

TERMOFIILINEN KUIVAMÄDÄTYSLAITOS

Prosessin toimintaedellytