien kasvua. Optimi-pH on tällöin 6–8 ja viipymäaika tyypillisesti 10–18 vrk. Kun metaania tuotetaan syötteestä, jonka kuiva-ainepitoisuus on korkea, ensimmäisen reaktorin lämpötilaa voidaan nostaa termofiilisten hajottajabakteerien suosimaan lämpötilaan 50–55 °C, jolloin hajoaminen nopeutuu (Rajendran ym., 2020). (Pramarik ym., 2019; Micolucci ym. 2018; Rajendran ym., 2020; Srisowmeya ym., 2020)

Kaksivaiheisen biokaasuprosessin etuina ovat parempi metaanintuotto, korkea orgaaninen kuormitus (OLR) ja mädätysprosessin parempi stabiilius. Kaksivaiheista mädätysprosessia voidaan käyttää erityisesti syötteille, joiden kuiva-ainepitoisuus on korkeahko ja biohajoavuus vähäistä, esimerkiksi lignoselluloosaa sisältävälle biomassalle (Micolucci ym., 2018, Rajendran ym., 2020, Aslanzadeh ym., 2013). Lisäksi kaksivaiheisella mädätysprosessilla voidaan hallita syötteen mahdollisia patogeeneja ja rikkakasvien siemeniä, koska orgaanisen materiaalin hydrolyysi tapahtuu tehokkaasti termofiilisessä lämpötilassa (Tontti & Mäkelä-Kurtto, 1999). (Pramanik ym., 2019)

## **5.2 Suomalaisen laitetoimittajien kaupallisia maatilamittaluokan biokaasulaitosratkaisuja**

Suomessa on useita maatilamittaluokan biokaasulaitoksia toimittavia yrityksiä. Näitä ovat esimerkiksi Biovoima Oy, Demeca Oy, Doranova Oy, EcoProtech Oy, Metener Oy ja Watrec Oy. Uusiutuvan energian toimialalla toimii myös Envitecpolis Oy, joka tarjoaa asiantuntijapalveluita biokaasuinvestoinnin kannattavuuteen, suunnitteluun ja toteutukseen (Envitecpolis Oy, n.d.).

### **5.2.1 Biovoima Oy**

Biovoima Oy toimittaa saksalaisen Schmack Biogas GmbH:n biokaasulaitosratkaisuja. Muista alan toimijoista poiketen yritys tarjoaa kaksivaiheista mädätysprosessia, jossa anaerobisen mädättämisen hydrolyysivaihe tapahtuu ensimmäisessä reaktorissa ja metaanintuotto jälkimmäisessä reaktorissa (tekninen asiakkuuspäällikkö Tero Kemppe, Biovoima Oy, henkilökohtainen tiedonanto 16.11.2020). Kaksivaiheisen mädätysprosessin periaate on esitetty luvussa 5.1.3 (s. 13). Biokaasulaitosten lisäksi yrityksen tarjontaan kuuluvat myös mm. kaasunjalostusyksiköt, kaasutankkausasemat ja CHP-yksiköt. (Biovoima Oy, 2019a)

### **5.2.2 Demeca Oy**

Demeca Oy tarjoaa maatilakokoluokan biokaasulaitoksia patentoidulla ns. Demeca Kiintomädätys®-teknologialla. Biokaasulaitoksessa on mahdollista käyttää syötteenä sekä märkiä että kuivia jakeita. Syöteseoksen kuiva-ainepitoisuus voi olla välillä 0–20 % ja

laitoksen pääsyötteenä käytetään eläinten lietelantaa. Lisäksi prosessissa voidaan käyttää esimerkiksi ylijäämärehua. Biokaasulaitos koostuu moduuleista, jolloin laitosta voi muunnella tai sen kapasiteettia kasvattaa. Demeca Oy:n mukaan biokaasulaitoksilla on jopa jälleenmyyntiarvoa tilanteissa, joissa eläinten pitäminen lopetetaan ja sen vuoksi biokaasulaitokselle ei enää ole tarjolla syötettä. (Demeca Oy, 2020a; myyntijohtaja Sami Vinkki Demeca Oy, henkilökohtainen tiedonanto 10.11.2020)

Biokaasulaitoksen gFix-esikäsitteily-yksikössä syötteen murskataan tasaiseksi, juoksevaksi ja pumpattavaksi massaksi. Kuivien syötteen murskaaminen lisää syötemassan pinta-alaa, mikä mahdollistaa tehokkaan mikrobitoiminnan ja runsaan biokaasun tuoton. Varsinaisessa biokaasureaktorissa on biosuodatin, joka poistaa tuotetusta biokaasusta pahanhajuista ja jatkojalostusta haittaavat rikkiyhdisteet. Demeca Oy:n mukaan biokaasulaitos tai mädätysjäätös ei haise, eikä mädätteestä separoitu neste aiheuta hajuhaittaa peltovetyksessä. (Demeca Oy, 2020a)

Biokaasu puhdistetaan ja kuivataan laitoksen gPower-yksikössä. Tämän jälkeen se johdetaan generaattorille sähkön ja lämmöntuotantoa varten. gPower-yksikkö sisältää myös kaasupolttimen ja lämmityskattilan, jolla voidaan tarvittaessa tuottaa lisälämpöä esim. pakkasjakson aikana. (Demeca Oy, 2020a)

Demeca Oy:n tarjoaa useita eri laitostyyppejä joko lietelaitoksena tai lietelaitoksena, jossa myös kuivat syötteen ovat mahdollisia. Reaktorien prosessitilavuudet ovat 565–1 800 m<sup>3</sup> ja arvonlisäverottomat hinnat olivat 450 000–895 000 euroa vuonna 2020. Biokaasulaitokseen kuuluvat moduulit on valmistettu Suomessa. Demeca Oy tarjoaa myös kattavan huoltosopimuksen laitoksilleen (Demeca Oy, 2020a). (Demeca Oy, 2020b)

### **5.2.3 Doranova Oy**

Doranova Oy toteuttaa märkämädätyslaitoksia sekä maataloille että suurille biokaasuenergian tuottajille (Doranova Oy, n.d.a). Suuret biokaasureaktorit ovat saksalaisen Weltec Biopower GmbH:n suunnittelema ja toimittama. Doranova Oy on toimittanut biokaasulaitosratkaisuja lähinnä suurille toimijoille, esim. useiden maatilojen yhdessä

omistamalle biokaasulaitosyritykselle Varsinais-Suomeen sekä BioKymppi Oy:lle (Doranova Oy, n.d.b; Doranova Oy, n.d.a).

Doranova Oy on kehittämässä maatilamittaluokan märkämädättämöratkaisua, jonka toteuttamisessa voidaan käyttää maatilalla olemassa olevaa infrastruktuuria esimerkiksi lietelantasäiliötä. Tällainen biokaasulaitos on rakenteilla Kiteelle BioKymppi Oy:lle, ja reaktori rakentuu betonilaatoista, joita lisäämällä tai vähentämällä reaktorin kokoa voidaan muokata kullekin asiakkaalle sopivaksi (toimialajohtaja Mikko Saalasti, Doranova Oy, henkilökohtainen tiedonanto 4.12.2020).

#### **5.2.4 EcoProtech Oy**

EcoProTech Oy suunnittelee ja toteuttaa sekä teollisen laitokseen että maatilamittaluokan biokaasulaitoksia. Yritys on kuitenkin keskittynyt suunnittelemaan ja toimittamaan teollisen laitokseen biokaasulaitoksia, ja se on toimittanut teollisen laitokseen biokaasulaitoksen mm. Etelä-Karjalan jätehuolto Oy:lle Lappeenrantaan ja Pirkanmaan jätehuolto Oy:lle Nokialle. Maatiloille yritys tarjoaa kehittämänsä korkeakuormitteisella biokaasuprosessilla toimivaa laitosta, jossa prosessiin voidaan syöttää sekä lietelantaa, kuivalantaa että viherbiomassaa. Prosessi voidaan toteuttaa tarvittaessa termofiilisenä, jolloin erillistä syötteiden hygienisointia ei tarvita. (Lunden & Niittymaa, 2020; EcoProtech Oy, n.d.a; EcoProtech Oy, n.d.b; EcoProtech Oy, n.d.c)

#### **5.2.5 Metener Oy**

Metener Oy toimittaa biokaasulaitoksia joko avaimet käteen -periaatteella tai osatoimituksena siten, että toimitetaan vähintään prosessisuunnittelu. Metener Oy tarjoaa sekä jatkuvatoimisia märkämädätys- että panostoimisia kuivämädätysreaktoreita biokaasutuotantoon. Jatkuvatoimiseen märkämädätysreaktoriin voidaan syöttää lietelantaa, jätevesilietteitä, biojätettä tai elintarviketeollisuuden sivutuotteita sekä rajoitetusti kuivalantaa ja kasvibiomassaa. Laitoksessa on isot, rakenteeseen integroidut kaasuvälikammiot. Prosessin viipymäaika pyritään pitämään pitkänä, mikä helpottaa laitoksen operointia. (Metener Oy, 2017)

Metener Oy:n panostoimisessa kuivamädätysreaktorissa on mahdollista mädättää orgaanista ainesta, jota voidaan läjittää. Tällaisia jakeita ovat esimerkiksi eläinten kuivalanta, peltokasvit, olki ja järvihiomassa sekä lietelannan kuivajae. Kuivamädätysprosessi koostuu useista reaktoreista, joissa panoksia vaihdetaan kolmen kuukauden välein. Useiden samanaikaisten, mutta eri prosessivaiheissa olevien panosten yhtäaikainen mädätys mahdollistaa tasaisen biokaasuntuoton. Panostoimisessa prosessissa ei tarvita sekoittimia, syöttölaitteita eikä jatkuvaa henkilöstön läsnäoloa. Yksinkertainen panosprosessi on siksi helppohoitoinen, eikä se vikaannu herkästi. (Metener Oy, 2017)

### **5.2.6 Watrec Oy**

Watrec Oy tarjoaa kokonaisvaltaista palvelua sekä biokaasulaitoksen suunnitteluun ja rakennuttamiseen että biokaasulaitoksen toimintaan liittyvien viranomais selvitysten laatimiseen. Asiakasreferenssien perusteella Watrec Oy on keskittynyt rakennuttamaan suurien toimijoiden biokaasulaitoksia. Referensseinä ovat mm. Oulun jätehuolto Oy:n alueella toimiva Gasum Oy:n biokaasulaitos ja Honkajoelle rakennettu biokaasulaitos, joka palvelee mm. Honkajoki Oy:n tarpeita. Watrec Oy tarjoaa myös asiantuntijapalvelua jo olemassa olevien biokaasulaitosten laajentamiseen ja teknisiin parannuksiin. (Watrec Oy, n.d.a; Watrec Oy, n.d.b; Watrec Oy, n.d.c)

## **6 Biokaasuprosessin lopputuotteiden käsittely**

Biokaasuprosessin lopputuotteita ovat biokaasu ja mädäte. Molempia tuotteita voidaan käyttää hyödyksi joko sellaisenaan tai jalostaa edelleen lopputuotteeksi. Biokaasu sisältää metaania noin 45–75 %, hiilidioksidia 20–55 %, typpeä 0–2 %, vähäisen määrän vetyä sekä epäpuhtauksia (Lampinen & Rautio, 2015, s. 128). Mädäte taas sisältää syötteen alkuperäiset ravinteet ja hivenaineet lukuun ottamatta sitä osaa hiilestä, hapesta ja vedystä, joista biokaasu on muodostunut. Biokaasuprosessin aikana organisesta aineksesta hajoaa tyypillisesti 40–70 %. (Suomen ympäristökeskus, 2018)



## 6.1 Biokaasun hyödyntäminen

Biokaasuprosessissa syntyvä raakabiokaasu voidaan periaatteessa sellaisenaan käyttää lämmöntuotantoon tai teollisuuden prosessilämmöksi. Käytännössä se kuitenkin puhdistetaan epäpuhtauksista ennen käyttöä tai jatkojalostusta, jotta energiantuotantolaitteet ja jalostusyksiköt eivät vaurioituisi. Puhdistusprosessissa poistetaan epäpuhtauksista ainakin vesihöyry ja rikkivety, jotka yhdessä muodostavat laitteistoja syövyttävää rikkihappoa. Korroosion lisäksi toinen syy raakabiokaasun puhdistamiseen voi olla se, että biokaasua käyttävän energiantuotantoprosessin päästöt on pidettävä lainsäädännön raja-arvoissa. Raakabiokaasua voidaan joutua polttamaan ns. soihtupolttimella vikatilanteissa tai jos biokaasulle ei ole muuta käyttöä. Soihtupolton tarkoituksena on polttaa voimakas kasvihuonekaasu, metaani, vähemmän haitalliseksi hiilidioksidiksi. Tästä syystä jokaisella biokaasulaitoksella on soihtupoltin. Biokaasua voidaan puhdistuksen jälkeen hyödyntää sellaisenaan polttamalla sitä joko lämpökattilassa, jossa syntyy lämpöenergiaa, tai CHP-yksikössä (Combined Heat and Power, CHP), jossa muodostuu sekä sähköä että lämpöä. (Lampinen & Rautio, 2015, ss. 126, 131, 133, 150)

Biokaasun jalostuksella tarkoitetaan kaasun energiasisällön kasvattamista vähentämällä siitä inerttejä kaasuja, lähinnä hiilidioksidia. Liikennekäyttöä varten biokaasun metaanipitoisuus jalostetaan vähintään 95 %:ksi, jotta se toimisi kaikissa kaasukäyttöisissä autoissa. Tarvittaessa esimerkiksi maatalan moottoriajoneuvoja voidaan muuntaa siten, että vähemmän jalostettu biokaasu toimii polttoaineena. Jos jalostettu biokaasu halutaan syöttää maakaasuverkkoon, metaanin pitoisuuden on oltava vähintään samalla tasolla kuin verkon metaanipitoisuus. Suomessa myytävä maakaasu sisältää metaania noin 98 % sekä typpeä ja etaania noin 2 %. Hiilidioksidipitoisuus tulisi olla enintään 1,5 mol-% verkkoon syötettävän metaanikaasun lämpöarvon vuoksi. Hiilidioksidipitoisuus voi olla myös suurempi kuin 1,5 mol-%, jos biokaasusta jalostetun metaanin osuus maakaasuun verrattuna on pieni, jolloin biometaanin sisältämä hiilidioksidi laimenee maakaasuun. Hiilidioksidin suurin sallittu pitoisuus yleisessä kaasuverkossa on kuitenkin 2,5 mol-% (SFS-EN 16726/2018, s. 7). (Mutikainen ym., 2016, s. 13)

## 6.2 Mädätteen hyödyntäminen

Biokaasuprosessista jäljelle jäänyttä mädätettä voidaan hyödyntää ainakin lannoitteena ja maanparannusaineena. Mädätteen ravinnesisältöön ja rakenteeseen vaikuttavat mm. syötteen koostumus, biokaasuprosessi ja viipymäaika. Mädätteen käyttöä myös eläinten kuivikkeena on tutkittu (Frontelius, 2018; Ravinnerenki ja Lantalogistiikka -hankkeet, 2019, ss. 12–13). (Motiva, 2013, s. 13)

### 6.2.1 Mädätteen ravinteiden hyödyntäminen

Mädäte soveltuu erinomaisesti lannoitteeksi tai maanparannusaineeksi, koska se sisältää lähes kaikki syötteen ravinteet ja hivenaineet kuten typen, fosforin ja kaliumin. Biokaasuprosessin aikana syötteen orgaanisesta aineksesta hajoaa tyypillisesti 40–70 %, ja osa ravinteista muuntuu kasvien kannalta jopa paremmin hyödynnettäväksi kuin alkuperäisen syötteen ravinteet. Esimerkiksi typpi mineralisoituu liukoiseen muotoon ammoniumtypeksi, jota kasvit voivat helposti hyödyntää. Mädätteen tuestä keskimäärin 40–60 % onkin liukoisena ammoniumtyyppenä. Mädäte muuttuu myös syötettä tasalaatuisemmaksi ja myös hygieenisemmäksi, sillä prosessi tuhoaa mm. rikkakasvien siemeniä ja taudinaiheuttajia. (Suomen ympäristökeskus, 2018; Paavola & Kapuinen, 2015, ss. 94–95)

Mädätteen käyttöä lannoitteena rajoittaa yleensä sen matala ravinne- ja korkea vesipitoisuus. Sitä kannattaa levittää lannoitteena peltoon vain biokaasulaitoksen lähietäisyydellä, koska laimean lannoiteliuoksen kuljettaminen ei ole taloudellisesti kannattavaa. Mädäte usein separoidaan tyypipitoiseksi neste- ja fosforipitoiseksi kuivajakeeksi, jolloin lannoitustarpeen mukaan voidaan pellolle levittää joko neste- tai kuivajaetta. Suurissa biokaasulaitoksissa nestejaetta voidaan jatkokäsitellä lannoitekäyttöön mm. vettä haihduttamalla tai muuttamalla liukoinen ammoniumtyppi ensin kaasumaiseksi ammoniakiksi ja edelleen lauhduttamalla ammoniakivessihöyry nesteeksi (nk. strippausmenetelmä). Vastaavasti kuivajae voidaan kuivata ja rakeistaa maanparannusaineeksi. Kuivaamisen ja rakeistamisen heikkous on korkea energiankulutus. (Paavola & Kapuinen, 2015, ss. 102–103, 110–111)

## 6.2.2 Mädatteen käyttäminen eläinten kuivikkeena

Mädatteen kuivajaetta voitaneen käyttää eläinten kuivikkeena Suomessa. Koska biokaasuprosessi vähentää patogeenisten bakteerien määrää ja stabiloi lietelannan orgaanista ainetta, mädatteen kuivajaetta käytetään Yhdysvalloissa lypsykarjatiljoilla kuivikkeena (Pelaez-Samaniego, ym., 2017). Doranova Oy:n biokaasutoimialan johtajan Mikko Saalastin (henkilökohtainen tiedonanto 4.12.2020) mukaan mädatteen kuivajakeen käyttämiseen karjan kuivikkeena saattaa kuitenkin liittyä ongelmia: koska mädatteen kuivajae sisältää yleensä pitkälle hajonnutta, hienojakoista orgaanista ainesta, kuivajae kostuessaan liettyy savimaiseksi massaksi, joka sotkee ja jota voi olla hankala siivota.

Suomessa on selvitetty kompostoidun lehmänlannan ja raakalietelannasta separoidun käsittelemättömän kuivajakeen käyttöä eläinten kuivikkeena. Saatuja tuloksia voitaneen ainakin osittain soveltaa myös mädatteen kuivajakeeseen. Esimerkiksi opinnäytetyössä, jossa tutkittiin kompostoidun lehmänlannan käyttöä kuivikkeena, kompostoidun lannan todettiin imevän kosteutta nopeammin kuin kutteripurun (Taavo, 2013, s. 36). Biokaasuprosessin läpikäynyt orgaaninen materiaali voisi mahdollisesti myös pidättää kosteutta käsittelemätöntä ainesta paremmin.

Luonnonvarakeskuksen (Luke) Maaningan tutkimusnavetassa on testattu raakalietelannasta separoitua käsittelemätöntä kuivajaetta, ja todettu sen toimivan yhtä hyvin kuin turvekuivike. Kuivikkeiden välillä ei esimerkiksi havaittu merkitsevää eroa maidon solumäärissä. Tulokset ympäristöperäisten utaretulehdusten ja kuivajakeen käytön välillä sen sijaan olivat ristiriitaisia, mikä mahdollisesti johtui pienestä tutkimusaineistosta. Samaisessa tutkimuksessa todettiin, että lietelannan kuivajakeen käyttö kuivikkeena ei vaikuttanut lehmien päivittäiseen makuaikaan. Tutkimustilalla on ollut ainakin vuonna 2018 käytössä kuivikesekoitus, jossa on 50 % olkea ja 50 % lietelannan kuivajaetta. (Frontelius, 2018; Ravinnerenki ja Lantalogistiikka -hankkeet, 2019, ss. 12–13)

## 7 Biokaasulaitostoiminnan vaatimat luvat ja ilmoitukset

Biokaasulaitostoiminta vaatii useita viranomaislupia ja ilmoituksia, joista osa kohdistuu suunnittelu- ja rakennusvaiheeseen ja osa biokaasulaitoksen päivittäiseen toimintaan.

Lupamenettelyillä varmistetaan, että biokaasulaitoksen tekniikka, turvallisuus ja ympäristönäkökohdat täyttävät lainsäädännön asettamat vaatimukset. (Saalasti & Paavola, 2015, s. 181)

## 7.1 Ympäristölupa

Biokaasulaitoksen perustaminen ja operointi vaativat pääsääntöisesti ympäristöluvan. Ympäristönsuojelulain 527/2014 mukaan ympäristölupa vaaditaan toiminnalta, joka voi aiheuttaa vaaran ympäristön pilaantumisesta. Em. lain 27 §:n mukaan mm. jätteiden ammattimainen tai laitospäinen käsittely vaatii aina ympäristöluvan. Sen sijaan, jos biokaasulaitos on pienimuotoinen ja käsittelee ainoastaan kasvibiomassaa tai jos syötteenä ovat peräisin biokaasulaitoksen maatilalta ja lopputuotteet myös käytetään samalla maatilalla, ympäristölupaa ei välttämättä tarvita (ProAgria Pohjois-Karjala, n.d; Doranova Oy, n.d.a; Maanosaaja, 2017). Lisäksi ympäristölupa tarvitaan myös silloin, kun toiminta saattaa aiheuttaa naapuruussuhteisiin kohtuutonta rasitusta (Ympäristönsuojelulaki 527/2014 § 27). Biokaasulaitoksen toiminta voi asutulla seudulla toimintahäiriöiden aikana aiheuttaa hajuhaittaa, jonka voidaan katsoa aiheuttavan rasitusta naapurustolle. Vaikka ympäristölupa ei olisi pienimuotoiselle biokaasun tuotannolle pakollinen, sellainen saattaa kuitenkin olla tarpeellinen laitoksen toiminnan vuoksi, koska luvanvaraisesta toiminnasta on hankalampi valittaa. (MTK, n.d.)

Jos maatilakokoluokan biokaasulaitoksessa käsitellään ainoastaan tilan omia syötteitä, esim. lietelantaa ja ylijäämärehua, ja se rakennetaan eläinsuojan yhteyteen, biokaasulaitos voidaan liittää osaksi ko. eläinsuojan ympäristölupaa (ProAgria Pohjois-Karjala, n.d). Jos biokaasulaitos käyttää myös maatilan ulkopuolisia syötteitä, laitos tulkitaan ympäristölain 527/2014 27 §:n mukaiseksi laitospäiseksi käsittelypaikaksi lukuun ottamatta tilannetta, jossa vastaanotettava syöte, esim. ratsastuskeskuksen hevosen kuivikelanta, tulkitaan maatilamaiseksi syötteenä (ylitarkastaja Merja Torniainen, Ruokavirasto, henkilökohtainen tiedonanto 6.10.2020).

Ympäristölupa haetaan ympäristönsuojeluasetuksessa 713/2014 mainitulta lupaviranomaiselta kirjallisesti. Mikäli biokaasulaitoksessa käsitellään jätettä alle 20 000 tonnia vuodessa, lupa haetaan kunnan ympäristönsuojeluviranomaiselta. Mikäli käsiteltävän

syötteen vuosittainen määrä on vähintään 20 000 tonnia, ympäristölupa haetaan valtion ympäristönsuojeluviranomaiselta. Ympäristölupahakemuksen lisäksi on tehtävä ympäristövaikutusten arviointi, ns. YVA-menettely, jos biokaasulaitoksen vuosittainen käsittelemä jätemäärä on vähintään 35 000 tonnia (Laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä 252/2017 Liite 1). Maatiloilla biokaasulaitokset hyvin harvoin käsittelevät jätettä yli 35 000 tonnia vuodessa. (Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta 713/2014)

Ympäristölupapäätöksessä määritellään lupaehdot, joiden noudattaminen on edellytys ympäristöluvan voimassaololle. Ne määrittelevät esimerkiksi biokaasulaitoksen toimintatavat ja rajat, jotka lupaviranomainen on arvioinut ympäristön käytön ja rasituksen kannalta tarkoituksenmukaisiksi. Lupaehdot perustuvat vallitseviin toimipaikkakohtaisiin olosuhteisiin, kuten biokaasulaitoksen operointiin tai mädätteen käyttöön lannoitteena. (MTK, n.d.)

## **7.2 Laitoshyväksyntä**

Biokaasulaitos tarvitsee Ruokaviraston laitoshyväksynnän, mikäli se käyttää syötteenä sivutuotelaissa 517/2015 määriteltyä luokan 3 eläinperäistä materiaalia. Tällaisia syötteitä ovat mm. kalanperkuujäte, eläinperäinen lemmikki- ja tuotantoeläinten rehu, biojäte ja teurastettujen eläinten osat, joilla ei ole kaupallista käyttöä. Syötteenä voidaan käyttää myös eläinten lantaa, joka kuuluu luokkaan 2. Luokan 1 eläinperäistä materiaalia ei voida käyttää biokaasulaitoksen syötteenä. Laitoshyväksyntä tarvitaan myös silloin, kun biokaasulaitos ottaa vastaan muitakin kuin vain eläinperäisiä elintarviketeollisuuden jäte- tai sivutuotteita esimerkiksi mäskiä. (Laki eläimistä saatavista sivutuotteista, 517/2015; Ruokavirasto, 2019a; Ruokavirasto, 2020; ylitarkastaja Merja Torniainen, Ruokavirasto, henkilökohtainen tiedonanto 6.10.2020)

Mikäli biokaasulaitoksen syötteet ovat peräisin omalta maatilalta ja mädäte myös hyödynnetään omalla maatilalla, laitoshyväksyntää ei tarvita, vaikka syötteenä käytettäisiinkin eläinten lantaa. Tällöin biokaasulaitoksen syötteenä voi käyttää ns. yhteislantala-periaatteella myös muiden lähiseudun eläinten lantaa ilman laitoshyväksyntää (ylitarkastaja Merja Torniainen, Ruokavirasto, henkilökohtainen tiedonanto 6.10.2020).

### 7.3 Tuotehyväksyntä

Mikäli biokaasuntuotannon mädätettä halutaan käyttää maanparannusaineena muualla kuin omalla maatilalla, maanparannusaineen myynti edellyttää Ruokaviraston tuotehyväksyntää (Lannoitevalmistelaki 539/2006).

### 7.4 Rakennuslupa

Maankäyttö- ja rakennuslain 132/1999 mukaan rakennuslupa biokaasulaitoksen rakennuttamiseen haetaan kunnan rakennusvalvontaviranomaiselta.

Rakennuslupahakemukseen liitetään mm. rakennussuunnitelmaan liittyvät piirustukset.

Hakemukseen voidaan edellyttää liitettäväksi esimerkiksi energiaselvitys ja selvitys rakennuspaikan perustamis- ja pohjaolosuhteista.

### 7.5 Räjähdyssuojausasiakirja

Biokaasulaitokselle on ennen tilojen käyttöönottoa laadittava räjähdysuojausasiakirja, koska biokaasu luokitellaan erittäin helposti syttyväksi kaasuksi (Mutikainen ym., 2016, s. 23; Tukes, n.d.). Vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuutta koskevan lain mukaan ”toiminnanharjoittajan on huolehdittava siitä, että räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamia vaaratekijöitä ja räjähdysvaaran aiheuttamia riskejä arvioitaessa laaditaan räjähdysuojausasiakirja” (Laki vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuudesta 390/2005 § 44).

Räjähdyssuojausasiakirjaan on sisällytettävä mm. räjähdysvaaraa aiheuttavat aineet, tiloissa työskentelevien henkilöiden määrä, räjähdysvaarasta tehty vaaranarviointi, selvitys teknisistä ja henkilösuojaustoimista sekä olosuhteet, joissa räjähdysvaaraa voi esiintyä.

Räjähdyssuojausasiakirjaa on päivitettävä, mikäli tiloihin, työskentelyyn tai välineisiin tulee oleellisia muutoksia. Räjähdyssuojausasiakirjan pitäminen ajan tasalla on toiminnanharjoittajan vastuulla. (Tukes, n.d.)

## 7.6 Ilmoitus pelastusviranomaisille

Biokaasun tuottamiseen, välittömään tekniseen käyttöön ja varastointiin sovelletaan valtioneuvoston asetusta vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin valvonnasta (Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin valvonnasta 685/2015). Asetuksen liitteen 1 perusteella maatilamittakaavan biokaasuntuotanto lasketaan vähäiseksi, jolloin biokaasulaitoksen toiminta ei ole luvanvaraista.

Biokaasulaitoksesta on tehtävä ilmoitus pelastusviranomaiselle ja esittävä ”tiedot ja selvitykset suunnitellusta toiminnasta ja turvallisuusjärjestelyistä” (Laki vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuudesta 390/2005 § 24).

Biokaasulaitoksen toiminta on huomioitava myös maatilalan pelastussuunnitelmassa (ProAgria Pohjois-Karjala, n.d).

## 8 Biokaasulaitosinvestoinnin tukimuodot

Biokaasulaitosinvestoinneille on mahdollista saada taloudellista tukea. Seuraavissa luvuissa on esitelty maatalouden investointituki ja valtiontakaus sekä Työ- ja elinkeinoministeriön energiatuki.

### 8.1 Maatalouden investointituki ja valtiontakaus

Maatilan biokaasulaitoksen rakentamiseen on mahdollista saada investointitukea maaseutuohjelmasta. Investointitukea myönnetään siltä osin kuin muodostuvaa energiaa käytetään maatilan omassa tuotantotoiminnassa. Tuen määrä on 40 % investoinnin hyväksyttävistä kustannuksista. Lisäksi biokaasulaitosinvestointiin on mahdollista saada valtiontakaus, koska kyseessä on siirtyminen uusiutuvan energian käyttöön. Maatalouden investointitukea voivat saada viljelijät, maatalousyrittäjien yhteenliittymät ja yksityisoikeudelliset yhteisöt, jotka harjoittavat maataloutta maatilalla. Julkisyhteisöt, esimerkiksi Helsingin yliopiston Viikin opetus- ja tutkimustila, eivät ole oikeutettuja maatalouden investointitukeen. (Maa- ja metsätalousministeriö, n.d.; Ruokavirasto, 2019a)

## 8.2 Työ- ja elinkeinoministeriön energiatuki

Työ- ja elinkeinoministeriö myöntää energiatukea investointeihin ja selvityshankkeisiin, jotka edistävät muun muassa uusiutuvan energian tuotantoa ja käyttöä. Tällaisia hankkeita ovat esimerkiksi pienet sähkön- ja lämmöntuotantohankkeet sekä liikenteen biopolttoaineiden tuotantohankkeet. Tukea myönnetään yrityksille ja yhteisöille, kuten kunnille, seurakunnille ja säätiöille, sekä yksityisille maataloille, mikäli tuotettava energia käytetään maatalouden tuotantotoiminnan ulkopuolella (vrt. maatalouden investointituki). Tukea ei myönnetä esim. asuinkiinteistöille, asunto-osakeyhtiöille tai organisaatioille, jotka saavat toimintarahoituksen valtion talousarviosta. Helsingin yliopiston Viikin opetus- ja tutkimustila on oikeutettu hakemaan energiatukea (erityisasiantutija Kati Veijonen, Työ- ja elinkeinoministeriö, henkilökohtainen tiedonanto 12.11.2020). (Työ- ja elinkeinoministeriö, n.d.)

Pääsääntöisesti energiatukihakemukset käsittelee Innovaatorahoituskeskus Business Finland. Energiatuen hakemisessa on huomioitava, että energiatukea ei myönnetä hankkeille, jotka ovat alkaneet ennen tukipäätöstä ja tukea voidaan myöntää vain kustannuksiin, jotka syntyvät aikaisintaan energiatuen rahoituspäätöspäivänä. Lisäksi energiatukea ei myönnetä esimerkiksi silloin, kun lämpöenergian osalta siirrytään kaukolämmöstä erilliseen lämmöntuotantoon tai jos maatilalla tuotetun uusiutuvan energian määrästä yli 20 % käytetään itse. Biokaasulaitoshankkeiden investointituen määrä on 20–30 % käyttöomaisuusinvestoinnin kustannuksista. Erityisehtona energiatuen saamiseksi biokaasulaitosinvestoinnille on suunnitelma mädätteen jatkojalostuksesta ja käytöstä. (Business Finland, n.d.)

## 9 Biokaasulaitos Viikin opetus- ja tutkimustilalle

Tämä opinnäytetyö tehtiin tilaustyönä Helsingin yliopiston Tilat ja kiinteistöt -yksikölle. Helsingin yliopistolla on tavoitteena perustaa Viikin opetus- ja tutkimustilalle (jäljempänä Viikin koetila) biokaasulaitos, ja se tulee palvelemaan ensisijaisesti koetilan tarpeita, mutta myös opetus- ja tutkimuskäyttöä. Biokaasulaitoksen perustamisella pyritään vastaamaan kiertotalouden ja hiilineutraaliuuden haasteeseen ja lisäksi vähentämään lietalannan aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä sekä hajuhaittaa Viikin kaupunginosan asukkaille.



Toistaiseksi lietelannan kuivajae varastoidaan koetilalla kattamattomana ennen sen levitystä pellolle ja nestejaje johdetaan Helsingin kaupungin viemäriverkkoon.

Tulevassa biokaasulaitoksessa käsitellään navetassa muodostuva lietelanta. Lietelannan lisäksi tulevaan biokaasuprosessiin voidaan syöttää muun muassa ylijäämärehua ja muuta biomassaa. Laitoksessa muodostunut biokaasu on tarkoitus hyödyntää teknis-taloudellisesti kannattavalla tavalla. Mikäli biokaasulla tuotetaan lämpöä ja sähköä koetilan omaan energiatarpeeseen, se nostaa Helsingin yliopistossa käytettävän uusiutuvan energian osuutta. Vaihtoehtoisesti biokaasu voitaneen jalostaa metaaniksi ja hyödyntää liikennepolttoaineena tai syöttää kaasunjakeluverkkoon. Myös ravinteiden kierrätys paranee, koska biokaasuprosessissa jäljellejäävä mädäte, joka sisältää typpeä, fosforia ja kaliumia, voidaan käyttää lannoitteena. Lisäksi lietelannasta naapurustolle aiheutuva hajuhaitta vähenee, koska biokaasuprosessi stabiloi orgaanista ainesta.

## 9.1 Viikin opetus- ja tutkimustila

Viikin opetus- ja tutkimustila sijaitsee Helsingin yliopiston Viikin kampuksella Vanhankaupunginlahden luonnonsuojelualueen välittömässä läheisyydessä. Tila kuuluu Helsingin yliopiston maatalous-metsätieteellisen tiedekuntaan, ja sitä käytetään maatalous- ja metsätieteisiin liittyvään tutkimukseen ja opetukseen. (Helsingin yliopisto, 2020b)

Viikin koetilaan kuuluu 155 hehtaaria peltoa, navetta ja noin 70 lypsylehmää. Puolet peltoalasta pidetään säilörehu- ja laidunnurmena. Vuosittain useita peltoalahehtaareita toimii kasvinviljelyyn, maaperätieteisiin, agroteknologiaan ja -ekologiaan sekä kotieläintieteisiin liittyvien tutkimusten koeloina. Lopuilla pelloilla viljellään lähinnä rehuohraa ja -kauraa sekä härkäpapua koetilan eläinten rehuksi. Viljelykiertona käytetään 3–4-vuotista säilörehunurmikiertoa. Lehmien tuottama maito, noin 600 000 l, myydään meijeriin ja ylijäävä sato, jota ei käytetä eläinten ruokintaan, myydään elintarviketeollisuuteen. (Helsingin yliopisto, 2020a)

## 9.2 Saatavilla olevat syötteet

Tässä opinnäytetyössä kartoitettiin biokaasuprosessiin sopivia orgaanisia syötteitä, joita olisi helposti saatavilla lähiseudulta. Lähiseudun biojäte esimerkiksi yliopistoruokaloista jätettiin

pois kartoituksesta, koska biojäte saattaa sisältää myös muuta kuin biologisesti hajoavaa materiaalia kuten muovia ja metallia, ja se saattaa aiheuttaa teknisiä ongelmia biokaasulaitoksessa. Biokaasulaitoksen mahdolliseksi syötteiksi kartoitettiin Helsingin yliopiston Viikin kampuksella saatavilla olevien syötteiden lisäksi kolme ulkopuolista orgaanista syötevaihtoehtoa. Kaikki syötteet on esitelty jäljempänä.

### 9.2.1 Viikin koetilan syötteet

Viikin koetilalla syntyy vuosittain naudon lietelantaa laskennallisesti noin 1 660 m<sup>3</sup>. Lietelantamäärä on laskettu navetan keskimääräisen eläinmäärän (65–70 eläintä) ja asetuksen 1250/2014 määrittämän keskimääräisen lypsylehmän tuottaman vuotuisen lietelantamäärän 25,5 m<sup>3</sup> perusteella (Valtioneuvoston asetus eräiden maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien päästöjen rajoittamisesta, 1250/2014). Jos karjan lukumäärä on 65 eläintä ja kukin eläin tuottaa lietelantaa 25,5 m<sup>3</sup>, vuotuisesti lietelannan tilavuudeksi saadaan 1 660 m<sup>3</sup>. Biokaasulaskelmissa sovittiin käytettäväksi lietelantamäärää 1660 tonnia, joka saatiin muuttamalla tilavuus massamääräksi suhteella 1 m<sup>3</sup> = 1 tonni. Laskelmissa ei käytetty toteutuneita lietelantamääriä, koska vuotuisten lietelantamäärien toteumaa ei voitu todentaa luotettavaksi. (Tapani Jokiniemi, henkilökohtainen tiedonanto 6.11.2020)

Lietelannan metaanituottopotentialina käytettiin arvoa 200 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS (Luke, n.d.). Naudan lietelannan metaanituottopotentiali vaihtelee kirjallisuuden mukaan välillä 120–300 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS (Kymäläinen & Luostarinen, 2015, s. 36).

Naudan lietelannan lisäksi Viikin koetilan hiehopihatossa muodostuu naudon kuivikelantaa noin 150 tonnia vuodessa. Sen metaanituottopotentiali orgaanista ainesta kohti on sama kuin naudon lietelannalla (Luke, n.d.).

Muita koetilan syötteitä, joita biokaasuprosessissa voidaan käyttää, ovat ylijäämäsilörehu, olki ja nurmi. Ylijäämäsilörehua, lähinnä syömättä jäänyttä rehua, muodostuu vuosittain noin 100 tonnia. Olkea voidaan viljan puinnin yhteydessä korjata talteen arviolta noin 210 tonnia 75 hehtaarin viljelyalalta ja nurmea voidaan viljellä biokaasuprosessia varten arviolta

372 tonnia 10 hehtaarin peltoalalla. (Viikin koetilan johtaja Tapani Jokiniemi, henkilökohtainen tiedonanto syys-lokakuussa 2020)

Kirjallisuuden mukaan oljen metaanituottopotentiaali on 240–320 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS sekä ylijäämäsilörehun ja nurmen metaanituottopotentiaali 213–410 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS (Kymäläinen & Luostarinen, 2015, s. 39). Biokaasulaskelmissa käytettiin oljen metaanituottopotentiaalina 220 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS sekä nurmen ja ylijäämäsilörehun metaanituottopotentiaalina 350 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS (Luke, n.d.).

### 9.2.2 Helsingin yliopiston Viikin kampuksen muut syötteen

Helsingin yliopiston Viikin kampuksella sijaitsee yliopiston hevossairaala, jonka kuivikelantaa voidaan hyödyntää biokaasuprosessissa. Kuivikelantaa muodostuu vuosittain noin 800 m<sup>3</sup>, joka vastaa 560–640 tonnin massamäärää. Laskelmiin käytettiin arvoa 600 tonnia.

Hevoslannassa kuivikkeena käytetään kutteripurua. Puupohjaiset kuivikkeet soveltuvat huonosti biokaasuprosessiin ja niistä muodostuu heikosti metaania, koska biokaasuprosessin mikrobit eivät pysty tyypillisenä biokaasuprosessin viipymäaikana hajottamaan kutteripurun sisältämää orgaanista hiiltä. Kutteripurupohjaisen hevosenkuivikelannan metaanituottopotentiaali on vain 17–20 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS. (Hadin, 2016, ss. 23–24; Viikin koetilan johtaja Tapani Jokiniemi, henkilökohtainen tiedonanto 11.9.2020)

Biokaasulaskelmia tehtäessä ei ollut tietoa siitä, onko hevossairaalassa mahdollista käyttää olkipohjaista kuiviketta, jolloin kuivikelannan metaanituottopotentiaali nousisi tasolle 200 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS, lähelle oljen metaanituottopotentiaalia (Hadin, 2016, ss. 23–24; Kymäläinen & Luostarinen, 2015, s. 39).

Hevossairaalan kuivikelannan käyttöön biokaasuprosessin syötteenä vaikuttaa myös se, sisältääkö rehukaura mahdollisesti hukkakauran siemeniä ja onko hevossairaalan hevosilla tarttuvia eläintauteja. Edellytyksenä hevosenlannan käytölle biokaasuprosessissa on se, ettei lanta sisällä tarttuvia eläintauteja aiheuttavia patogeeneja. Viikin koetilan ja hevossairaalan välisessä sopimuksessa edellytetään, että eristyksissä olevien eläinten lanta kalkitaan sen hygienisoimiseksi ennen toimittamista Viikin koetilalle (johtaja Tapani Jokiniemi, henkilökohtainen tiedonanto 16.12.2020). Mikäli rehukaura sisältää hukkakauraa, tarvitaan

mädätteen tai syötteen lämpökäsittely vähintään 55 °C:ssa, jolloin hukkakauran siemenet tuhoutuvat. (Ruokaviraston ylitarkastaja M. Torniainen, henkilökohtainen tiedonanto 6.10.2020)

### 9.2.3 Hevosen kuivikelanta lähistön ratsastuskeskuksesta

Viikin koetilan läheisyydessä sijaitsee ratsastuskeskus, joka tuottaa puupellettipohjaista hevosen kuivikelantaa keskimäärin 312 tonnia vuodessa. Ratsastuskeskus on halukas toimittamaan tuottamansa kuivikelannan ns. porttimaksua vastaan biokaasulaitokselle. Hevosen kuivikelanta on hyvä biokaasulaitossyöte, mikäli kuivikkeena käytetään olkea, kuten edellä luvussa 9.2.2 (s. 28) on kuvattu. Ratsastuskeskuksessa pyritään kokeilemaan olkipohjaista kuiviketta hevosenlannan kuivikkeena, mikäli se on biokaasuprosessin kannalta olennaista. (ratsastuskeskuksen omistaja, henkilökohtainen tiedonanto 8.9.2020)

Ruokaviraston ylitarkastajan Merja Torniaisen (henkilökohtainen tiedonanto 6.10.2020, ks. myös Ruokavirasto, 2019) mukaan ratsastuskeskuksen hevosen kuivikelanta voidaan tulkita maatilan syötteeksi ns. yhteislantala-periaatteen mukaisesti, ja sitä voidaan vastaanottaa koetilan biokaasuprosessiin ilman laitoshyväksyntää. Edellytyksenä tällaiselle tulkinnalle on se, ettei hevosilla ole tarttuvia eläintauteja eikä rehu sisällä hukkakauran siemeniä.

Hevosenkuivikelanta on haettava viikoittain, sillä ratsastuskeskuksen lannan varastointikapasiteetti on pieni eikä heillä ole omaa kuormaus- ja kuljetuskalustoa. Kuivikelantaa syntyy noin 6 tonnia (arviolta noin 30 m<sup>3</sup>) viikossa (ratsastuskeskuksen omistaja, henkilökohtainen tiedonanto 8.11.2020).

Viikin koetilan johtajan Tapani Jokiniemen (henkilökohtainen tiedonanto 9.11.2020) mukaan hevosen kuivikelanta voidaan kuormata ja kuljettaa koetilan nykyisellä kalustolla. Lantaa haettaisiin keskimäärin kahdesti viikossa. Yhden lantakuormallisen nouto maksaisi noin 50 euroa, ja hinta sisältää sekä työajan että kuljetuskaluston käyttökulut. Vaihtoehtona kahdesti viikossa tapahtuvaan kuormaukseen ja kuljetukseen olisi investoida siirtolavoihin, joihin kuivikelanta kerätään. Lavan vaihto ja kuljetus työllistäisi vähemmän, koska kuormausvaihe jäisi pois. Tämä vaihtoehto voisi olla hyvä myös ratsastuskeskuksen hevosenlannan lyhytaikaiseen säilytykseen ennen biokaasuprosessiin syöttämistä.

Ratsastuskeskuksen kuivikelanta vastaanotettaisiin ns. porttimaksullisena syötteenä. Hyvinkäällä sijaitseva Palopuron biokaasulaitos ottaa vastaan hevosenlanta hintaan 10 €/m<sup>3</sup> tai 20 €/tonni (Nivos, n.d.). Viikin koetilan vastaanottomaksun on todennäköisesti oltava kuitenkin korkeampi kuin Palopuron biokaasulaitoksen vastaanottomaksu, jotta se riittäisi kattamaan myös nouto- ja kuormauskulut. Mikäli hevosenlannan noudosta ja kuormauksesta koituvat vuotuiset kulut, 5 200 € (52 vko \* 2 krt \* 50 €/krt), jaetaan noudettavan lannan vuotuisella määrällä ja huomioon otetaan Palopuron biokaasulaitoksen hevosenlannan vastaanottomaksu 20 €/tonni, saadaan lannan minimivastaanottomaksuksi 36,67 €/tonni (52 vko \* 6 t \* 20 €/t + 52 vko \* 2 krt \* 50 €/krt) / (52 vko \* 6 t) = 36,67 €/t). Ratsastuskeskukselle tämä tarkoittaisi 220 € viikoittaista ja 11 440 € vuotuista kuluerää ja Viikin koetilalle saman verran porttimaksua. Jos lannan nouto tehdään siirtolavoilla, porttimaksu voisi olla lavan tilavuuteen perustuva. Mikäli porttimaksu perustuu massaan, koetilalla on oltava mahdollisuus punnita vastaanotettava hevosenlanta.

Mahdollista vastaanottomaksuista muodostuvaa tuloa ei ole otettu huomioon tässä työssä tehdyissä kannattavuuslaskelmissa. Vastaavasti laskelmissa ei ole otettu huomioon hevosen kuivikelannan tai Viikin koetilan omien syötteiden käsittelystä aiheutuvia kustannuksia. Vastaanottomaksuista saadut tulot arvioitiin kuluvan ratsastuskeskuksen hevosenkuivikelannan kuljetus- ja käsittelykuluihin.

#### **9.2.4 Vanhankaupunginlahden järviruokobiomassa**

Viikin koetilan välittömässä läheisyydessä sijaitsee Vanhankaupunginlahti, jonka niityiltä ja rannoilta niitetään vuosittain runsaasti järviruokoa. Niitto tapahtuu loppukesästä noin 20–30 hehtaarin alueella. Arvion mukaan vuotuinen niitetyn järviruokoon kuivapaino olisi vähintään 200 tonnia ja hyvänä kesänä jopa 300 tonnia. Tilavuusmäärinä järviruokoa kerättäisiin noin 80 m<sup>3</sup>/ha, joka tarkoittaisi vähintään 1 600 m<sup>3</sup> vuotuista tilavuutta ja 680 tonnia vuotuista tuorepainoa. Laskelmissa massamääränä käytettiin 680 tonnia. (Uudenmaan ely-keskuksen lintuvesikoordinaattori W. Velmala, henkilökohtainen tiedonanto, 21.9.2020)

Niitettyä järviruokomassaa ei toistaiseksi hyödynnetä mitenkään, vaan se jätetään paikoilleen maatumaan. Se on kuitenkin mahdollista kerätä ja läjittää niityn reunaan, josta se voitaisiin hakea Viikin koetilan kuormaus- ja kuljetuskalustolla. (Uudenmaan ely-keskuksen

lintuvesikoordinaattori W. Velmala, henkilökohtainen tiedonanto, 21.9.2020; koetilan johtaja Tapani Jokiniemi, henkilökohtainen tiedonanto 6.11.2020)

Vanhankaupunginlahden järviruo'on kuormaaminen ja kuljettaminen varastopaikalle Viikin koetilalla arvioitiin maksavan vähintään 2 300 €. Järviruokomassa saataisiin ajettua varastopaikalle 68 kuormassa, kun yhteen kuormaan mahtuu 10 t järviruokomassaa. Kolme kuormaa pystyisi todennäköisesti ajamaan tunnissa, jolloin järviruo'on siirtämiseen menisi aikaa yhteensä 23 tuntia. Kuljetuksen lisäksi kuorma, järviruokomassan aumaaminen ja polkeminen todennäköisesti veisivät vähintään yhtä paljon aikaa. Jos kuormauksen ja kuljetuksen tuntihinnaksi määritellään 50 €, niin kokonaistyöaikakustannus olisi noin 2 300 €. Järviruo'on lisäksi kuormaamista ja kuljetusta vaatisivat myös olki- ja nurmimassa, joten järviruo'ko-, nurmi- ja olkimassan kuorma- ja kuljetuskokonaiskustannuksiksi arvioitiin 4 000–5 000 € vuodessa. Laskelmissa syötteiden käsittelykustannuksina käytettiin 5 000 €, jotta laskelmat eivät olisi liian optimistisia. (koetilan johtaja Tapani Jokiniemi, henkilökohtainen tiedonanto 12.10.2020)

Biokaasulaskelmissa järviruo'on metaanituottopotentiaalina käytettiin  $250 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t VS}$  (Luke, n.d.)

### 9.2.5 Pienpanimon mäski

Viikin koetilan läheisyyteen muuttaa vuonna 2021 pienpanimo, jonka oluen valmistusprosessissa syntyy mäskiä arviolta 156 tonnia vuodessa. Mäski soveltuu hyvin biokaasuprosessiin, koska se sisältää runsaasti orgaanista hiiltä ja sen metaanituottopotentiaali on korkea,  $470 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t VS}$  (Kymäläinen & Luostarinen, 2015, s. 44). Biokaasulaskelmissa käytettiin em. metaanituottopotentiaalia. Panimo ilmoitti mäskin olevan käytettävissä biokaasuprosessin syötteenä, mutta alustavan kyselyn mukaan he eivät olleet halukkaita maksamaan mäskin vastaanotosta. Mäski haettaisiin panimolta pyydettäessä. (panimon panimomestari, henkilökohtainen tiedonanto 8.11.2020)

Koetilan johtajan T. Jokiniemen (henkilökohtainen tiedonanto 9.11.2020) mukaan mäski voidaan kuormata ja kuljettaa koetilan nykyisellä kalustolla. Kuorma- ja kuljetuskustannuksiksi arvioitiin 50 €/kuorma, kuten ratsastuskeskuksen kuivikelannan

kuormaus- ja kuljetuskustannuksiksikin, jolloin välittömät kustannukset olisivat 2 600 euroa vuodessa, jos mäskiä noudettaisiin kerran viikossa.

Mäski luokitellaan jätteeksi, joten sen vastaanottaminen ja käsittely biokaasulaitoksella velvoittaa laitoshyväksynnän hakemista Ruokavirastolta (Ruokaviraston ylitarkastaja M. Torniainen, henkilökohtainen tiedonanto, 6.10.2020). Mäskiä ei tarvitse hygienisoida, mutta mädätteen on täytettävä lannoitelainsäädännön hygieniavaatimukset (ylitarkastaja Risto Retkin, Ruokavirasto, henkilökohtainen tiedonanto 14.12.2020).

Laitoshyväksyntäpäätöksestä perittävä maksu riippuu käsittelykapasiteetista. Alin hinta vuonna 2020 oli 593 € enintään 2 000 m<sup>3</sup> käsittelykapasiteetille ja korkein hinta 2 579 € yli 8 000 m<sup>3</sup> kapasiteetille. Laitoshyväksyntäpäätöksen lisäksi laitoshyväksyntä edellyttää hyväksyntätarkastuksen, jonka hinta vuonna 2020 oli 112 €/h. Säännöllisen näytteenoton hinnat vuonna 2020 olivat 309–980 € (maksuluokat 1–5), ja maksun suuruus riippui analyysimäärästä. Tavallisesti mädätysjäännöksestä tehdään ns. hygieni-analyysi, joka kuuluu maksuluokkaan 1 (309 €). Maksuluokka nousee, mikäli näytteestä analysoidaan ravinteita tai haitallisia metalleja. Haitallisia metalleja analysoidaan kuitenkin vain tapauksissa, joissa syötteen epäillään sisältävän niitä. Haitallisia metalleja ei todennäköisesti tulevan biokaasulaitoksen syötteissä esiinny. (Ruokavirasto, 2020; Ruokaviraston ylitarkastaja M. Torniainen, henkilökohtainen tiedonanto, 13.11.2020)

Biokaasulaitoksen viranomaisvalvonta perustuu riskinarviointiin, ja tyypillisesti maatilamittaluokan biokaasulaitoksilla tarkastuskäynti tehdään 3–4 vuoden välein. Käyntitiheyteen vaikuttavat mm. omavalvonnan toimivuus, vaadittujen raporttien toimittaminen ja toiminnan poikkeamat. Näytteenottotiheys on 3–5 vuoden välein. Jos ongelmia ei ole, näytteenottotiheys on todennäköisesti 5 vuoden välein. (Ruokaviraston ylitarkastaja M. Torniainen, henkilökohtainen tiedonanto, 13.11.2020)

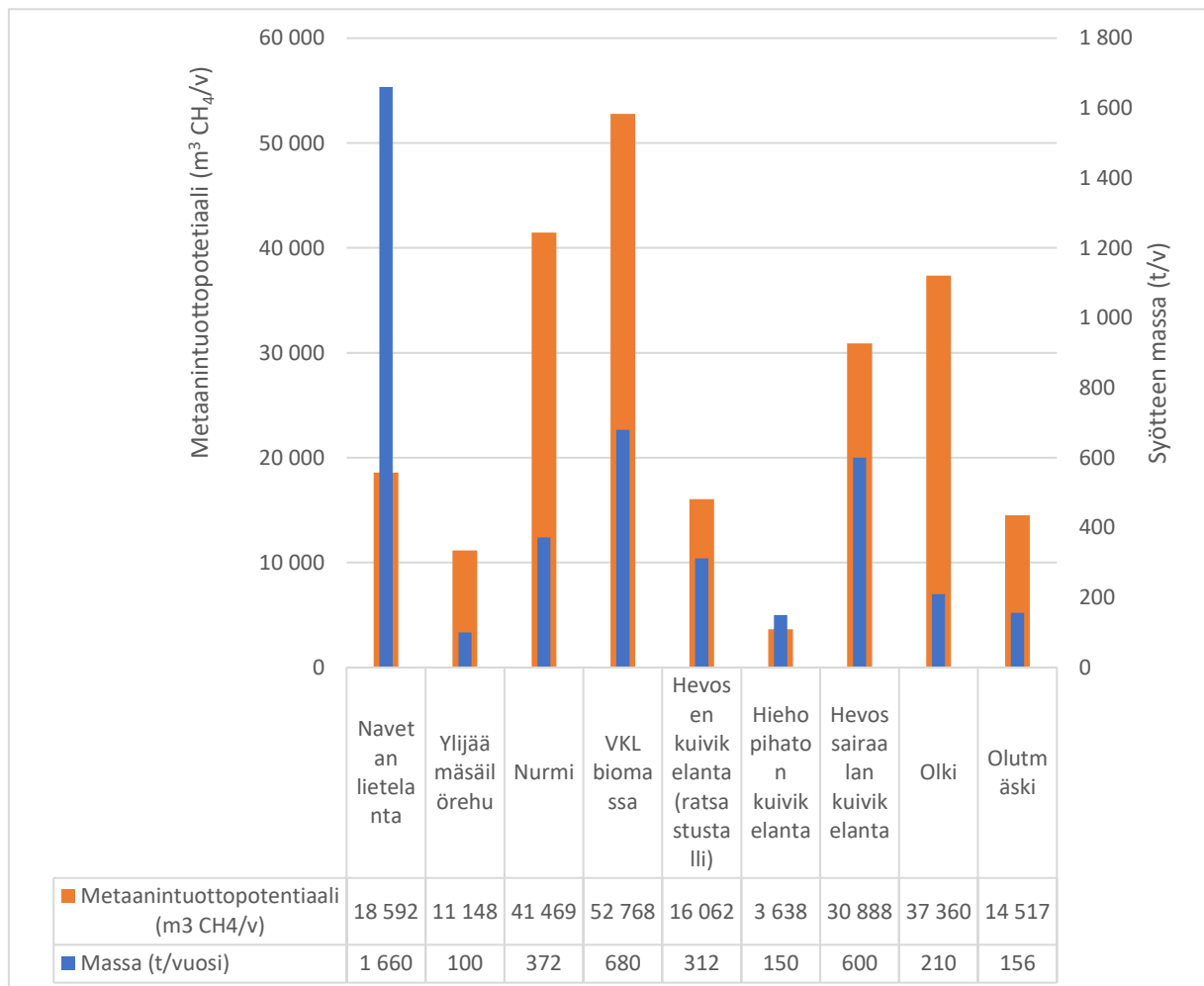
### **9.2.6 Syötteiden vuotuiset massamäärät ja niiden metaanituottopotentiaali**

Saatavilla olevien syötteiden vuotuiset massamäärät ja niiden vuotuiset metaanituottopotentiaalit sekä TS- ja VS-pitoisuudet on esitetty taulukossa 1

(s.34) ja kuvassa 2. Hevosen kuivikelannan metaanintuottopotentiaali valittiin olkipohjaisen kuivikkeen metaanintuottopotentiaali  $200 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$  VS.

Saatavilla olevista syötteistä lietelantaa on eniten (sininen pylväs), mutta vuotuisen massa verrattuna metaanintuotto (oranssi pylväs) on vähäistä (Kuva 2). Vastaavasti oljen, säilörehun, nurmen, järviruohon (kuvassa VKL biomassa) ja mäsän metaanintuotto on korkea verrattuna syötteen vuotuisen massa. Absoluuttisesti eniten biokaasua tuottavat Vanhankaupunginlahden järviruoko, nurmi ja olki.

Kuva 2 Syötteiden vuotuinen massamäärä ja metaanintuottopotentiaali.





Taulukko 1 Saatavilla olevien syötteiden massamäärät, ja tämän työn laskelmissa käytetyt TS- ja VS-pitoisuudet sekä metaanintuottopotentiaali

SYÖTTEET	t/v	t/vrk	TS (%)	VS (%)	VS (t/v)	VS/TS (%)	Ominaismetaanituotto (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t VS)	Metaanituottopotentiaali (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /v)
Navetan lietalanta	1 660	4,5	7	5,6	93	80	200	18 592
Ylijäämäsilörehu	100	0,3	35	32	32	91	350	11 148
Nurmi	372	1,0	35	32	118	91	350	41 469
Vanhankaupunginlahden biomassa	680	1,9	32	31	211	97	250	52 768
Hevoson kuivikelanta (ratsastustalli)	312	0,9	33	25,7	80	78	200	16 062
Hiehopihaton kuivikelanta	150	0,4	21	16,2	24	77	150	3 638
Hevossairaalan kuivikelanta	600	1,6	33	25,7	154	78	200	30 888
Olki	210	0,6	85,0	77,4	162	91	230	37 360
Olutmäski	156	0,4	22	19,8	31	90	470	14 517
Yhteensä	4 240	11,6			907			226 442

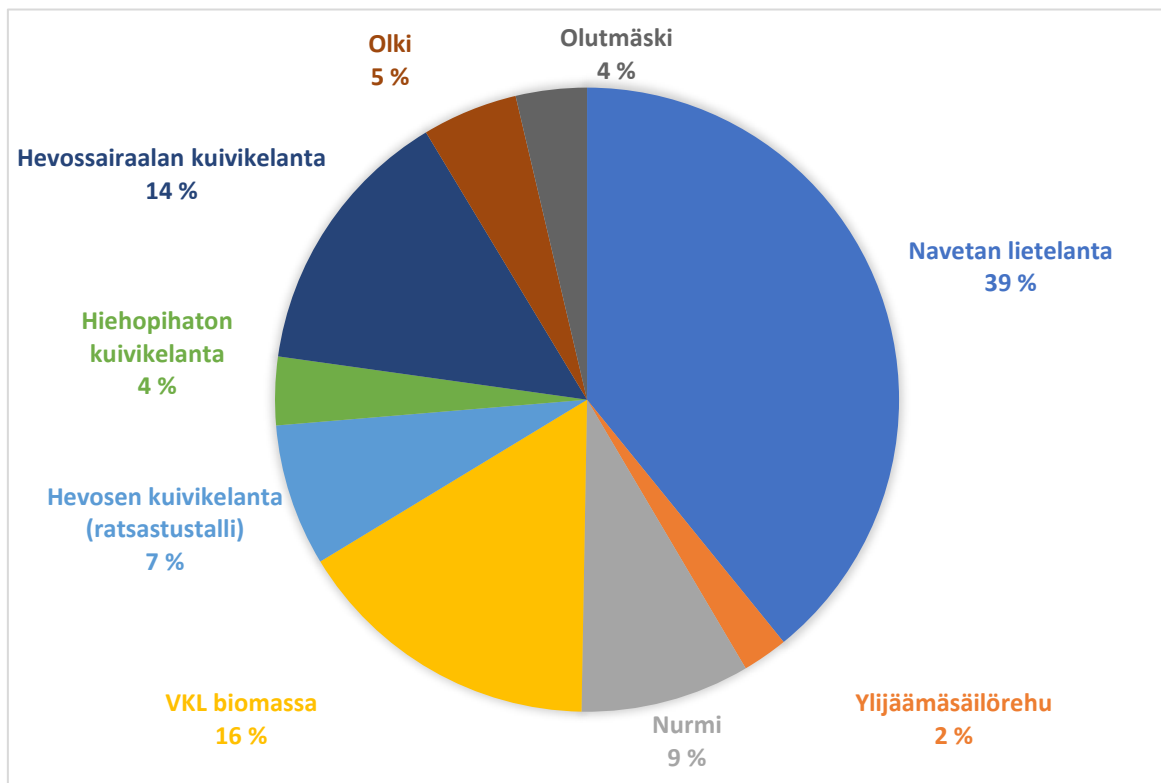
### 9.3 Syöteseoksen valintaan vaikuttavia tekijöitä

Viikin koetilan biokaasuprosessia varten sopivaa syöteseosta ryhdyttiin määrittämään Excel-taulukoinnin avulla. Tarkasteluissa käytettiin edellä luvussa 9.2 (s. 26) esitettyjä massamääriä ja metaanituottopotentiaaleja. Laskelmilla selvitettiin syötteiden massamäärien, orgaanisen kuiva-aineen ja metaanituottopotentiaalin suhteellinen jakauma.

#### 9.3.1 Syötteiden massamäärien suhteellinen jakauma

Kun kaikki saatavilla olevat syötteen otetaan mukaan, syötteistä määrällisesti eniten on naudnan lietalantaa, 39 % (Kuva 3, s. 35). Vanhankaupunginlahden järviruokobiomassaa (kuvassa VKL biomassa) olisi 16 % ja hevossairaalan kuivikelantaa 14 %. Kaikkien muiden syötteiden massamäärällinen osuus olisi alle 10 %.

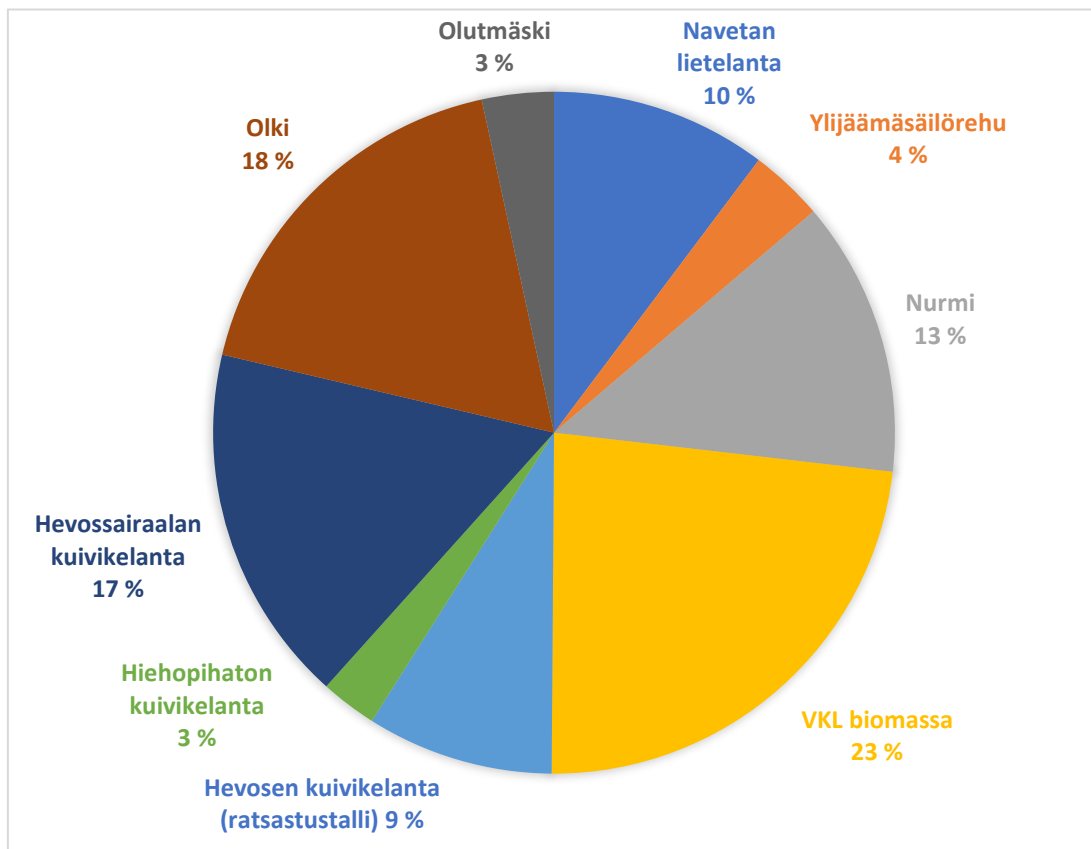
Kuva 3 Vuotuinen kaikkien saatavilla olevien syötteidien massamäärien (yhteensä 4 240 t/v) suhteellinen jakauma.



### 9.3.2 Syötteidien orgaanisen kuiva-aineen suhteellinen jakauma

Mikrobit tuottavat biokaasua syötteidien orgaanisesta kuiva-aineesta (volatile solids, VS). Suhteellisesti eniten orgaanista kuiva-ainetta olisi Vanhankaupunginlahden järviruokomassassa (23 %), oljessa (18 %) ja hevossairaalan kuivikelannassa (17 %) ja nurmessa (13 %, Kuva 4, s. 36). Vaikka naudon lietelantaa on massamäärällisesti eniten (39 %), sen osuus orgaanisesta kuiva-aineesta on vain 10 %. Tämä johtuu siitä, että naudon lietelannan kuiva-ainepitoisuus on alhaisin ja lisäksi naudon pötsi hyödyntää helposti hajoavan orgaanisen aineksen ja lantaan jää huonommin hajoava orgaaninen materiaali (Kymäläinen & Luostarinen, 2015, s. 36). Muiden syötteidien osuus orgaanisesta kuiva-aineesta on alle 10 %.

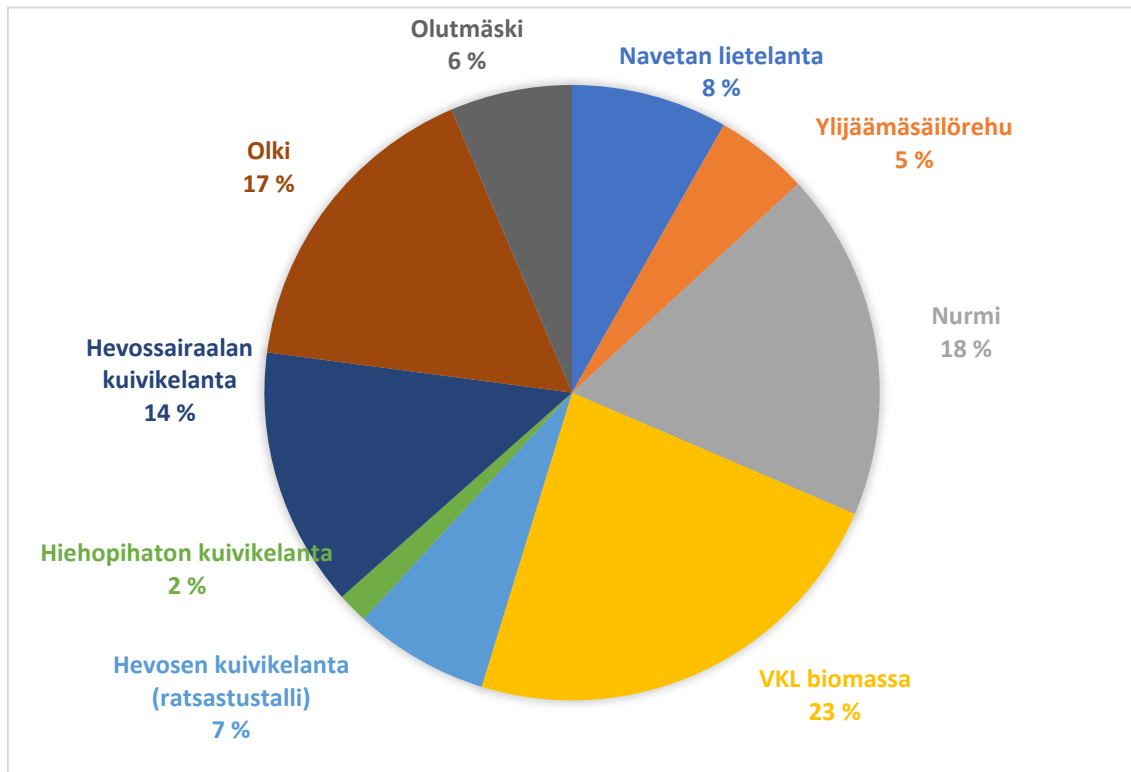
Kuva 4 Vuotuinen kaikkien saatavilla olevien syötteiden orgaanisen kuiva-aineen (VS) (yhteensä 907 t/v) suhteellinen jakauma.



### 9.3.3 Syötteiden vuotuinen metaanituottopotentiaali-jakauma

Kaikkien saatavilla olevien syötteiden vuotuinen metaanituottopotentiaali-jakauma (Kuva 5, s. 37) osoittaa, että suhteellisesti eniten metaania muodostuisi Vanhankaupunginlahden järviruokobiomassasta, lähes neljännes koko metaanituotosta. Sekä nurmi että olki tuottaisivat metaania vajaa 20 %, ja hevosen olkipohjainen kuivikelantamassa hevossairaalaista ja ratsastuskeskuksesta tuottaisi yhteensä noin 20 % metaanista. Naudan lietelannasta muodostuisi metaania vain 8 %, vaikka sitä olisi määrällisesti eniten (39 %). Olutmäskin, ylijäämäsilörehun ja hiehopihaton kuivikelannan osuus kokonaismetaanituottopotentiaalista olisi kullakin alle 10 %.

Kuva 5 Syötteiden vuotuisen metaanituoton (yhteensä 226 442 m<sup>3</sup>/v) jakauma, kun hevoselanta sisältää olkipohjaista kuiviketta.

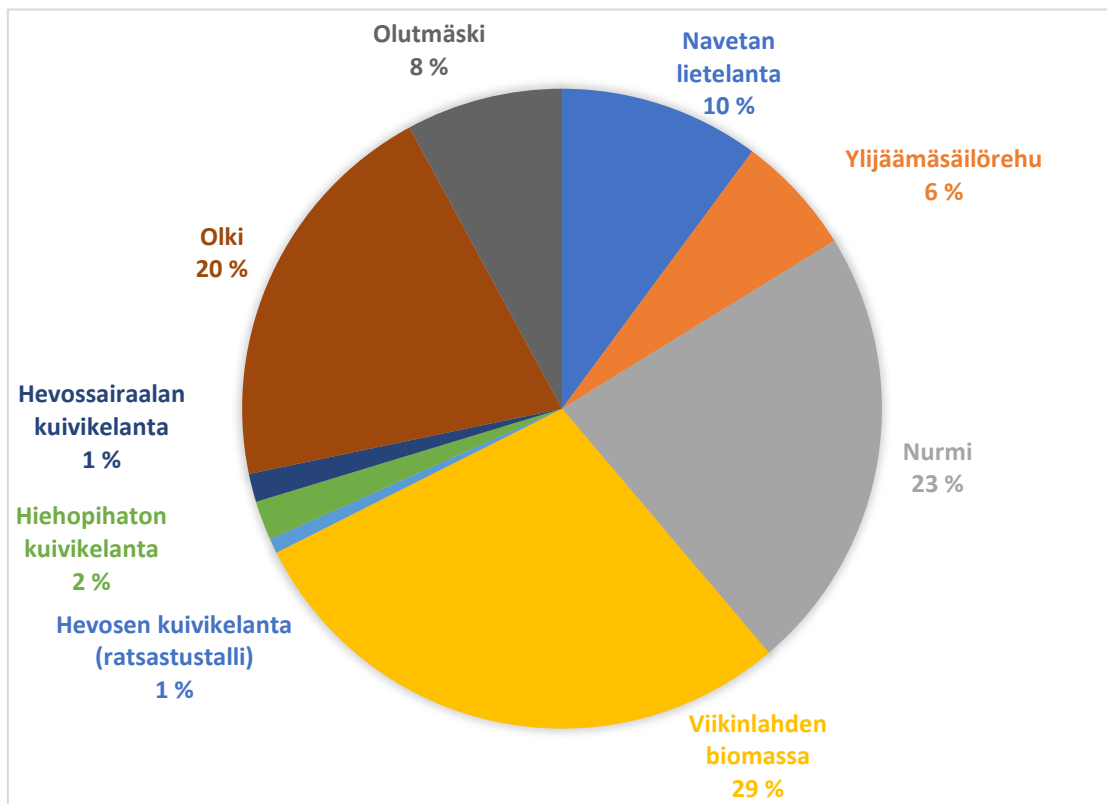


#### 9.3.4 Syöteseoksen valintaan vaikuttavia muita tekijöitä

Biokaasuprosessin syötteiden valinnassa otettiin huomioon mm. syötteiden massan ja metaanituottopotentiaalın välinen suhde (Kuva 2, s. 33). Syötteistä lietelanta muodostaa suurimman yksittäisen massamäärän kaikista syötteistä, mutta tuottaa vain vähän metaania. Lietelanta on kuitenkin syöteseoksessa tärkeä komponentti ensinnäkin siksi, että sillä laimennetaan muuta syötemassaa biokaasuprosessia varten, ja toiseksi biokaasuprosessilla pyritään hallitsemaan lietelannasta aiheutuvia hajuhaittoja, mikä on yksi merkittävä perustelu biokaasulaitosinvestoinnille.

Hevossairaalan ja ratsastuskeskuksen hevoselannan kuivikkeena käytetään tällä hetkellä joko kutteripurua tai puupellettejä. Kuva 6 (s. 38) osoittaa, että puupohjainen hevosen kuivikelanta tuottaisi huonosti metaania, vain 2 % vuotuisesta kokonaismetaanimäärästä eli noin 4 000 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/v. Sen sijaan olkipohjainen kuivikelanta tuottaisi metaania vuodessa noin 47 000 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> (Kuva 2, s. 33).

Kuva 6 Syötteiden vuotuisen metaanituoton (yhteensä 226 442 m<sup>3</sup>/v) jakauma, kun hevosenlanta sisältää puupohjaista kuiviketta.



Mikäli hevosen kuivikelanta pysyy puupohjaisena, se todennäköisesti jäisi pois biokaasuprosessista. Koska Viikin koetilalla on tarve hallita biokaasuprosessin avulla myös ympäristöön leviävää hajuhaittaa, hevossairaalan puupohjainen kuivikelanta voitaisiin kuitenkin sisällyttää syöteseokseen, mikäli hevosenlannan varastointi ja levitys aiheuttaa pahoja hajuhaittoja. Ratsastuskeskuksen puupohjaista kuivikelantaa ei sen sijaan kannattaisi ottaa mukaan prosessiin. Suhteellisen suuri hevosen kuivikelannan vuotuinen massamäärä, yhteensä 21 % kokonaismassamäärästä (Kuva 3, s. 35), vaikuttaa biokaasureaktorin kokoon, mutta puupohjaisen hevosen kuivikelannan vähäinen metaanintuottokyky ei kompensoisi reaktorin tilavuuden kasvamista. Mitä suurempi reaktori rakennetaan, sen kalliimmaksi investointi tulee.

Puupohjaisen kuivikelannan käyttöä biokaasuprosessissa saattaisi puoltaa mahdollisuus käyttää mädätettä kuivikkeena. Doranova Oy toimialajohtajan Mikko Saalastin (henkilökohtainen tiedonanto 4.12.2020) mukaan mädätteen kuivajakeen käyttö kuivikkeena saattaa aiheuttaa käyttöongelmia, koska orgaaninen aines on hajonnut hienojakoiseksi

massaksi, joka liettyy kastuessaan savimaiseksi massaksi. Koska puupohjainen kuivike ei hajoa biokaasuprosessissa, mädätteen kuivajae sisältäisi vähemmän hienojakoista orgaanista massaa ja saattaisi toimia kuivikkeena hajoamattomana pysyneen kutteripurun tai puupelletin vuoksi.

Hevosen kuivikelannan osalta on otettava huomioon mahdollinen edellä luvussa 9.2.2 (s. 28) mainittu hukkakauran ja tarttuvien eläintautien leviäminen.

Olutmäskin vastaanotto nostaisi vain vähän tuotetun metaanin määrää, koska mäskin määrä olisi melko pieni verrattuna muihin syötteisiin (Kuva 3, s. 35). Mäskin osalta on erikseen arvioitava, kannattaako siitä tuottaa biokaasua, sillä mäskin vastaanotto biokaasulaitokseen velvoittaa hakemaan biokaasulaitokselle laitoshyväksyntää eikä mäskistä muodostuneesta biokaasusta saatu hyöty todennäköisesti kattaisi käsittelystä aiheutuvia kuluja ilman porttimaksua. Niin ikään mäskin jättäminen pois biokaasuprosessista ei juurikaan vaikuttaisi vuotuisen syötteen massamäärään (muutos -4 %, 4240 t/v vs. 3984 t/v) tai metaanituottopotentiaaliin (muutos -6 %, 226 400 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/v vs. 211 900 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/v).

Mahdolliset muutokset syötemäärissä vaikuttavat pääasiassa metaanituottopotentiaaliin. Yksittäisen syötteen, muun kuin lietelannan, vuotuisen massamäärän muutos vaikuttaa melko vähän biokaasuprosessin syötevirtaan, sillä lietelantaa muodostuu vuosittain 1 660 tonnia, kun muita syötteitä on tarjolla kutakin arviolta 100–680 tonnia. Näin ollen yksittäisen syötteen massamäärämuutokset vaikuttavat pääasiassa metaanituottopotentiaaliin (Kuva 2, s. 33). Esimerkiksi jos Vanhankaupungin järviruokobiomassan määrä vähenisi puoleen, 680 tonnista 340 tonniin (syötemassan muutos -8 %), niin vuotuinen biokaasuprosessin metaanituottopotentiaali biokaasulaskurin mukaan alenisi 226 000 metaanikaasukuutiometristä 200 000 kuutiometriin (metaanintuottopotentiaalin muutos -12 %, Luke, n.d.). Jos vastaavasti nurmi jätettäisiin kokonaan pois syötteseoksesta, syötemassan vuotuinen määrä alenisi noin 9 % ja metaanintuotto noin 18 % (226 000 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> vs. 185 000 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>).

## 9.4 Biokaasulaitoksen tuotantoprosessin arvioiminen ja syöteseoksen valinta

Eri syöteseoksia ja niiden vaikutusta tulevan biokaasulaitoksen tuotantoprosessiin arvioitiin biokaasulaskurilla. Lisäksi tarkasteltiin metaanituottopotentiaalia, tuotetun biokaasun hyödyntämisvaihtoehtoja sekä syöteseosten vaikutusta ravinne- ja mädätämäärään.

### 9.4.1 Biokaasulaskuri

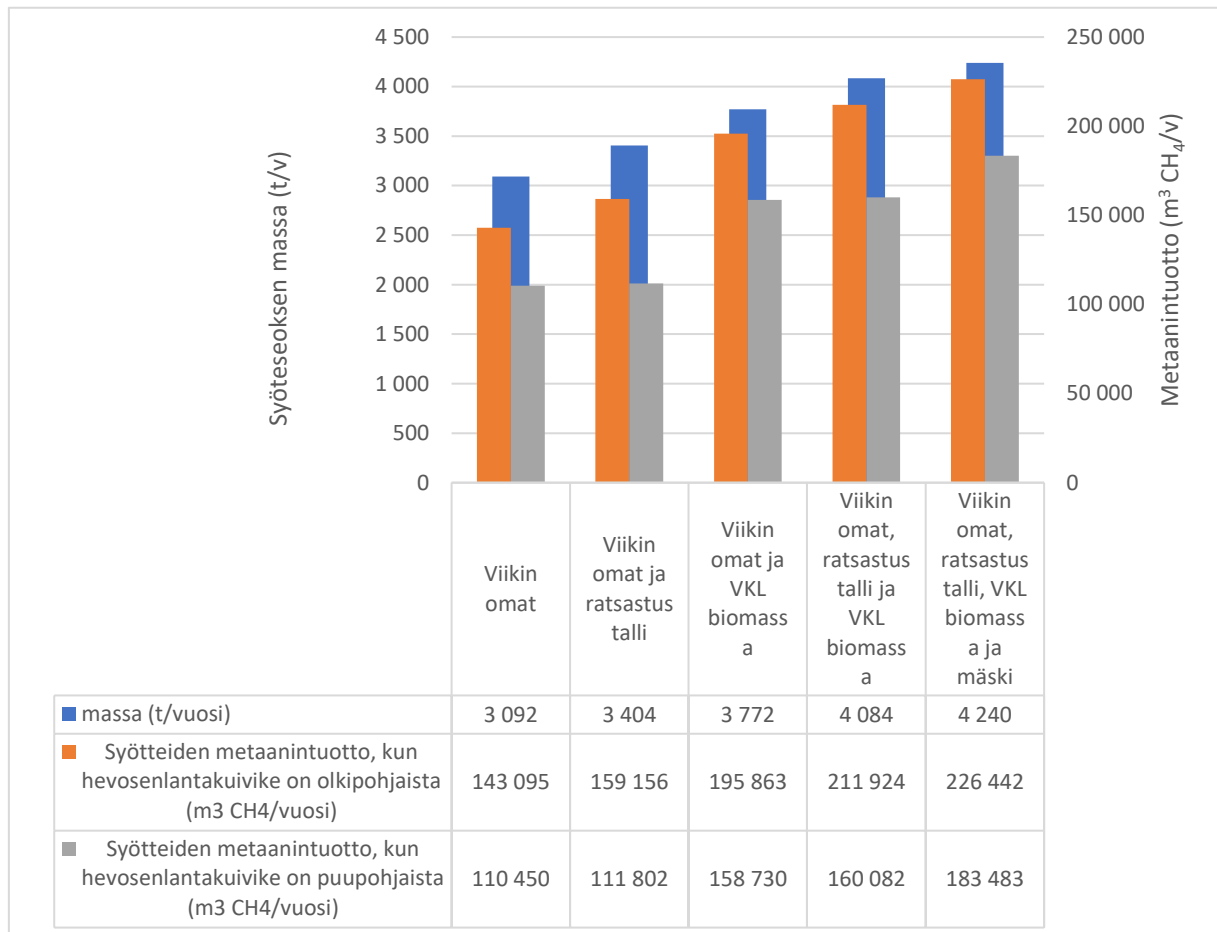
Biokaasulaskuri on tarkoitettu maatilamittaluokan biokaasulaitosten syötemäärien, metaanintuoton ja biokaasulaitosinvestointien kannattavuuden arviointiin silloin, kun vuotuinen syötemäärä on enintään 15 000 t. Sen avulla voidaan vertailla eri syötteiden vaikutusta biokaasulaitosratkaisuun ja metaanintuottopotentiaaliin. Lisäksi voidaan arvioida biokaasulaitoksen tuottaman biokaasun hyödyntämistä ja sen vaikutusta biokaasulaitoksen kannattavuuteen. Biokaasulaskurin avulla on mahdollista alustavasti arvioida myös laitosinvestoinnin suuruutta. Siinä voidaan ottaa huomioon kolme eri biokaasulaitosvaihtoehtoa: märkämädätys, jossa kuiva-ainepitoisuus (TS) on <12 %, kiintomädätys, jossa TS-pitoisuus on enintään 20 % ja kuivamädätys, joka on tarkoitettu läjällä pysyvälle orgaaniselle ainekselle. (Luke, n.d.)

### 9.4.2 Potentiaaliset syöteseokset biokaasuprosessia varten

Biokaasulaskurilla arvioitiin eri syöteseosten metaanituottopotentiaaleja (Luke, n.d.). Kuvassa 7 (s. 41) on esitetty eri syöteseosvaihtoehtojen vuotuiset massamäärät ja metaanituottopotentiaalit. Kuvan syöteseos ”Viikin omat” sisältää sekä koetilan että hevossairaalan syötteet. Kun ”Viikin omat” -syötteiden lisäksi syöteseokseen otetaan mukaan Vanhankaupunginlahden järviruoko, metaanituottopotentiaali lisääntyy selvästi, noin 50 000 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/v, mutta vuotuinen massamäärä melko vähän (ensimmäinen ja kolmas pylväikkö vasemmalta). Muiden syötteiden lisääminen seokseen ei vaikuta syötemäärään tai metaanintuottoon yhtä voimakkaasti. Metaanintuottoon vaikuttaa ratkaisevasti myös hevosen kuivikelannan kuivikemateriaali (oranssit ja harmaat pylväät). Olkipohjainen kuivike tuottaa metaania paremmin kuin puupohjainen kuivike. Pylväikön ”Viikin omat ja ratsastustalli” (toinen pylväikkö vasemmalta) mukaan olkipohjainen hevosen kuivikelanta

tuottaisi vuodessa noin 47 000 m<sup>3</sup> enemmän metaania puupohjaiseen hevosen kuivikelantaan verrattuna.

Kuva 7 Syöteseosten vuotuinen massa sekä niiden metaanituottopotentiali puu- ja olkipohjaisilla hevosenlantakuivikkeilla.



#### 9.4.3 Eri syöteseosten vaikutus biokaasun energiamäärään ja hyödyntämiseen

Kuvassa 7 esitettyjen syöteseosvaihtoehtojen vaikutusta tuotettavaan biokaasuenergiämäärään verrattiin toisiinsa. Vertailuun otettiin mukaan märkä- ja kiintomädätystekniikat, koska naudan lietalantaa ei voida mädättää kuivämädätysprosessissa. Laskelmissa käytettiin Viikin koetilan navetan sähkön- ja lämmönkulutuksen osalta toteutuneita kulutuslukuja ja muilta osin biokaasulaskurin oletusarvoja. Navetan vuotuinen sähkönkulutus on 480 MWh ja lämmönkulutus 765 MWh (palvelupäällikkö Olli Moisio, HY kiinteistöpalvelut Oy, henkilökohtainen tiedonanto 5.11.2020 ja sähköinsinööri Jyrki Vastamäki, Helsingin yliopiston kiinteistöpalvelut,



henkilökohtainen tiedonanto 7.10.2020). Navetan lämpöenergian tarve vaihtelee vuodenajan mukaan. Talvella lämpöenergian kulutus on noin 80 MWh/kk ja kesällä noin 20 MWh/kk.

Lisäksi laskelmissa otettiin huomioon karkea arvio, 5 000 €, syötteiden kuormaus- ja kuljetuskustannuksista (ks. luku 9.2.4, s. 30). Porttimaksuja, joita olisi mahdollista saada ainakin lähistön ratsastuskeskukselta, ei otettu mukaan laskelmiin, koska niiden arvioitiin kattavan välittömät hevosenlannan kuormaus-, kuljetus- ja käsittelykustannukset, mutta ei tuottavan voittoa. Vastaavasti hevosenlannan kuormaus-, kuljetus- ja käsittelykustannuksiakaan ei otettu huomioon.

Viikin koetilan ja hevossairaalan syötteillä, taulukossa nimellä ”Viikin omat”, kokonaisenergiantuotto biokaasulaitoksessa olisi noin 1200 MWh vuodessa ja sillä voitaisiin tuottaa CHP-laitoksessa sähköenergiaa yli 300 MWh ja lämpöenergiaa yli 600 MWh vuodessa (Taulukko 2 s. 44, sarakkeet Viikin omat, kiintomädätys ja märkämädätys). Tuotettu energiamäärä ei riittäisi navetan vuosittaiseen sähkö- eikä lämpöenergian tarpeeseen. Jos syöteseokseen lisätään Vanhankaupunginlahden järviruokomassa (taulukossa VKL biomassa), kokonaisenergiantuotto kasvaa noin 1 600 MWh:iin vuodessa, ja sillä energiamäärällä tuotettaisiin sähköä noin 450 MWh ja lämpöä lähes 900 MWh vuodessa (Taulukko 2, sarakkeet Viikin omat ja VKL biomassa, kiintomädätys ja märkämädätys). Tuotettu sähköenergia ei riittäisi navetan vuotuisen sähköntarpeeseen, mutta laskennallisesti lämpöenergia vastaisi navetan vuotuista lämpöenergian tarvetta. Koska biokaasua ei voida sellaisenaan varastoida Viikin koetilalla, lämpöenergiaa tuotettaisiin tasaisesti noin 75 MWh/kk ( $900 \text{ MWh}/12 \text{ kk} = 75 \text{ MWh/kk}$ ), jolloin kesällä sitä olisi ylimäärin ja talvella kaukolämpöä tarvittaisiin lisälämmitykseen.

Ratsastuskeskuksen ja olutmäskin ottaminen mukaan syöteseokseen lisäisi energiantuottoa 1 800–1 900 MWh/v (Taulukko 2, sarakkeet Viikin omat, VKL biomassa ja ratsastustalli sekä Kaikki syötteet, kiintomädätys ja märkämädätys). Tällä energiamäärällä tuotettaisiin sähköä noin 500 MWh/v ja lämpöä noin 1 000 MWh/v. Tuotettu sähkö- ja energiamäärä riittäisivät hyvin tyydyttämään Viikin koetilan sähkön- ja lämmöntarpeen ympäri vuoden. Kuitenkin silloin kun navetan lämmitystarvetta ei ole, tuotetulle lämpöenergialle pitäisi löytää jokin

muu lämmityskohde. Sähkö- ja lämpöenergian tuottaminen kaikista saatavilla olevista syötteistä ei ole kovin kannattavaa lämpöenergian ylituotannon vuoksi.

Koska energian muuttaminen sähkö- ja lämpöenergiaksi ei ole tuotetun ylimäärälämmön vuoksi kannattavaa, tehtiin laskelma myös siitä, kuinka paljon tuotetusta biokaasusta voitaisiin jalostaa metaania. Metaani voitaisiin myydä joko liikennepolttoaineeksi tai kaasunjakeluverkkoon. Biokaasulaskurin mukaan biokaasusta jalostetun metaanin nettoenergiamäärä olisi 1 600 MWh, kun syöteseos sisältäisi kaikki saatavilla olevat syötteen ja 12 % biokaasusta käytettäisiin laitoksen ylläpitoon. Jos mäskiä ei otettaisi mukaan biokaasuprosessiin, jalostetun metaanin energiamäärä olisi 1 500 MWh.

Kaasun myyntituloja silloin, kun jalostettu metaani syötettäisiin kaasunjakeluverkkoon, arvioitiin biokaasulaskurin liikennepolttoaineen myyntihintaa hyväksikäyttäen.

Biokaasulaskurin oletushinta myytävälle liikennepolttoaineelle on 82 snt/kg. Koska metaanikaasun tiheys on  $0,73 \text{ kg/m}^3$ , niin metaanin hinta tilavuutta kohden on  $59,9 \text{ snt/m}^3$  ( $82 \text{ snt/kg} * 0,73 \text{ kg/m}^3 = 59,86 \text{ snt/m}^3$ ). Koska yhden metaanikuutiometrin lämpöarvo on noin 10 kWh, niin yksi kWh metaania maksaa  $5,99 \text{ snt/kWh}$  ( $59,86 \text{ snt/m}^3 / 10 \text{ kWh/m}^3 = 5,986 \text{ snt/kWh} = 59,86 \text{ €/MWh}$ ). Hinta saattaa olla lähellä todellista ostohintaa, koska vuonna 2020 pääkaupunkiseudulla biokaasua myytiin taloyhtiöille hintaan  $6,06 \text{ snt/kWh}$  (Suomen Kaasuenergia Oy, 2020). Hinnalla  $59,86 \text{ €/MWh}$  vuotuinen kokonaistuotto olisi noin 95 800 euroa, kaikista saatavilla olevista syötteistä tuotetulle metaanille ja 89 800 euroa, jos mäski jätetään pois syöteseoksesta. Jos oletetaan, että kaasunmyyjän myyntikate olisi esim. 15 %, niin kaasun ostohinta olisi  $5,15 \text{ snt/kWh}$ . Tällä ostohinnalla vuotuinen myyntitulo metaanin syöttämisestä kaasuverkkoon olisi 82 400 € kaikista saatavilla olevista syötteistä tuotetulle metaanille, ja 77 250 € syöteseokselle ilman mäskiä. Jos kaasunmyyjän kate olisikin 50 %, jolloin ostohinta olisi  $3,03 \text{ snt/kWh}$ , niin Viikin koetilan vuotuinen myyntitulo olisi 48 400 € tai 45 450 €, kun mäski olisi tai ei olisi mukana syöteseoksessa. Vastaavasti vuotuisen navetan sähkön- ja lämmönkulutuksen kustannushyöty olisi noin 70 000 €, joten alhaisella kaasunostohinnalla biokaasu kannattaisi hyödyntää CHP-yksikössä kaasunjalostuksen sijaan. Em. katearviot ovat opinnäytetyöntekijän arvioita mahdollisista katteista, koska kaasunostohintatietoa ei ollut saatavilla.

Taulukko 2. Eri syöteseosten vaikutus biokaasulaitoksessa tuotetun energian kokonaismäärään sekä sähkön- ja lämmöntuotantoon CHP-yksikössä\*

	Viikin omat	Viikin omat	Viikin omat ja	Viikin omat ja	Viikin omat,	Viikin omat,	Kaikki syötteen	Kaikki syötteen
	kiintomädätys	märkämädätys	VKL biomassa	VKL biomassa	ja ratsastustalli	ja ratsastustalli	kiintomädätys	märkämädätys
Syötemassa (t/v)	3 092	3 092	3 772	3 772	4 084	4 084	4 240	4 240
Syöteseoksen TS (%)	22,3	22,3	24,1	24,1	24,7	24,7	24,6	24,6
Syöteseoksen TS reaktoriin syötettäessä (%)	20 %	12 %	20 %	12 %	20 %	12 %	20 %	12 %
metaanintuotto (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /v)	146 217	143 095	200 061	195 863	216 570	211 924	231 247	226 442
<b>kokonaisenergiantuotto (MWh/v)</b>	<b>1 213</b>	<b>1 249</b>	<b>1 566</b>	<b>1 686</b>	<b>1 731</b>	<b>1 833</b>	<b>1 844</b>	<b>1 958</b>
<b>CHP: lämmön tuotto (MWh/v)</b>	<b>662</b>	<b>627</b>	<b>854</b>	<b>920</b>	<b>945</b>	<b>1 000</b>	<b>1 006</b>	<b>984</b>
<b>CHP: sähkön tuotto (MWh/v)</b>	<b>331</b>	<b>314</b>	<b>427</b>	<b>460</b>	<b>472</b>	<b>500</b>	<b>503</b>	<b>492</b>
Biokaasulaitoksen oma lämmön käyttö (kWh/v)	113	195	148	257	165	286	171	296
Biokaasulaitoksen oma sähkön käyttö (kWh/v)	74	73	91	90	98	97	102	101
<b>ylijäävä lämpöenergia (MWh/v)</b>	<b>-122</b>	<b>-161</b>	<b>71</b>	<b>40</b>	<b>161</b>	<b>106</b>	<b>229</b>	<b>192</b>
<b>ylijäävä sähköenergia (MWh/v)</b>	<b>-222</b>	<b>-238</b>	<b>-141</b>	<b>-108</b>	<b>-104</b>	<b>-75</b>	<b>-76</b>	<b>-87</b>
kokonaisinvestointi (€)	587 200	600 000	630 100	734 200	650 800	794 000	657 400	817 200

\* Ylijäämäenergia tarkoittaa energiamäärää, joka jää yli, kun otetaan huomioon navetan sähkön- ja lämmönkulutus. Negatiivinen luku tarkoittaa sitä, että energiaa tuotetaan vähemmän kuin kulutetaan. Kaikki luvut on laskettu biokaasulaskurilla (Luke, n.d.).

#### 9.4.4 Eri syöteseosten vaikutus ravinne- ja mädättemäärään

Syöteseosten vaikutus biokaasuprosessissa syntyvään ravinne- ja mädättemäärään on esitetty taulukossa 3 (s. 46). Kiintomädätysprosessissa, jossa syötteen kuiva-ainepitoisuus on 20 %, mädätettä syntyy maltillisemmin kuin märkämädätysprosessissa, jossa syötteen kuiva-ainepitoisuus on enintään 12 %. Syöteseoksen koostumuksen ja määrän mukaan kiintomädätysprosessin mädätteen määrä vaihtelee 3 400 tonnista 5 100 tonniin vuodessa ja märkämädätysprosessin mädätteen määrä 5 800 tonnista 8 700 tonniin vuodessa. Taulukon 3 mukaan mitä enemmän otetaan mukaan Viikin koetilan ulkopuolisia syötteitä, sitä enemmän syötettä on laimennettava ja sitä enemmän syntyy myös mädätettä. Viikin koetilan biokaasulaitoksen syöteseos (taulukossa 3 sarakkeet Kaikki syötteet) tuottaa kiintomädätysprosessilla 5 100 tonnia mädätettä, joka on 3 600 tonnia vähemmän mädätettä kuin märkämädätyksellä. Syntyvän mädätteen määrä vaikuttaa suoraan mädätteen varastointikapasiteettitarpeeseen, joka on huomioitava laitoksen kokonaissuunnittelussa.

Mikäli kaikki saatavilla olevat syötteet otetaan mukaan biokaasuprosessiin, saadaan ravinteita seuraavasti (Taulukko 3, sarakkeiden Kaikki syötteet kuiva- ja nestejakeiden summa):

- kokonaistyppeä 20 660 kg
- liukoista typpeä 10 100–10 900 kg
- fosforia 3 350 kg ja
- kaliumia 26 400 kg.

Mitä vähemmän otetaan ulkopuolisia syötteitä mukaan syöteseokseen, sitä vähemmän ravinteita muodostuu (Taulukko 3). Mädätysprosessilla ei ole vaikutusta mädätteen ravinnemäärään muutoin kuin liukoisen typen osalta. Märkämädätysprosessissa liukoista typpeä muodostuu hieman enemmän kuin kiintomädätyksessä.

Taulukko 3 Eri syöteseosten ja mädätysprosessien vaikutus syntyvään ravinne- ja mädätemäärään\*

	Viikin omat		Viikin omat ja VKL biomassa		Viikin omat, VKL biomassa ja ratsastustalli		Kaikki syötteen	
	kiintomädätys	märkämädätys	kiintomädätys	märkämädätys	kiintomädätys	märkämädätys	kiintomädätys	märkämädätys
<b>Mädäte (t/vuosi)</b>	<b>3 428</b>	<b>5 821</b>	<b>4 437</b>	<b>7 522</b>	<b>4 960</b>	<b>8 406</b>	<b>5 112</b>	<b>8 669</b>
<b>Kuivajae (t/vuosi)</b>	<b>343</b>	<b>582</b>	<b>444</b>	<b>752</b>	<b>496</b>	<b>841</b>	<b>511</b>	<b>867</b>
Kokonaistyyppi (N) (kg/vuosi)	3 080	3 080	3 493	3 493	3 742	3 742	3 926	3 926
Liukoinen typpi (kg/vuosi)	1 114	1 182	1 191	1 289	1 269	1 367	1 310	1 417
Fosfori (P) (kg/vuosi)	794	794	853	853	926	926	971	971
Kalium (K) (kg/vuosi)	1 966	1 966	2 684	2 684	2 856	2 856	2 904	2 904
<b>Nestejae (t/vuosi)</b>	<b>3 085</b>	<b>5 239</b>	<b>3 993</b>	<b>6 770</b>	<b>4 464</b>	<b>7 566</b>	<b>4 601</b>	<b>7 802</b>
Kokonaistyyppi (N) (kg/vuosi)	13 130	13 130	14 892	14 892	15 954	15 954	16 737	16 737
Liukoinen typpi (kg/vuosi)	7 455	7 913	7 969	8 624	8 494	9 148	8 765	9 480
Fosfori (P) (kg/vuosi)	1 944	1 944	2 089	2 089	2 266	2 266	2 377	2 377
Kalium (K) (kg/vuosi)	15 907	15 907	21 717	21 717	23 105	23 105	23 494	23 494

\* Kaikki luvut on laskettu biokaasulaskurilla (Luke, n.d.).

#### 9.4.5 Syöteseoksen valinta

Mitä useampaa saatavilla olevista syötteistä voidaan syöteseoksessa käyttää, sitä parempi on luonnollisesti vuotuinen metaanintuottomäärä. Sen vuoksi syöteseoksen komponenteiksi valittiin kaikki tarjolla olevat syötteenä (Kuva 2, s. 33 ja Taulukko 1, s. 34). Syöteseoksella, jossa on mukana kaikki saatavilla olevat syötteenä, saadaan paras metaanintuotto potentiaali, joka tarkoittaa noin 1 780 MWh vuosittaista energiantuotantoa (Kuva 8, s. 48).

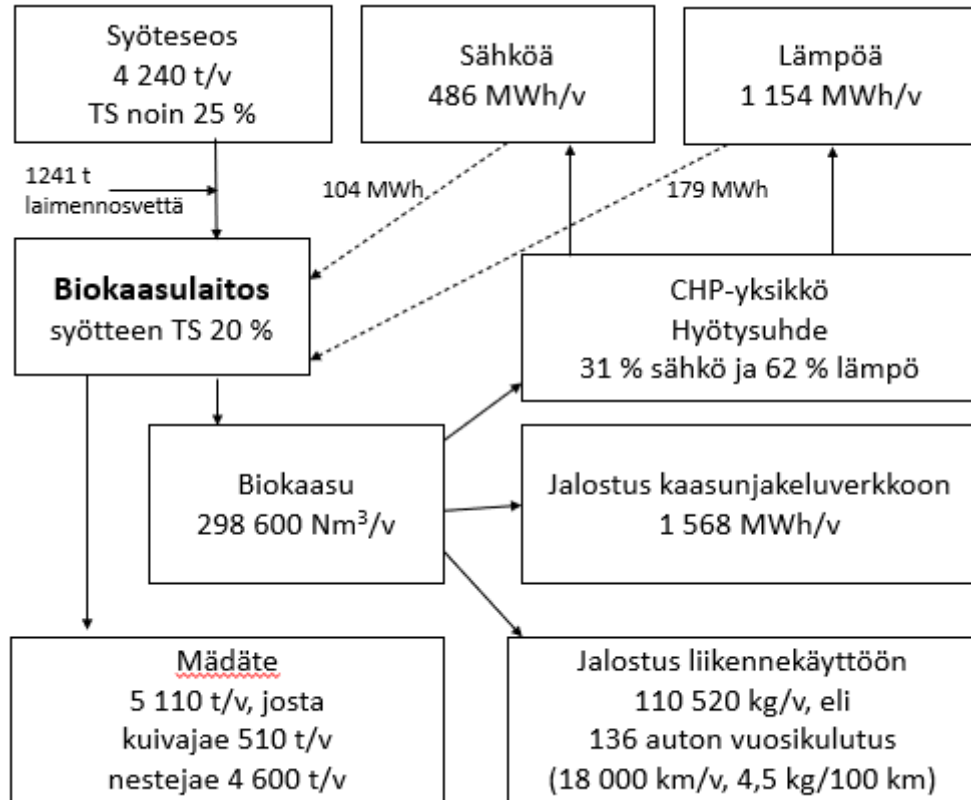
Mäskien käyttö biokaasulaitoksen syötteinä on kuitenkin erikseen harkittava kannattavuuden näkökulmasta. Kuten luvussa 9.2.5 (s. 31) on todettu, olutmäskien positiivinen puoli on sen hyvä metaanintuotto massa- verrattuna, mutta huonona puolena laitoshyväksynnän hakeminen Ruokavirastolta. Mäskiä ei kuitenkaan tarvitse hygienisoida, joten erilliseen hygienisointiyksikköön ei tarvitse investoida. Mäskien käyttö syötteinä ei siten vaikuta biokaasulaitosinvestointiin. Pienpanimon kannalta mäskien käyttö biokaasuprosessissa olisi positiivinen imagollinen asia.

Tulevan syöteseoksen korkea TS-pitoisuus, noin 25 %, ei aiheuta ongelmia biokaasuprosessissa. Biokaasulaitoksessa voidaan valita mädätystekniikaksi kiintomädätys, jolloin syöteseos on pumpattavissa ja laimennosveden määrä voidaan pitää kohtuullisena. Vähäinen laimennosveden tarve alentaa laitoksen prosessilämmön tarvetta sekä pienentää mädätteen määrää verrattuna märkämädätykseen (Taulukko 3, s. 46).

#### 9.4.6 Biokaasulaitoksen massa- ja energiatase

Tulevan biokaasulaitoksen todennäköinen massa- ja energiatase on esitetty kuvassa 8 (s. 48). Syöteseoksesta, jonka vuotuinen massa on 4 240 tonnia, tuotetaan biokaasua 298 600 m<sup>3</sup>/v. Biokaasua voidaan joko polttaa CHP-yksikössä sähköksi ja lämmöksi tai jalostaa syötettäväksi kaasunjakeluverkkoon tai käytettäväksi liikennepolttoaineena. Biokaasulaskurin käyttämiin lähtöarvoihin pohjautuen laitoksen tuottamasta biokaasusta saadaan sähköä 486 MWh ja lämpöä 1 154 MWh. Metaaniksi jalostettuna biokaasumäärä vastaisi kaasunjakeluverkossa energiasisältöä 1 568 MWh tai liikennekäytössä 136 kaasuauton vuosikulutusta (110 520 kg CH<sub>4</sub>/v). (Luke, n.d.)

Kuva 8 Biokaasulaitoksen massa- ja energiatase, kun syöteseos sisältää kaikki saatavilla olevat syötteen ja mädätystekniikkana käytetään kiintomädätystä (massa- ja energiatiedot Biokaasulaskurista, Luke, n.d.).



#### 9.4.7 Biokaasulaitoksen Worst case -skenaarioita

Merkittävä biokaasulaitoksen tuottoihin vaikuttava mahdollinen negatiivinen tekijä on hevosen kuivikelannan koostumus. Mikäli hevosenlannan kuivikkeena käytetään puupohjaista kuiviketta, kuivikelannan metaanituottopotentiaali laskee kymmenenteen osaan olkipohjaisen kuivikelannan metaanituottopotentiaalista. Metaanintuotto ja edelleen jalostetun biometaanin myyntitulo vähenisivät merkittävästi: biometaanin energiamäärä alenisi noin 450 MWh ja myyntitulo 16 840 € vuodessa (Kuva 9, s. 49). Jos tuotettu biokaasu johdettaisiin CHP-yksikköön, se tarkoittaisi 92 MWh vähemmän sähköä ja 194 MWh vähemmän lämpöä vuodessa kuin jos syötteenä käytettäisiin olkipohjaista kuivikelantaa (Kuva 10, s. 50, Kaikki syötteen ja Puupohjainen hevosenlanta).

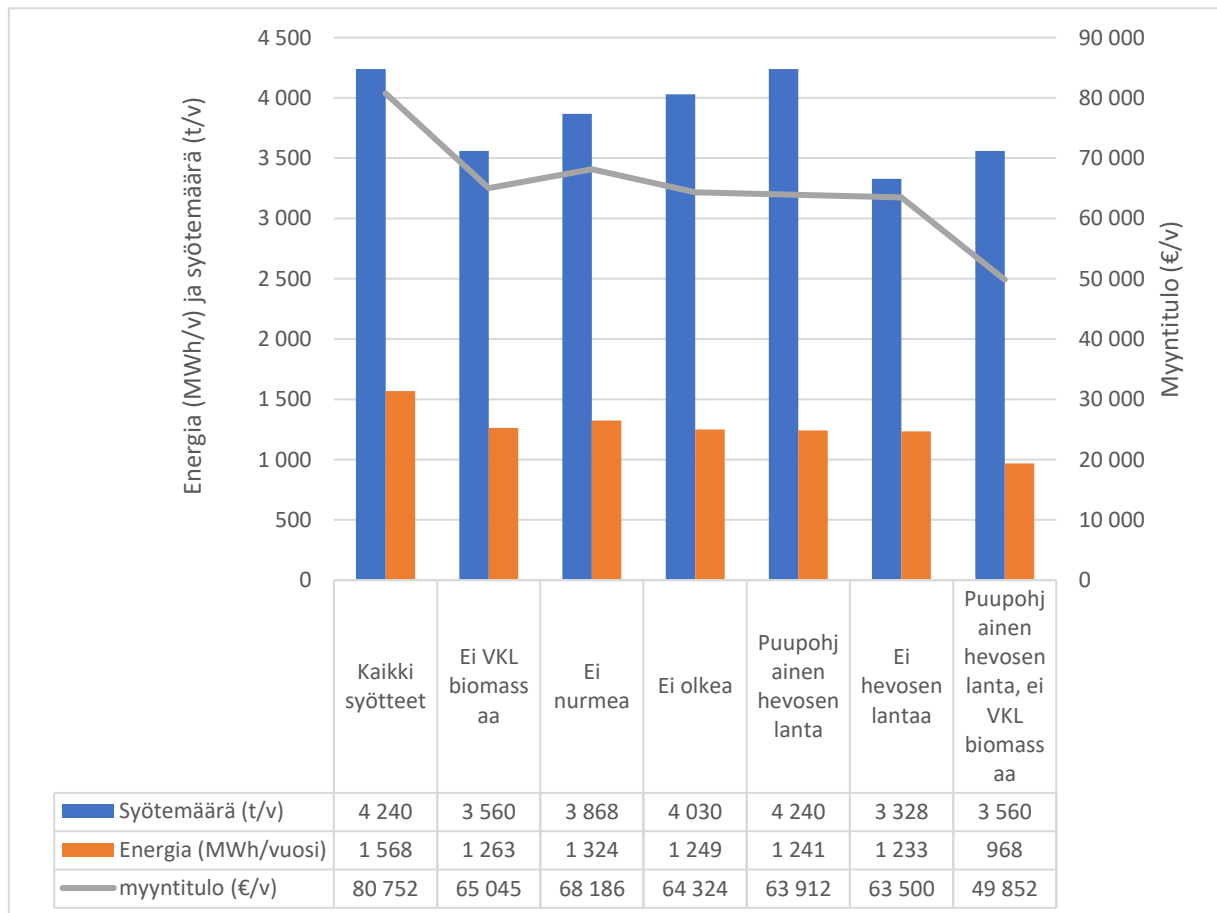
Toinen mahdollinen tuottoihin merkittävästi vaikuttava tekijä olisi syötemäärien muutos.

Kuvien Kuva 9 ja Kuva 10 (s. 50) mukaan Vanhankaupunginlahden biomassan tai oljen poisjäänti biokaasuprosessista alentaisi tuotettua energiamäärää noin 300 MWh/v/syöte ja biometaanin myyntituloa noin 16 000 €/v/syöte. Myös CHP-yksikössä tuotettaisiin sähköä noin 100 MWh ja lämpöä noin 200 MWh vähemmän. Olkipohjaisen hevosenlannan poisjättämisen vaikutus olisi myös samalla tasolla. Nurmen poisjättämisen vaikutus olisi hieman pienempi.

Kuva 9 Syötteiden vaikutus energiantuottoon ja jalostetun biokaasun myyntituloon.

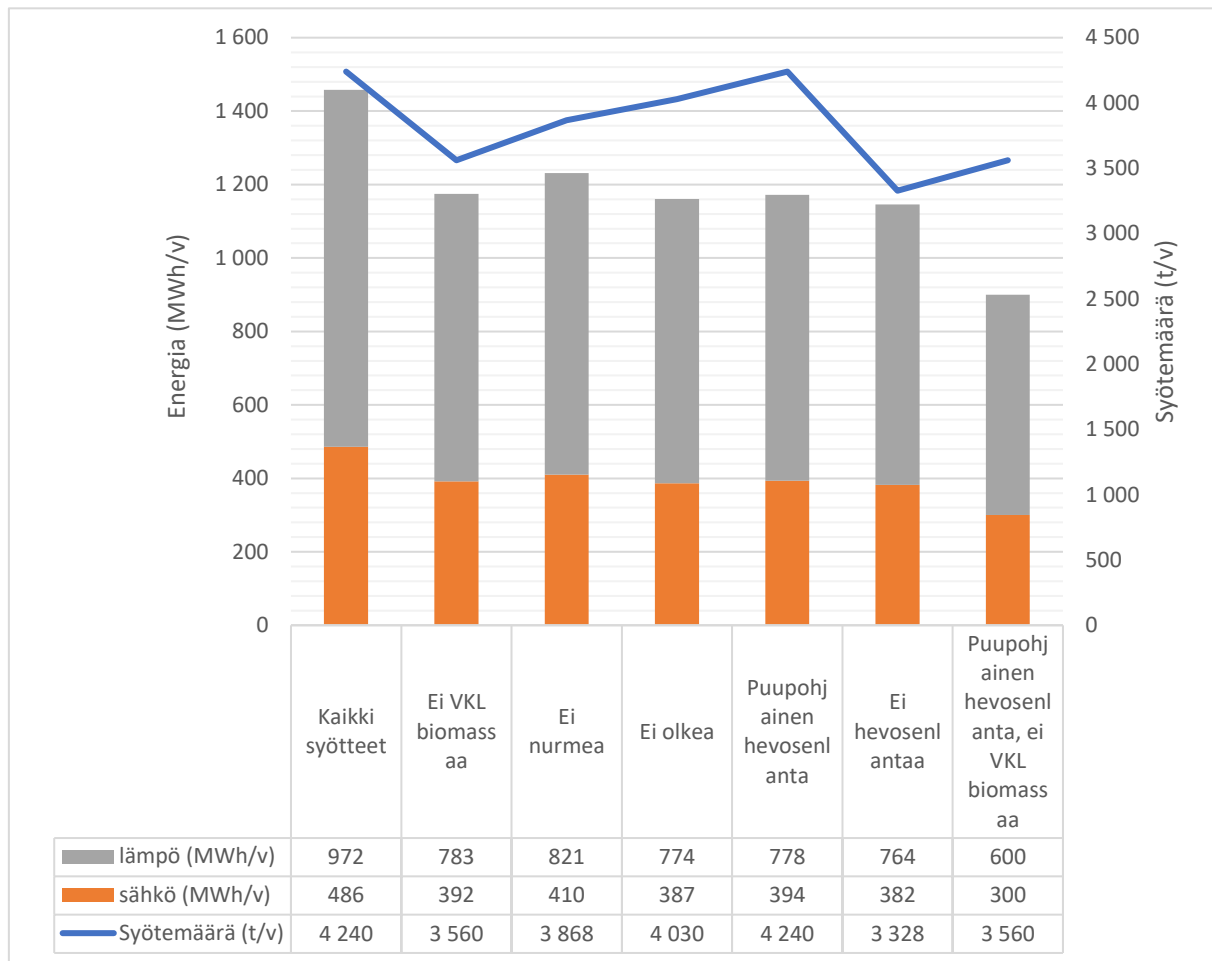
Energiamäärät on laskettu biokaasulaskurin kiintomädätysprosessilla (Luke, n.d.).

Myyntitulot perustuvat oletusmyyntihintaan 5,15 snt/kWh.





Kuva 10 Syötteiden vaikutus sähkön ja lämmön tuotantoon. Energiämäärät on laskettu biokaasulaskurilla (Luke, n.d.).



## 9.5 Viikin koetilan biokaasulaitosratkaisut

Monelle eri biokaasulaitoksia toimittavalle suomalaiselle yritykselle lähetettiin tarjouspyyntö sähköpostitse marraskuussa 2020. Tarjouspyynnön tarkoituksena oli saada käsitys siitä, millaisia biokaasulaitosvaihtoehtoja olisi tarjolla Viikin koetilan tarpeeseen.

Tarjouspyyntö sisälsi tiedon kaikista saatavilla olevista syötteistä massamäärineen (Taulukko 1, s. 34) ja siinä ilmoitettiin, että syötesekoksen koostumusta voidaan muuttaa, mikäli se on tarpeen tarjotulle biokaasulaitosvaihtoehdolle. Lisäksi tarjouspyynnössä esitettiin, että tuotettava biokaasu joko poltettaisiin CHP-yksikössä sähköksi ja lämmöksi tai jalostettaisiin metaaniksi. Muita rajaavia tekijöitä ei asetettu.

Kukin tarjous sisälsi sekä biokaasulaitostoteutuksen että tuotetun biokaasun hyödyntämisehdotuksen. Tarjousten perusteella Viikin koetilan biokaasulaitos voitaisiin toteuttaa kolmella eri prosessitekniikalla: panostoimisena kuivamädätysbiokaasulaitoksena, jatkuvatoimisena, kaksivaiheiseen mädätystekniikkaan perustuvana biokaasulaitoksena tai jatkuvatoimisena, kiintomädätystekniikkaan perustuvana biokaasulaitoksena.

Biokaasua ehdotettiin hyödynnettäväksi kolmella eri tavalla. Osa tarjouksen jättäjistä ehdotti biokaasun polttamista CHP-yksikössä sähköksi ja lämmöksi, osa taas suositteli biokaasun jalostamista metaaniksi ja metaanin käyttämistä liikennepolttoaineena tai syöttämistä kaasunjakeluverkkoon. Kolmas vaihtoehto olisi tuottaa osasta biokaasua metaania Viikin koetilan ajoneuvoille ja polttaa loput CHP-yksikössä sähköksi ja lämmöksi. Tämä vaihtoehto ei todennäköisesti olisi taloudellisesti kannattavaa, koska silloin olisi investoitava sekä CHP-yksikköön että kaasunjalostusyksikköön.

## **9.6 Biokaasulaitosratkaisujen vertailu ja muut huomiot**

Jatkuvatoimisessa, kaksivaiheiseen mädätystekniikkaan perustuvassa tai yksivaiheiseen kiintomädätystekniikkaan perustuvassa biokaasulaitoksessa voidaan käyttää syöteseosta, joka sisältäisi kaikkia saatavilla olevia syötteitä. Panostoimisessa, kuivamädätykseen perustuvassa biokaasulaitoksessa voidaan myös tuottaa biokaasua kaikista saatavilla olevista syötteistä, mutta naudan lietelannasta hyödynnettäisiin ainoastaan separoitu kuivajae.

### **9.6.1 Prosessi- ja reaktorivalintojen erot**

Tarjottujen biokaasulaitosten prosessivalinnoissa oli otettu huomioon korkea kuiva-ainepitoisuus (TS-pitoisuus) ja kasviperäisen syötemateriaalin suuri suhteellinen osuus. Biokaasulaitoksen syöteseoksen TS-pitoisuus olisi noin 25 %, ja orgaanisen kuiva-aineen, VS, pitoisuus noin 87 % kokonaiskuiva-aineesta.

Erot biokaasulaitostoitajien välillä perustuvat eri prosessitekniikoihin. Taulukossa 4 (s. 52) on esitetty eri biokaasulaitosvaihtoehtojen prosessitekniinen vertailu. Syöteseoksen määrässä ja koostumuksessa on ero kuivamädätyksen sekä kaksivaiheisen mädätyksen ja kiintomädätyksen välillä siksi, että kuivamädätysprosessissa syötteen on oltava läjitettävää.

Muissa laitoksissa syöte ja mädäte pumpataan. Panostoimisessa kuivamädätysprosessissa menetetään hieman metaanituottopotentiaalia lietelannan nestejakeen jäädessä pois syöteseoksesta jatkuvatoimisiin laitosratkaisuihin verrattuna.

Taulukko 4 Biokaasulaitostoimittajien laitosratkaisujen vertailu

Biokaasuprosessi	Kaksivaiheinen mädätysprosessi	Kiintomädätys	Kuivamädätys
<b>Syöteseos</b>	kaikki saatavilla olevat syötteen	kaikki saatavilla olevat syötteen	kaikki syötteen paitsi lietelannasta separoitu nestejake
<b>Syöteseoksen määrä</b>	4 240 t/v	4 240 t/v	3 045 t/v
<b>Syötteen annostelu</b>	pumppaus	pumppaus	läjitys kuormaajalla
<b>Reaktorimassan sekoitus</b>	kyllä, molemmissa reaktoreissa	kyllä	ei tarvetta sekoitukselle
<b>Orgaaninen kuormitus, OLR</b>	<11 kg VS/m <sup>3</sup> vrk ja 2–3 kg VS/m <sup>3</sup> vrk	2–3 kg VS/m <sup>3</sup> vrk	-
<b>Viipymäaika, HRT</b>	2–3 kk	2–3 kk	3 kk
<b>Metaanituotto-potentiaali</b>	noin 225 000 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /v	noin 225 000 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /v	noin 200 000 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /v

Kiintomädätystekniikkaan perustuvat täyssekoitteiset reaktorit voidaan varustaa hitaasti pyörivällä lapasekoittimella, koska Viikin koetilan syöteseoksen kuiva-ainepitoisuus on korkea ja syöte sisältää helposti pintaan nousevaa nurmea ja olkea. Lapasekoittimen lavat rikkovat reaktorimassan pintaa ja pitävät koko reaktorin massan jatkuvassa liikkeessä. Ilman sekoittimen lapojen aiheuttamaa pintakerroksen rikkoontumista nurmi ja olki nousevat reaktorimassan pintaan. Sekoitusta ei tarvita panostoimisessa kuivamädätyksessä. Kaksivaiheisen mädätysprosessin ensimmäinen reaktori perustuu tulppavirtaukseen, jossa reaktori sisällön ei olekaan tarkoitus sekoittua täysin, vaan syötemassa etenee vaakatasossa makaavan reaktorin läpi gradienttina. (Myllärinen, 2020; Luostarinen, 2015, s. 86)

### 9.6.2 Viipymäaika, HRT

Viikin koetilan syöteseos vaatii pitkän viipymäajan (HRT), jotta orgaaninen aines hajoaa riittävästi ja tehokas biokaasun muodostuminen on mahdollista. Biokaasulaitosten

prosessiviipymät ovat riittävän pitkiä, 2–3 kk, tuottamaan tehokkaasti biokaasua kasviperäisestä syöteseoksesta (Taulukko 4, s. 52).

Jatkuvatoimisessa märkäreaktorissa syötemassa viipyy laskennallisesti reaktorissa viipymääjan verran. Käytännössä jatkuvatoimisissa biokaasulaitoksissa, joissa on vain yksi täyssekoitteinen mädätysreaktori, pieni osa orgaanisesta aineksesta virtaa läpi reaktorin hajoamatta, koska vastasyötetty syöte sekoittuu reaktorimassaan ja pieni osa siitä poistuu reaktorista lyhyen ajan kuluessa mädätteen mukana (Luostarinen, 2015, s. 84). Koska tässä tapauksessa kiintomädätysprosessin viipymäaika on pitkä, 2–3 kk, niin edellä kuvattua oikovirtausta tapahtuu vain vähän. Kaksivaiheiseen biokaasuprosessiin perustuvassa biokaasulaitoksessa syöteseoksen minimiviipymäaika on vähintään tulppavirtausreaktorin viipymäaika ja panostoimisessa biokaasuprosessissa syötemassa tuottaa biokaasua koko viipymääjan verran.

### 9.6.3 Orgaaninen kuormitus, OLR

Jotta biokaasulaitos toimisi ongelmitta, jatkuvatoimisen biokaasuprosessin orgaaniseen kuormitukseen (OLR) on kiinnitettävä huomiota. Orgaaninen kuormittavuus ei koske panostamista biokaasuprosessia, koska syötettä ei lisätä mädätysprosessin aikana. Kirjallisuuden mukaan pelkkää lantaa käyttävissä reaktoreissa keskimääräinen orgaaninen kuormitus Suomessa on 2–3 kg VS/m<sup>3</sup>vrk, ja isoilla biokaasulaitoksilla, joissa käsitellään sekä lietettä että biojätettä, orgaaninen kuormitus on 4–5 kg VS/m<sup>3</sup>vrk (Kymäläinen, 2015b, s. 73).

Märkämädätystekniikkaan perustuvien Viikin koetilan biokaasulaitosten reaktorien orgaaninen kuormitus olisi kohtuullinen, 2–3 kg VS/m<sup>3</sup>vrk (Taulukko 4, s. 52). Kaksivaiheisen mädätysprosessin orgaanisia kuormituslukemia ei voida suoraan verrata edellä kuvattuun kirjallisuuden arvoon 2–3 kg VS/m<sup>3</sup>vrk, koska prosessin ensimmäisen, tulppavirtaukseen perustuvan reaktorin tarkoitus on hydrolysoida syötemassaa biokaasun tuotantoa varten. Silloin reaktorin orgaaninen kuormitus voi olla korkeampi kuin märkä- tai kiintomädätystekniikkaan perustuvassa reaktorissa, jossa sekä syötteen hydrolysoituminen että metanogeneesi tapahtuvat samanaikaisesti. Tulppavirtausreaktorin orgaaninen kuormitus riippuu syötemassan koostumuksesta, eli helposti hajoavaa syötemassaa voidaan

syöttää reaktoriin enemmän kuin hitaasti hajoavaa syötemassaa. Koska Viikin koetilan biokaasulaitoksen syöteseos sisältää paljon kasviperäistä ainesta, kuormitus on pienempi kuin tulppavirtausreaktorin tavanomainen, esimerkiksi biojätteelle tyypillinen orgaaninen kuormitus, 11–13 kg VS/m<sup>3</sup>vrk (biokaasulaitostoimittaja, henkilökohtainen tiedonanto 11.12.2020). Kaksivaiheisen biokaasulaitoksen jälkimmäisen, märkämädätykseen perustuvan reaktorin orgaaninen kuormitus olisi laskennallisesti tasoa 2–3 kg VS/m<sup>3</sup>vrk. Märkämädätysreaktorin todellinen orgaaninen kuormitus kuitenkin riippuisi syötteen hydrolysoitumisesta ja biokaasun muodostumisesta tulppavirtausreaktorissa (biokaasulaitostoimittaja, henkilökohtainen tiedonanto 11.12.2020).

Orgaanisen kuormittavuuden osalta kaikkien taulukon 4 (s. 52) biokaasulaitosratkaisujen prosessiviipymät ovat riittäviä tuottamaan tehokkaasti biokaasua kasviperäisestä syöteseoksesta.

#### **9.6.4 Biokaasulaitosten operointi**

Tarjotuissa biokaasulaitoksissa on operointieroja. Jatkuvatoimiset biokaasulaitosratkaisut sisältävät erikokoisia kuivien syötteiden vastaanotto- ja syöttösiiloja, joiden tilavuus riittää noin 1–2,5 vrk:n syötetarpeeseen. Lietelanta pumpataan erikseen reaktoriin. Syötteiden vastaanotto- ja syöttösiilojen koolla voidaan vaikuttaa päivittäiseen työskentelyaikaan. Esimerkiksi siilon kannattaisi olla niin suuri, että se voitaisiin täyttää perjantaina iltapäivällä ennen työpäivän päättymistä ja seuraavan kerran vasta maanantaiaamuna. Pieni vastaanotto- ja syöttösiilo pitäisi täyttää päivittäin, jos halutaan tasainen biokaasuntuotto.

Biokaasulaitoksen operoinnin osalta kuivämädätyslaitos olisi todennäköisesti työaikaresurssoinnin kannalta paras vaihtoehto, koska laitoksen operointi on joustavaa. Panostoimista kuivämädätysreaktoria voidaan täyttää silloin, kun se sopii muihin Viikin koetilan työtehtäviin. Kun reaktori on täynnä, biokaasuprosessi aloitetaan. Viipymääjan tultua täyteen bioreaktorin tyhjennys työllistäisi hetkellisesti paljon.

Tarjotuissa biokaasulaitoksissa on etähallintamahdollisuus ja hälytysjärjestelmä, jolloin biokaasulaitos ei tarvitse henkilöstön jatkuvaa läsnäoloa.

### 9.6.5 Muut huomiot

Kaksivaiheiseen biokaasuprosessiin perustuvan biokaasulaitoskokonaisuuden hyvänä puolena voidaan pitää laitoksen prosessioptimointia, jossa syöteseoksen hydrolyysi- ja metaanintuottovaihetta voidaan erikseen säätää syöteseokselle sopivaksi. Tämän laitosvaihtoehdon haasteeksi saattaa tulla biokaasulaitoksen sijoittaminen Viikin koetilan tontille, koska biokaasulaitos sisältää kaksi reaktoria. Mikäli tilaa kahdelle reaktorille ei ole, tätä biokaasulaitosta ei voida toteuttaa. Lisäksi kahden biokaasureaktorin rakentaminen nostaa investointikustannuksia yhden reaktorin sisältäviin biokaasulaitoksiin verrattuna.

Kiintomädätystekniikkaan perustuva biokaasulaitos on varteenotettava vaihtoehto Viikin koetilan tulevaksi biokaasulaitokseksi, koska kiintomädätystekniikka on melko yksinkertainen ja maatilamittaluokan biokaasulaitoksista on paljon kokemusta. Koska laitos sisältää vain yhden reaktorin, sen investointikustannukset ovat todennäköisesti kohtuulliset. Syöteseosta ei mahdollisesti tarvitsisi laimentaa ollenkaan tai sitä laimennettaisiin hyvin vähän, jolloin mädätteen määrä pysyisi kohtuullisena, eikä mädätteen nestejakeen varastointisäiliössä tarvitsisi ottaa huomioon suurta laimennosveden määrää. Mikäli syöteseosta pitäisi laimentaa, se voitaisiin toteuttaa ainakin osittain kierrättämällä mädätteen nestejakeetta (biokaasulaitostoimittaja, henkilökohtainen tiedonanto 4.12.2020).

Toinen varteenotettava biokaasulaitosvaihtoehto on panostoiminen kuivamädätyslaitos. Sen hyviä puolia ovat laitoksen yksinkertaisuus ja helppohoitoisuus sekä todennäköisesti kohtuullinen hinta. Panostoimisessa biokaasuprosessissa voidaan mädättää lietelannasta ainoastaan kuivajae. Nestejake on käsiteltävä jotenkin muutoin. Panostoimisessa biokaasulaitoksessa osa mädätteen ammoniumtypeistä muihin laitosratkaisuihin verrattuna menetetään, koska nestejake ei ohjaudu biokaasuprosessiin. Nestejakeen orgaanisen aineksen puuttuminen biokaasuprosessista alentaa myös hieman vuotuista metaanintuottoa. Lisäksi panostoimisessa biokaasuprosessissa biokaasua ei muodostu tasaisesti, vaan se lisääntyy vähitellen ja alkuun sisältää enemmän hiilidioksidia ja vähemmän metaani. Biokaasun koostumus muuttuu metaanipitoisemmaksi prosessin edetessä ja loppua kohti biokaasun tuotanto vähenee (Luostarinen, 2015, s. 83).

Panostoimisen biokaasuprosessin ongelmaksi voi muodostua hajuhaitat, jotka syntyvät reaktoria täytettäessä ja tyhjennettäessä. Viikin koetilalle perustettavan biokaasulaitoksen yksi tärkeimmistä syistä on hajuhaittojen vähentäminen, mikä ei välttämättä toteutuisi panostoisessa biokaasulaitoksessa. Lisäksi panostoisessa mädätysprosessissa syötettä ei voida hygienisoida, joten se rajoittaa syötevalikoimaa, mikäli biokaasulaitoksen syötevalikoimaa halutaan muuttaa.

Koska panostoiminen laitosratkaisu sisältää aina vähintään kaksi reaktoria, tämän laitosvaihtoehdon haasteeksi saattaa tulla biokaasulaitoksen sijoittaminen Viikin koetilan tontille.

## **9.7 Biokaasun käyttövaihtoehdot**

Tarjouspyynnössä pyydettiin tarjouta myös biokaasun käytöstä joko niin että kaasu poltetaan CHP-yksikössä sähköksi ja lämmöksi tai että se jalostetaan metaaniksi. Raakabiokaasun polttaminen lämpökattilassa lämmöksi ei ole relevantti vaihtoehto paitsi, jos Viikin koetilan läheisyyteen vuonna 2021 muuttava pienpanimo käyttäisi muodostuvan biokaasun kokonaisuudessaan prosessilämpönä. Tällöin raakabiokaasu johdettaisiin kaasuputkea pitkin biokaasulaitoksesta panimolle. Raakabiokaasua ei voida paineistaa kontteihin kaasun kuljetusta varten, koska CO<sub>2</sub> tiivistyy nesteeksi 5,2 baarin paineessa ja kaasunpaine kuljetuskonteissa on huomattavasti tätä korkeampi (Työterveyslaitos, 2017; Lampinen & Rautio, 2015, ss. 167–168).

Alustavan kyselyn mukaan pienpanimo on kiinnostunut biokaasun käytöstä, mutta mitään konkreettisia lukuja käyttömääristä heillä ei ollut antaa. Panimo liittyyne Viikin alueen kaasunjakeluverkkoon, joten raakabiokaasun johtaminen kaasuputkea pitkin panimolle ei todennäköisesti ole vaihtoehto. (pienpanimo, henkilökohtainen tiedonanto 8.11.2020)

### **9.7.1 Biokaasusta sähköä ja lämpöä**

Osa biokaasulaitostoimittajista tarjosi biokaasun käyttökohteeksi sähkö- ja lämpöenergian tuotantoa CHP-yksiköllä. Viikin koetilan biokaasulaitos tuottaisi biokaasua siten, että CHP-yksiköllä lämpöä tuotettaisiin 960 MWh ja sähköä 480 MWh (Kuva 8, s. 48). Tätä energiaa

voitaisiin käyttää hyödyksi Viikin koetilalla. Viikin koetilan navetan vuotuinen kaukolämmön kokonaiskulutus on 765 MWh ja sähkön vuotuinen kokonaiskulutus 480 MWh. Biokaasulla tuotettaisiin siten laskennallisesti ylijäämälämpöä 135 MWh. Sähkönkulutus on vuositasolla todennäköisesti vakio, mutta lämmöntarve vaihtelee vuodenajan mukaan. Koska biokaasua tuotetaan tasaisesti ympäri vuoden, kesällä lämpöenergiaa olisi selvästi yli oman tarpeen ja talvella todennäköisesti tarvittaisiin lisälämmitystä kaukolämmöllä. Ylijäämälämmölle tulisi löytää käyttökohde, jotta investointi CHP-yksikköön olisi kannattavaa.

### 9.7.2 Biokaasun jalostus metaaniksi

Tarjousten mukaan Viikin koetilan biokaasulaitoksen tuottama biokaasu voidaan puhdistaa metaaniksi ainakin kahdella eri tekniikalla, ns. liikennelaatuista metaania vesiabsorptiotekniikalla ja kaasunjakeluverkkoon soveltuvaa metaania membraanitekniikalla. Vesiabsorptiolaitteistosta on saatavilla useampaa eri kokoa. Suurella laitteistolla olisi mahdollista jalostaa kaikki tuotettu biokaasu metaaniksi ja pienellä laitteistolla voisi osan biokaasusta jalostaa liikennepolttoaineeksi koetilan työkoneille ja loput biokaasusta polttaa CHP-yksikössä sähköksi ja lämmöksi (laitetoimittaja, henkilökohtainen tiedonanto 27.11.2020).

Vesiabsorptioon perustuvassa metaaninjalostuksessa paineistettu raakabiokaasu syötetään absorptiotornissa virtaavan veden läpi, jolloin biokaasun epäpuhtaudet kuten ammoniakki ja rikkiyhdisteet sekä hiilidioksidi jäävät vesifaasiin metaania suuremman vesiliukoisuuden vuoksi ja ulostulevan kaasun metaanipitoisuus on 95–98 %. Vesiabsorptiotekniikalla ei voida poistaa typpeä, sillä typen vesiliukoisuus on alhainen. Vesiabsorptioon perustuvan jalostimen käyttökustannukset ovat yleensä edulliset. (Lampinen & Rautio, 2015, ss. 140-142; Metener Oy, n.d.)

Biokaasu voidaan jalostaa metaaniksi myös membraaniteknologiaan perustuvalla kaasunjalostusyksiköllä. Membraaniteknologia perustuu kaasujen erottamiseen toisistaan molekyylikoon perusteella. Koska metaanin ja hiilidioksidin molekyylikoot ovat lähellä toisiaan, biokaasu johdetaan jalostusyksikössä useiden membraanien läpi. Puhdistettavaa kaasua kierrätetään jalostusyksikössä, ja siksi metaanin laatu on korkea ja metaanihäviö



pieni. Tämän jalostusyksikön huono puoli on todennäköisesti vesiabsorptiota kalliimpi investointikustannus. (Biovoima Oy, 2019b; Lampinen & Rautio, 2015, s. 149)

### **9.7.3 Metaani liikennepolttoaineeksi**

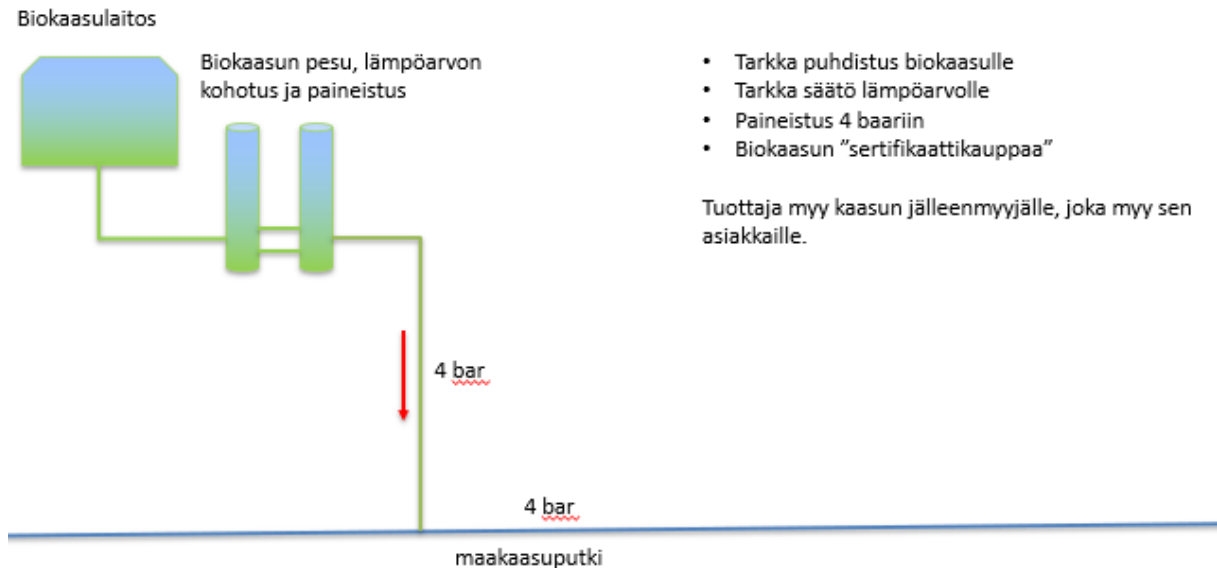
Viikin koetilan biokaasulaitoksen biokaasusta puhdistettu vuotuinen metaanimäärä riittäisi 136 kaasukäyttöisen henkilöauton vuotuiseksi polttoaineeksi, kun auton keskimääräinen kulutus olisi 4,5 kg/100 km ja ajettuja kilometrejä 18 000 km (Kuva 8, s. 48). Julkisen tankkausaseman perustamiskustannuksia ei kuitenkaan tutkittu, koska sellaisen operoiminen Viikin koetilan alueella olisi todennäköisesti liikenteellisesti hankala. Lisäksi se vaatisi jatkuvaa ylläpitoa ja sitoisi henkilöresursseja. Puhdistettua metaania olisi kuitenkin mahdollista käyttää koetilan ajoneuvojen polttoaineena. Tämä tarkoittaisi työkoneiden muuttamista kaasukäyttöiseksi. Viikin koetilan johtajan (henkilökohtainen tiedonanto 13.11.2020) mukaan työkoneissa käytettävän polttonesteen litrahinta on niin edullinen, että biometaanin käyttö koetilan työkoneissa tuskin olisi kannattavaa.

### **9.7.4 Metaanin syöttö kaasuverkkoon**

Puhdistetun metaanin vuotuinen energiasisältö, 1 570 MWh, voitaisiin todennäköisesti myydä kaasunjakeluverkkoon, mikäli puhdistetun metaanin laatu täyttää kaasunjakeluverkon vaatimukset (Kuva 8, s. 48). Jalostetun metaanin syöttämistä kaasunjakeluverkkoon selvitettiin Helsingin kaupungin jakeluverkkoa hallinnoivalta kaasunjakelijalta. Kaasunsyöttöön olisi todennäköisesti kolme eri vaihtoehtoa. ”Perinteinen” kaasunsyöttö perustuisi kaasun puhdistamiseen, lämpöarvon kohottamiseen kaasunjakeluverkon tasolle ja paineistamiseen kaasunjakeluverkkoon sopivaksi (Kuva 11, s. 59). Tämä vaihtoehto vaatisi jalostusyksikön, jolla biokaasu saataisiin puhdistettua liikennemetaania puhtaammaksi, joten biometaanin jalostus pitäisi tehdä membraaniteknologiaan perustuvalla laitteistolla. Lisäksi tämä vaihtoehto vaatisi metaanin laadunvalvontayksikön. (kaasunjakeluyritys, henkilökohtainen tiedonanto 7.12.2020)

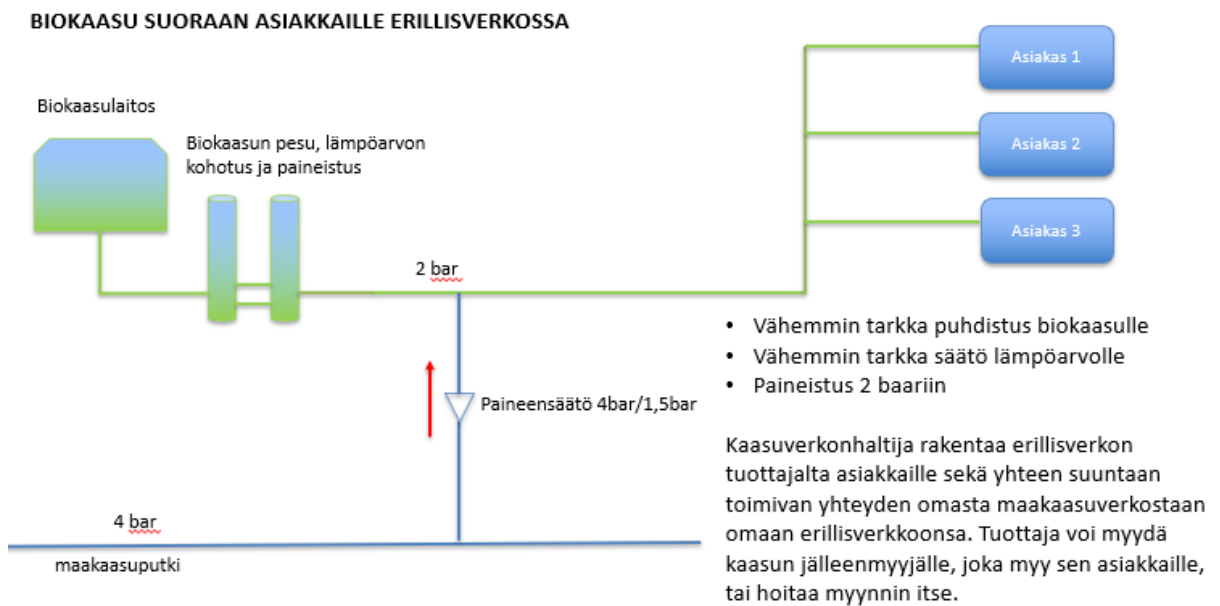
Kuva 11 ”Perinteinen” kaasunsyöttö jakeluverkkoon (muokattu kaasunjakeluyritykseltä saadusta materiaalista, henkilökohtainen tiedonanto 7.12.2020).

### BIOKAASU JAKELUVERKKOON



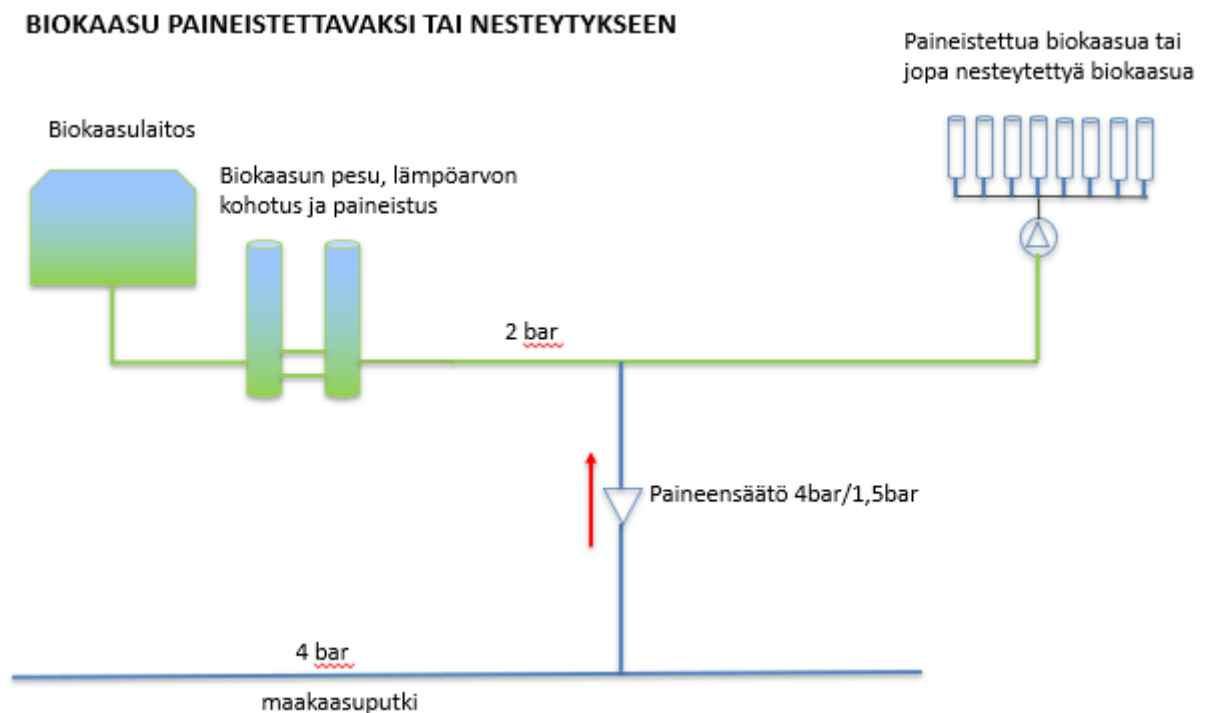
Toinen vaihtoehto metaanin syöttämiseksi kaasunjakeluverkkoon on muodostaa erillinen, lähiseudun kattava kaasunjakeluverkko, jolloin biokaasupuhdistuksen tai lämpöarvon säätö ei tarvitsisi olla samalla tasolla kuin valtakunnalliseen kaasunjakeluverkkoon syötetyllä metaanilla (Kuva 12, s. 60). Verkkoon syötetyn metaanin paine voisi myös olla alhaisempi. Tässä vaihtoehdossa valtakunnanverkosta syötettäisiin maakaasua paikalliseen verkkoon, mikäli Viikin koetilan tuottama biometaani ei riittäisi hetkellisiin kulutuspiikkeihin. Ehtona erillisverkon käytölle on se, että erillisverkon asiakkaat voivat ja haluavat käyttää erillisverkon kaasua, joka ei laadultaan vastaa maakaasua. (kaasunjakeluyritys, henkilökohtainen tiedonanto 7.12.2020)

Kuva 12 Biokaasun jalostus ja toimitus kaasun erillisverkkoon (muokattu kaasunjakeluyritykseltä saadusta materiaalista, henkilökohtainen tiedonanto 7.12.2020).



Kolmas vaihtoehto biokaasun käytölle olisi puhdistetun metaanin paineistaminen tai nesteytys kaasukontteihin (Kuva 13, s. 61). Tällöin metaani voitaisiin käyttää myös muualla kuin kaasunjakeluverkon varrella. (kaasunjakeluyritys, henkilökohtainen tiedonanto 7.12.2020)

Kuva 13 Jalostetun metaanin paineistus tai nesteytys (muokattu kaasunjakeluyritykseltä saadusta materiaalista, henkilökohtainen tiedonanto 7.12.2020).



Yksinkertaisin tapa biometaanin myyjälle ja kaasunjakelusta vastaavalle yritykselle olisi toteuttaa biometaanin syöttö maakaasuverkkoon kuvan 11 (s. 59) mukaisesti. Tämän vaihtoehdon ongelmana on kuitenkin metaanintuottajalle koituvat korkeat kaasunpuhdistuskulut sekä kallis biometaanin laadunvalvontaan tarkoitettu laiteinvestointi. (kaasunjakelu yritys, henkilökohtainen tiedonanto 7.12.2020)

Mikäli Viikin koetilan biokaasulaitoksen tuottama biokaasu jalostetaan metaaniksi ja syötetään kaasunjakeluverkkoon, se saattaa vaikuttaa myös valittavaan biokaasulaitosprosessiin. Kaasunjakelijan kannalta biokaasuntuotannon tulisi todennäköisesti olla mahdollisimman tasaista. Tämän vuoksi panostamisen kuivamädätyslaitoksen ongelmaksi saattaa muodostua se, että kaasuntuotanto ei ole laadultaan ja määrältään tasaista koko mädätysprosessin ajan. Mahdollinen biokaasuntuotannon vaihtelu saattaa vaikuttaa kaasunjakeluyrityksen toimintaan.

## 9.8 Mädatteen käyttö

Biokaasulaitoksen mädatettä voidaan käyttää lannoitteena Viikin koetilan pelloilla.

Mädatteen ravinnemäärät on esitetty luvussa 9.4.4 (s. 45).

Mädatteen kuivajaetta voitaneen käyttää eläinten kuivikkeena (ks. teoriaa luvusta 6.2.2, s. 20). Tämä vaihtoehto vaatii lisäselvitystä, sillä mädatteesta separoitu kuivajae saattaa olla niin hienojakoista, että se kastuessaan liettyy savimaiseksi massaksi, joka sotkee ja on hankala siivota pois navetan lattialta. Kuivajakeen hienojakoisuus johtuu siitä, että biokaasureaktoreissa syötteiden annostelun ja sekoituksen sekä metaanintuoton vuoksi syöteseos murskataan hienojakoiseksi. Panostoimisessa kuivamädätyslaitoksessa syötemassaa ei käsitellä ennen biokaasuprosessia eikä sen aikana, joten syötemassa pysynee suurempijakoisena. Puupohjaisen hevosenlannan käyttö syötteenä tekisi mädatteesta ehkä vähemmän liettyvän. Tällainen mädate saattaisi toimia paremmin kuivikkeena.

## 9.9 Biokaasulaitoksen investointi- ja kannattavuuslaskelmia

Biokaasulaitoksen investointi- ja kannattavuuslaskelmia tehtiin biokaasulaskurilla.

Tarkastelun kohteena oli erilaisten syöteseosten vaikutus laitosinvestointiin. Lisäksi tarkasteltiin, miten biokaasulaitosinvestointikustannusten muuttuminen vaikuttaisi esimerkiksi investoinnin takaisinmaksuaikaan tai tulokseen.

### 9.9.1 Eri syöteseosten vaikutus biokaasulaitosinvestointiin

Taulukossa 2 (s. 44) on esitetty kokonaiskustannukset biokaasulaitoksille eri syötevaihtoehdoilla (taulukon alin rivi). Biokaasulaskurin kustannusarvion mukaan biokaasulaitos vain Viikin koetilan ja hevossairaalan syötteille maksaisi noin 600 000 € ja investoinnin kustannukset kasvaisivat, mitä enemmän eri syötteitä ja syötemassaa otettaisiin mukaan prosessiin. Koska syöteseoksen kuiva-ainepitoisuus (TS) nousisi mitä enemmän Helsingin yliopiston ulkopuolisia syötteitä otetaan mukaan, märkämädätykseen perustuva biokaasulaitos kallistuu kiintomädätystekniikkaa enemmän. Tämä johtuu siitä, että syöteseosta on laimennettava rajusti mitä korkeampi TS-pitoisuus on. Laimentaminen kasvattaa reaktorin kokoa samoin kuin syötemassan lämmittämiseen käytettävää

lämpöenergiämäärää. Esimerkiksi kaikille saatavilla oleville syötteille tarkoitetun märkämädätyslaitoksen lämpöenergian tarve olisi noin 1,7-kertainen kiintomädätystekniikkaan perustuvaan biokaasulaitokseen verrattuna (296 MWh/v vs. 171 MWh/v, Taulukko 2, s. 44). Kaikille syötteille tarkoitettu märkämädätystekniikkaan perustuva biokaasulaitos maksaisi noin 820 000 € ja kiintomädätystekniikkaan perustuva biokaasulaitos 660 000 €. Em. hinnat perustuvat biokaasulaitosratkaisuihin, jossa biokaasusta tuotetaan sähköä ja lämpöä CHP-yksiköllä. Mikäli biokaasu jalostettaisiin metaaniksi ja myytäisiin kaasunjakeluverkkoon, biokaasulaskurin mukaan hinta kiintomädätystekniikkaan perustuvan biokaasulaitoksen ja metaaninjalostusyksikön investointikustannukseksi tulisi noin 765 000 €.

### 9.9.2 Valitun syöteseosten vaikutus biokaasulaitosinvestointiin

Valitulle syöteseokselle (luku 9.4.5, s. 47) tehtiin biokaasulaitoksen investointi- ja kannattavuuslaskelmia biokaasulaskurilla (Luke, n.d.). Biokaasun käyttövaihtoehtoiksi otettiin joko sähkön ja lämmön tuotanto CHP-yksiköllä tai jalostus metaaniksi. Kannattavuuslaskelmat (Taulukko 5, s. 64) tehtiin siten, että biokaasulaitoksen hinnaksi arvioitiin joko 500 000 €, 750 000 € tai 1 000 000 €, CHP-yksikön hinnaksi 150 000 € ja biokaasujalostimen hinnaksi 260 000 €. Muut investointikustannukset, esim. lupien hakeminen, maanalaiset putkistot, pihatyöt ja työnjohto, arvioitiin olevan 55 000 € (biokaasulaskurin pyöristetty oletussumma). Kaasun myyntihinnaksi määritettiin 5,15 snt/kWh ja investoinnin laskentakorkokannaksi biokaasulaskurin oletusarvo, 4 %. Laskelmissa käyttökustannukset olivat biokaasulaskurin oletusarvoja, joihin oli lisätty 5 000 € syötteiden kuormaus-, kuljetus- ja käsittelykuluja. Laskelmissa otettiin huomioon Viikin koetilan vuotuinen sähkön- ja lämmönkulutus, 480 MWh ja 765 MWh.

Mädätteen neste- ja kuivajakeille tarkoitettuja varastoinvestointeja ei otettu huomioon eikä mädätteen separointiin tarvittavaa separaattoria, koska Viikin koetilalla on jo käytössä separaattori, jota voitaneen käyttää mädätteen separointiin. Kustannukset metaanin syöttämiseksi kaasunjakeluverkkoon jätettiin myös huomiotta, koska todellisia lukuja ei ollut saatavilla.

Kannattavuuslaskelmien (Taulukko 5) perusteella biokaasulaitosta ei todennäköisesti saada kannattavaa. Vuotuinen tulos energiatuki huomioidenkin on negatiivinen, vaikka biokaasulaitoksen hinta olisi vaihtoehtoista alhaisin, eli 500 000 €, ja kokonaisinvestointi 705 000 € tai 815 000 € biokaasun hyödyntämistavasta riippuen. Laitoksen takaisinmaksuaika Työ- ja elinkeinoministeriön 30 % energiatuki huomioiden olisi 14 vuotta, jos biokaasu jalostetaan metaaniksi, ja lähes 16 vuotta, jos biokaasu käytetään koetilalla sähköinä ja lämpönä. Ilman energiatukea takaisinmaksuajat olisivat 20 ja 22,5 vuotta. Kun biokaasulaitoksen hinta nousee, myös takaisinmaksu pitenee. Jos biokaasulaitos maksaisi miljoona euroa, ilman energiatukea takaisinmaksu olisi jopa 50 vuotta.

Laskelmien mukaan biokaasu kannattaa todennäköisesti jalostaa biometaaniksi, koska biometaanin myynnistä saadut myyntitulot, 80 750 €, ovat korkeampia kuin korvaushyöty sähköän ja lämmön omasta käytöstä, 59 850 €.

Taulukko 5 Investointi- ja kannattavuuslaskelma biokaasulaitosinvestointikustannusten muuttuessa\*

Biokaasulaitoksen investointikustannus	500 000 €		750 000 €		1 000 000 €	
	CHP	metaanin jalostus	CHP	metaanin jalostus	CHP	metaanin jalostus
<b>Muut investointikulut<sup>*)</sup> (€)</b> (esim. maanalaiset putkistot, pihatyöt, työnjohto, luvat)	55 000					
<b>CHP-yksikköinvestointi (€)</b>	150 000	-	150 000	-	150 000	-
<b>Metaaninjalostusinvestointi (€)</b>	-	260 000	-	260 000	-	260 000
<b>Investoinnit yhteensä (€)</b>	705 000	815 000	955 000	1 065 000	1 205 000	1 315 000
<b>Korvaushyöty sähköän ja lämmön omasta käytöstä (€)</b>	59 850	120	59 850	120	59 850	120
<b>Biometaanin myyntitulo (€)</b>	-	80 750	-	80 750	-	80 750
<b>Mädätteen lannoitusarvo<sup>*)</sup> (€)</b>	2 600					
<b>Vuotuiset tuotot yhteensä (€)</b>	62 450	83 510	62 450	83 510	62 450	83 510
<b>Syötteiden kuormaus ja kuljetus (€)</b>	5 000					

jatkuu

jatkuu						
<b>Vuotuiset kokonais-käyttökustannukset<sup>*)</sup> (€)</b> (sis. syötteen kuormauksen sekä mm. vakuutus 0,5 % investointihinnasta)	31 160	42 510	34 910	46 260	38 660	50 010
<b>Kate (€)</b>	30 410	41 000	27 580	37 250	23 830	33 500 €
<b>TEM:n energiatuki</b>	30 %					
<b>Annuiteetti energiatuki huomioiden (€)</b>	-44 600	-52 940	-57 500	-65 820	-70 375	-78 690
<b>Tulos energiatuki huomioiden (€)</b>	-13 300	-11 940	-29 900	-28 570	-46 540	-45 200
<b>Takaisinmaksuaika energiatuki huomioiden (vuosi)</b>	15,8	13,9	24,2	20,0	35,4	27,5
<b>Takaisinmaksuaika ilman energiatukea (vuosi)</b>	22,5	19,9	34,6	28,6	50,1	39,2

\* Biokaasulaskurin oletusarvot

## 10 Johtopäätökset

Tämän selvitystyön tarkoituksena oli kartoittaa Viikin koetilalle rakennettavan biokaasulaitoksen toimintaedellytyksiä. Selvityksen pääkohteena olivat saatavilla olevat biokaasutuotantoon soveltuvat syötteen ja tuotetun biokaasun hyödyntäminen. Lisäksi selvitettiin biokaasutuotannon eri prosessivaihtoehtoja ja tehtiin kannattavuustarkastelua Biokaasulaskuri-ohjelmalla.

Viikin koetilan omien syötteen, eli naudan lietelannan, naudan kuivikelannan, ylijäämäsilörehun, nurmen ja oljen, sekä Helsingin yliopiston Viikin kampuksen hevossairaalan hevosen kuivikelannan syötemäärät ovat melko pieniä, mikä tekee biokaasulaitoksesta kannattamattoman. Sen vuoksi kartoitettiin lähiseudulla muodostuvaa biokaasutuotantoon soveltuvaa biomassaa sekä elintarviketeollisuuden sivu- ja jätevirtoja. Biojäte esimerkiksi yliopistoruokaloista jätettiin pois kartoituksesta, koska biojäte saattaa sisältää myös muuta kuin biologisesti hajoavaa materiaalia, kuten muovia ja metallia, ja se saattaa aiheuttaa teknisiä ongelmia biokaasuprosessissa. Lisäksi biojäte vaatii hygienisoinnin ennen mädätystä.

Viikin koetilan omien syötteen lisäksi tulevan biokaasulaitoksen syötteiksi valikoituivat läheisen ratsastuskeskuksen hevosen kuivikelanta, Helsingin Vanhankaupunginlahdesta



kesäisin niitettävä järviruoko sekä Viikin koetilan läheisyyteen vuonna 2021 muuttavan pienpanimon olutmäski. Ruokaviraston mukaan mäski lasketaan jätteeksi, muut syötteen rinnastetaan maatilán syötteiksi. Mäskin käyttö syötteenä tarkoittaa sitä, että biokaasulaitokselle on haettava Ruokaviraston laitoshyväksyntä. Mäskin hygienisointia ei kuitenkaan tarvita, koska mäski on kuumennettu oluenvalmistussuorussissa. Tämän vuoksi biokaasulaitukseen ei tarvitse rakennuttaa hygienisointiyksikköä. Mäski voidaan haluttaessa jättää pois syötteseoksesta, eikä sillä ole juurikaan vaikutusta syöteseoksen vuotuiseen massamäärään tai metaanituottopotentiaaliin. Mikäli pienpanimo maksaa ns. porttimaksua mäskin vastaanottamisesta biokaasulaitukseen, mäski kannattaa ottaa mukaan syöteseokseen. Ilman porttimaksua mäskistä tuotetun biokaasun hyödyntäminen ei todennäköisesti kompensoi mäskin kuormaukseen ja kuljetukseen tai laitoshyväksyntään liittyviä kustannuksia. Toisaalta mäskin metaanituottopotentiaali on lähes kaksinkertainen järviruokoon verrattuna ja yli tuplasti parempi kuin olkiohjaisen hevosenkuivikelannan metaanituottopotentiaali, joten porttimaksullisena syötteenä kaikki saatavilla oleva mäski kannattaa ottaa vastaan.

Syöteseoksen kuiva-ainepitoisuus on noin 25 %, ja se vaikuttaa oleellisesti biokaasulaitoksen prosessiteknikkaan. Kaikissa tarjotuissa biokaasulaitoksissa oli otettu huomioon korkea kuiva-ainepitoisuus ja runsas, hitaasti hajoava kasviperäinen biomassa. Ainoa merkittävä tekninen ero laitosten välillä on se, että kuivamädätyslaitoksessa lietelannasta voidaan mädättää vain kuivajae ja nestejae on käsiteltävä jotenkin muutoin. Lisäksi kuivamädätyslaitos tarvitsee suuremman pinta-alan, joten biokaasulaitoshankkeessa on otettava huomioon myös laitoksen sijoittelu tontille. Mikäli tilaa ei ole, kuivamädätyslaitosta ei voida perustaa. Panostoimisen kuivamädätyslaitoksen kohdalla on todennäköisesti otettava huomioon myös mahdollinen biokaasuntuoton laadullinen ja määrällinen epätasaisuus. Tasainen kaasuntuotto on todennäköisesti toivottavaa varsinkin, jos kaasu halutaan jalostaa metaaniksi ja myydä se kaasunjakeluverkkoon.

Koska kaikki biokaasuprosessivaihtoehdot ovat soveltuvia Viikin koetilan tarpeisiin, valinta niiden välillä voitaneen tehdä ennemminkin käyttömukavuuden, henkilöresursoinnin sekä mahdollisen opetuksellisen ja tutkimuksellisen näkökulman kuin teknisen soveltuvuuden perusteella. Lisäksi ainakin kiinto- ja kuivamädätykseen perustuvien biokaasulaitosten investointikustannus on todennäköisesti kohtuullinen, koska kiintomädätyslaitos sisältää

vain yhden mädätysreaktorin. Kuivamädätyslaitoksessa taas tekniikka on yksinkertainen, vaikka mädätysreaktoreita onkin vähintään kaksi.

Kaksivaiheisen biokaasulaitoksen hinta on todennäköisesti korkeampi, koska laitoksessa on sekä tulppavirtaus- että märkämädätysreaktori. Ongelmaksi saattaa muodostua myös laitoksen sijoittelu tontille. Mikäli tilaa ei ole, ko. laitosta ei voida perustaa. Kaksivaiheinen biokaasulaitoksen perustaminen saattaa kuitenkin olla Helsingin yliopiston opetus- ja tutkimustyön kannalta perusteltu vaihtoehto, vaikka investointikustannukset olisivatkin muita vaihtoehtoja korkeammat.

Biokaasulaitoksen tuottama biokaasu kannattaa jalostaa metaaniksi ja myydä metaani joko kaasunjakelun erillisverkkoon tai liikennemetaaniksi liikennepolttoaineiden jakelijalle, mikäli jalostetun biokaasun myyntihinta on korkeampi kuin korvaushyöty sähkön ja lämmön tuotannosta CHP-yksikössä. Oma tankkausasema olisi mahdollisesti kannattavin vaihtoehto, mutta sellaisen operointi Viikin koetilan alueella olisi todennäköisesti liikenteellisesti hankala.

Metaanin siirtämistä Viikin alueen maakaasuverkkoon pyrittiin selvittämään tässä opinnäytetyössä. Toistaiseksi Suomessa ei ole yhtään maatilamittaluokan biokaasulaitosta, joka syöttäisi tuottamansa metaanin kaasunjakeluverkkoon (kaasunjakeluyritys, henkilökohtainen tiedonanto 7.12.2020). Tämän vuoksi ei ole olemassa toimintamallia, miten pienen biokaasulaitoksen metaani siirretään kaasunjakeluverkkoon taloudellisesti kannattavalla tavalla. Koska kysyntä hiilineutraalille metaanille on suurta, maatilamittaluokan biokaasulaitosten metaanin syöttämistä kaasunjakeluverkkoon kannattaisi edistää. Tällä hetkellä ongelmana ovat tiukat puhtaus- ja lämpöarvokriteerit verkkoon syötettävälle biometaanille, minkä vuoksi on investoitava kalliisiin biokaasunjalostus- ja laaduntarkkailuyksiköihin. Investointi on liian kallis pienille biokaasulaitoksille. Helsingin Viikin alueelle olisi ehkä mahdollista perustaa erilliskaasuverkko, jossa metaanin puhtaus- ja lämpöarvokriteerit olisivat tavallista kaasunjakeluverkkoa löysemmät ja silloin biokaasunjalostus- ja laaduntarkkailuyksiköiden laiteinvestoinnit olisivat todennäköisesti kohtuulliset. Viikin koetilan biokaasulaitos toimittaisi biometaanin erillisverkkoon.

Biokaasulaskurin investointi- ja kannattavuuslaskelman perusteella biokaasulaitoksesta ei todennäköisesti tulisi kannattava, vaikka investointiin saataisiinkin Työ- ja elinkeinoministeriön energiatukea 30 % investointikustannuksista. Takaisinmaksuaikaan vaikuttaisi olennaisesti energiatuen lisäksi biokaasulaitoksen investointikustannus. Jos biokaasulaitos maksaisi puoli miljoonaa euroa, takaisinmaksuaika energiatuki huomioiden olisi noin 14 vuotta, jos biokaasu jalostettaisiin metaaniksi, ja noin 16 vuotta, jos biokaasusta tuotettaisiin sähköä ja lämpöä omaan käyttöön. Ilman energiatukea takaisinmaksuaika olisi noin kuusi vuotta pidempi. Miljoonan euron laitoksen takaisinmaksuaika energiatuki huomioiden venyisi lähes 28 vuoteen, kun biokaasu jalostettaisiin metaaniksi, ja noin 35 vuoteen, jos biokaasusta tuotettaisiin sähköä ja lämpöä omaan käyttöön. Jotta takaisinmaksuaika olisi kohtuullinen, biokaasulaitos tulisi maksaa noin 500 000–750 000 euroa, jolloin investoinnin kokonaiskustannukset olisivat enintään noin miljoona euroa. Tällöin takaisinmaksuaika energiatuki huomioiden olisi alle 25 vuotta.

Biokaasulaitoksen tuottaman mädätteen voi levittää peltoon. Kun mädäte separoidaan neste- ja kuivajakeeksi, nestejake voidaan levittää niille pelloille, jotka tarvitsevat typpilannoitetta, ja kuivajake voidaan levittää pelloille, joissa on pulaa fosforista. Viikin koetilalla olisi halua kokeilla mädätteen käyttöä myös eläinten kuivikkeena. Mädätysprosessissa orgaaninen aines hajoaa tehokkaasti ja jäljelle jäävä mädäte saattaa olla liian hienojakoista kuivikkeeksi. Hienojakoinen kuivike kastuessaan muodostaa savimaisen massan, jonka käsittely navetassa voi olla hankalaa. Panostoimisessa kuivämädätyslaitoksessa syötemassaa ei käsitellä mitenkään ennen biokaasuprosessia tai sen aikana, joten syötemassa saattaa pysyä paremmin suurijakoisena. Tällainen mädäte saattaisi toimia paremmin kuivikkeena kuin märkämädätysreaktorin mädäte.

Tässä selvitystyössä jätettiin huomiotta mahdollisuus myydä metaani liikennepolttoaineeksi omalta tankkausasemalta, koska tankkausasemaa on todennäköisesti hankala sijoittaa koetilan läheisyyteen. Tätä vaihtoehtoa kannattanee myöhemmin vielä selvittää, mikäli metaanin syöttö kaasunjakeluverkkoon ei onnistu. Biokaasulaskurin mukaan biokaasulaitosten kannattavuus yleensä paranee, jos jalostettu metaani voidaan myydä omalta tankkausasemalta liikennepolttoaineeksi. Tankkausaseman paikka Viikin alueella voisi kartoittaa koetilan ulkopuolelta. Pienpanimo perustanee panimolle ravintolan ja ison terassin. Tankkausaseman siirtäminen esimerkiksi panimon pihaan voisi hyödyttää sekä

panimoa että Viikin koetilaa: samalla kun kävisi panimoravintolassa, auton voisi tankata. Jos metaani tuotaisiin tankkausasemalle konteissa, osa metaanista voitaisiin paineistaa myös pieniin kaasupulloihin ja myydä niitä grillaukseen. Mikä olisikaan trendikkäämpää kuin sanoa paistaneensa pihvejä Viikin lehmien lannalla!

## Lähteet

- Biovoima Oy. (2019a). *Biovoima - ratkaisumme*. Haettu osoitteesta <https://biovoima.com/>
- Biovoima Oy. (2019b). *Kaasunjalostusyksikkö*. Haettu osoitteesta <https://biovoima.com/ratkaisut/kaasunjalostusyksikko>
- Bryggeri Helsinki. (n.d.). *Panimoravintola Bryggeri Helsinki valmistaa oluensa suomalaisella biokaasulla*. Haettu osoitteesta <https://bryggeri.fi/biokaasu/>
- Business Finland. (n.d.). *Energiatuki*. <https://www.businessfinland.fi/energiatuki>
- Demeca Oy. (2020a). *Biokaasu – Demeca maatilan biokaasulaitos*. Haettu osoitteesta <https://demeca.fi/biokaasu/>
- Demeca Oy. (2020b). *Demeca biokaasulaitokset hinnasto*. Haettu osoitteesta <https://demeca.fi/biokaasulaitoshinnasto/>
- Doranova Oy. (n.d.a). *Biokaasulaitokset*. Haettu osoitteesta <https://www.doranova.fi/biokaasulaitokset/>
- Doranova Oy. (n.d.b). *Suomen suurin pelkästään maatalouden lantoja ja sivuvirtoja käsittelevä biokaasulaitos*. Haettu osoitteesta <https://www.doranova.fi/referenssit/suomen-suurin-pelkastaan-maatalouden-lantoja-ja-sivuvirtoja-kasitteleva-biokaasulaitos/>
- EcoProtech Oy. (n.d.a). *EcPorotech - Teollisuus*. Haettu osoitteesta <https://ecoprotech.fi/toimialat/teollisuus/>
- EcoProtech Oy. (n.d.b). *EcoProtech - Maatalous*. Haettu osoitteesta <https://ecoprotech.fi/toimialat/maatalous/>
- EcoProtech Oy. (n.d.c). *EcoProtech EPAD-prosessi*. Haettu osoitteesta <https://ecoprotech.fi/ratkaisut/biokaasun-tuotanto/ecoprotech-epad-prosessi/>
- Envitecpolis Oy. (n.d.). *Envitecpolis, enemmän asiakkaalle*. Haettu osoitteesta <https://envitecpolis.fi/>
- Espacenet. (2018). *Patenttihaaku: Biogas reactor, Tunnistetiedot: FI20175547 (A1) — 2018-12-14*. [https://fi.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=fi\\_FI&FT=D&date=20181214&CC=FI&NR=20175547A1&KC=A1](https://fi.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=fi_FI&FT=D&date=20181214&CC=FI&NR=20175547A1&KC=A1)
- Frontelius, L. (2018). *Lietteestä separoitu kuivajae kuivikkeena*. Haettu osoitteesta [http://separointi.fi/wp-content/uploads/2018/02/14-frondelius\\_lietteen-kuivajakeen-kaytto.pdf](http://separointi.fi/wp-content/uploads/2018/02/14-frondelius_lietteen-kuivajakeen-kaytto.pdf)

- Hadin, Å. (2016). *Anaerobic digestion of horse manure - renewable energy and plant nutrients in a systems perspective*. (Studies in the research profile built environment Licentiate thesis No. 2) [Lisensiaattityö University of Gävle]. <http://hig.diva-portal.org/smash/get/diva2:1045332/FULLTEXT02.pdf>
- Helen Oy. (2020). *Kaukolämmön hinnat*. Haettu osoitteesta <https://www.helen.fi/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/hinnat>
- Helsingin yliopisto. (29. 10 2020a). *Viikin opetus- ja tutkimustila/ Palvelut*. Haettu osoitteesta <https://www.helsinki.fi/fi/infrastruktuurit/viikin-opetus-ja-tutkimustila/palvelut>
- Helsingin yliopisto. (2020b). *Viikin opetus- ja tutkimustila, Suomen urbaanein maatila keskellä Helsinkiä*. Haettu osoitteesta <https://www.helsinki.fi/fi/infrastruktuurit/viikin-opetus-ja-tutkimustila>
- Jeppo Biogas Ab. (n.d.). *Jepun biokaasu, Uusiutuva energiaa pitkälle tulevaisuuteen*. Haettu osoitteesta <https://jeppobiogas.fi/>
- Kinnunen, V. & Rintala, J. (2015). Biokaasualan monet mahdollisuudet. Teoksessa M. Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.), *Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 9-20). Hämeen ammattikorkeakoulu.
- Kymäläinen, M. (2015a). Anaerobinen hajoaminen ja sen hallinta biokaasureaktorissa. Teoksessa M. Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.), *Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 59-81). Hämeen ammattikorkeakoulu.
- Kymäläinen, M. (2015b). Anaerobinen hajoaminen ja sen hallinta biokaasureaktorissa. Teoksessa M. Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.), *Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 59-81). Hämeen ammattikorkeakoulu.
- Kymäläinen, M. & Luostarinen, S. (2015). Biokaasutuotannon raaka-aineet. Teoksessa M. Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.), *Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 21-47). Hämeen ammatikorkeakoulu.
- Laki eläimistä saatavista sivutuotteista 517/2015.  
<https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2015/20150517>
- Laki vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuudesta 390/2005.  
<https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2005/20050390>

Laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä 252/2017.

<https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2017/20170252>

Lampinen, A. & Rautio, E. (2015). Biokaasun käsittely ja hyödyntäminen. Teoksessa M.

Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.), *Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 124-172). Hämeen ammattikorkeakoulu.

Lannoitevalmistelaki 539/2006. <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2006/20060539>

Leach, K. A., Archer, S. C., Breen, J. E., Green, M. J., Ohnstad, I. C., Tuer, S. & Bradley, A. J.

(2015). Recycling manure as cow bedding: Potential benefits and risks for UK dairy farms. *The Veterinary Journal*, Volume 206, Pages 123-130.

<https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2015.08.013>

Luke. (n.d.). *Biokaasulaskuri v 1.0.0*. <https://maatalousinfo.luke.fi/fi/laskurit/biogas>

Lunden, K. & Niittymaa, V. (30.10.2020). Kiteeläinen biokaasulaitosten toimittaja ylsi kunnan

loikkaan. *Maaseudun tulevaisuus*, s. 8.

Luostarinen, S. (2015). Biokaasuprosessit ja laitostaseet. Teoksessa M. Kymäläinen & O.

Pakarinen (toim.), *Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 82-93). Hämeen ammattikorkeakoulu.

Maa- ja metsätalousministeriö. (n.d.). *Maatalous uusiutuvan energian tuottajana ja*

*käyttäjänä*. Haettu osoitteesta <https://mmm.fi/ruoka-ja-maatalous/biokaasu>

Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999. <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>

Maanosaja. (9.10.2017). *Kaasua maatilalta - Osa 1* [video]. YouTube.

<https://www.youtube.com/watch?v=ILUtfMm0jhE>

Metener Oy. (2017). *Biokaasulaitokset*. Haettu osoitteesta

<http://www.metener.fi/biokaasulaitokset/>

Metener Oy. (n.d.). *Biokaasun jalostus vesiabsorptiolla*. Haettu osoitteesta

[http://www.metener.fi/wp-content/uploads/2019/05/jalostus\\_10\\_10\\_18-1.pdf](http://www.metener.fi/wp-content/uploads/2019/05/jalostus_10_10_18-1.pdf)

Micolucci, F., Gottardo, M., Pavan, P., Cavinato, C. & Bolzonella, D. (2018). Pilot scale

comparison of single and double-stage thermophilic anaerobic digestion of food waste. *Journal of Cleaner Production* Volume 171, Pages 1376-1385.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.080>

Motiva. (2013). *Biokaasun tuotanto maatilalla*.

[https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun\\_tuotanto\\_maatilalla.pdf](https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf)

MTK. (n.d.). *Ympäristölupa- ja ilmoitusmenettely*. <https://www.mtk.fi/ymparistoluvat>

- Mutikainen, M., Sormunen, K., Paavola, H., Haikonen, T. & Väisänen, M. (2016). *Biokaasusta kasvua, Biokaasuliiketoiminnan ekosysteemien mahdollisuudet. Sitran selvityksiä 111.*  
<https://media.sitra.fi/2017/02/27175150/Selvityksia111-2.pdf>
- Myllärinen, A. (2020). *Millainen sekoitus biokaasureaktoriin?* Haettu osoitteesta  
<https://www.doranova.fi/millainen-sekoitus-biokaasureaktoriin/>
- Nivos. (n.d.). *Otamme vastaan hevosenlanta - teemme siitä luomubiokaasua!* Haettu osoitteesta <https://www.nivos.fi/biokaasu/otamme-vastaan-hevosenlanta/otamme-vastaan-hevosenlanta-teemme-siita-luomubiokaasua>
- Paavola, T. & Kapuinen, P. (2015). Mädätysjäännöksen käsittely ja hyödyntäminen. Teoksessa M. Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.), *Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 94-123). Hämeen ammattikorkeakoulu.
- Pelaez-Samaniego, M. R., Hummel, R. L., Liao, W., Ma, J., Jensen, J., Kruger, C. & Frear, C. (2017). Approaches for adding value to anaerobically digested dairy fiber. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 72, Pages 254-268.*  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.054>
- Pramarik, S., Suja, F., Zain, A. & Pramarik, B. (2019). The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospecta and constraints. *Bioresource Technology Reports, Volume 8 December 2019.*  
<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100310>
- ProAgria Pohjois-Karjala. (n.d). *Näin biokaasulaitos toimii. Biokaasulaitoksen luvitus. Tietokortti 4. Liikennebiokaasua energiailoilta -hanke.*  
[https://www.proagria.fi/sites/default/files/attachment/lbk\\_tietokortti\\_4.pdf](https://www.proagria.fi/sites/default/files/attachment/lbk_tietokortti_4.pdf)
- Rajendran, K., Mahapatra, K., Venkatesh Venkatraman, A., Muthuswamy, S. & Pugazhendhi, A. (2020). Advancing anaerobic digestion through two-stage processes: Current developments and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 123.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109746>
- Ravinnerenki ja Lantalogistiikka -hankkeet. (2019). *Lanta liikkeelle ja ravinteet kierto.*  
[https://ravinnerenki.savonia.fi/images/Tulosjulkaisu\\_final.pdf](https://ravinnerenki.savonia.fi/images/Tulosjulkaisu_final.pdf)
- Ruokavirasto. (1.2.2019a). *Laitoshyväksyntä.* <https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/rehu--ja-lannoiteala/lannoitevalmisteet/lannoitelan-toiminta/laitoshyvaksynta/>



Ruokavirasto. (2019b). *Maatalouden investointituet*.

<https://www.ruokavirasto.fi/viljelijat/tuet-ja-rahoitus/maatalouden-investointituet/>

Ruokavirasto. (2020). *Lannoitealan toiminto, Hinnasto*. Haettu osoitteesta

<https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/rehu-ja->

[lannoiteala/lannoitevalmisteet/lannoitelan-toiminta/hinnasto/](https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/rehu-ja-lannoiteala/lannoitevalmisteet/lannoitelan-toiminta/hinnasto/)

Ruokavirasto. (14.4.2020). *Sivutuotteiden luokittelu*.

<https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/elainala/elaimista-saatavat->

[sivutuotteet/sivutuotteiden-luokittelu/](https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/elainala/elaimista-saatavat-sivutuotteet/sivutuotteiden-luokittelu/)

Ruokavirasto. (2020). *Sivutuotteiden luokittelu*.

<https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/elainala/elaimista-saatavat->

[sivutuotteet/sivutuotteiden-luokittelu/](https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/elainala/elaimista-saatavat-sivutuotteet/sivutuotteiden-luokittelu/)

Saalasti, M. & Paavola, T. (2015). Lainsäädäntö ja toiminnan vaatimat luvat. Teoksessa M.

Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.), *Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 181-188). Hämeen ammattikorkeakoulu.

SFS-EN 16726:2015 + A1:2018. (2018). *Kaasuputkistot. Kaasun laatu. Alaryhmä H*. SFS

Online.

Snellman Oy Ab. (2019). *Kohta voit tankata autoosi biokaasua Snellmanilla: "Jos emme anna ihmisille vaihtoehtoja, ei tapahdu myöskään muutosta"*. Haettu osoitteesta

<https://snellman.fi/fi/uutiset/kohta-voit-tankata-autoosi-biokaasua-snellmanilla-jos-emme-anna-ihmisille-vaihtoehtoja-ei-tapahdu-myoskaan-muutosta/>

Srisowmeya, G., Chakravarthy, M. & Nandhini Devi, G. (2020). Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 119*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109587>

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109587>

Suomen Kaasuenergia Oy. (2020). *Hinnasto taloyhtiöille*. Haettu osoitteesta

<https://suomenkaasuenergia.fi/wp-content/uploads/2019/12/Kotikokki-2-1.1.2020.pdf>

Suomen ympäristökeskus. (2018). *Ravinteet*. Haettu osoitteesta <https://www.syke.fi/fi->

[Biokaasulaitoksesta ravinteita energiaa ja elinkeinoimintaa maaseudulle BioRaEE/Biokaasun kaytto/Ravinteet](https://www.syke.fi/fi-Biokaasulaitoksesta-ravinteita-energiaa-ja-elinkeinoimintaa-maaseudulle-BioRaEE/Biokaasun-kaytto/Ravinteet)

Taavo, T. (2013). *Lehmänlannan hygienisoituminen kompostoinnissa*. [opinnäytetyö, Hämeen ammattikorkeakoulu]

- [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/61504/taija\\_taaivo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/61504/taija_taaivo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Tukes. (n.d.). *Räjähdyksvaaralliset tilat*. <https://tukes.fi/teollisuus/rajahdysvaaralliset-tilat#980b7ff3>
- Työ- ja elinkeinoministeriö. (n.d.). *Energiatuki*. <https://tem.fi/energiatuki>
- Työterveyslaitos. (2017). *OVA-ohje: HIILIDIOKSIDI*. <https://www.ttl.fi/ova/hiilidioksidi.html>
- Valtioneuvosto. (2019). *Fossiilittoman liikenteen tiekartta, LVM050:00/2019 KEHITTÄMINEN*.  
Haettu osoitteesta <https://valtioneuvosto.fi/hanke?tunnus=LVM050:00/2019>
- Valtioneuvoston asetus eräiden maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien päästöjen rajoittamisesta 1250/2014. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20141250>
- Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin valvonnasta 685/2015. <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2015/20150685>
- Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta 713/2014.  
<https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140713>
- Vitie, M.-L. (2009). *Biokaasua järvikasveista. Rehevöityneiden järvien niittojätteen metaanintuottopotentiali* [opinnäytetyö, Lahden ammattikorkeakoulu].  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-200904172043>
- Watrec Oy. (n.d.a). *Watrec - Kokonaisvaltaista palvelua*. Haettu osoitteesta  
<https://watrec.fi/ratkaisut/uudet-laitokset/>
- Watrec Oy. (n.d.b). *Watrec, Referenssit*. Haettu osoitteesta <https://watrec.fi/referenssit/>
- Watrec Oy. (n.d.c). *Watrec - Olemassaolevat laitokset*. Haettu osoitteesta  
<https://watrec.fi/ratkaisut/olemassaolevat-laitokset/>
- Wellinger, A., Murphy, J. & Baxter, D. (2013). *The biogas handbook : science, production and applications*. Woodhead Publishing.
- Ympäristöministeriö. (2020). *Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035. Päivitetty 16.6.2020*. Haettu osoitteesta [https://www.ymp.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto\\_ja\\_ilma/Hiilineutraali\\_Suomi\\_2035](https://www.ymp.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Hiilineutraali_Suomi_2035)
- Ympäristönsuojelulaki 527/2014. <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140527>
- Yu, Q., Liu, R., Li, K. & Ma, R. (2019). A review of crop straw pretreatment methods for biogas production by anaerobic digestion in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 17, Pages 51-58*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.020>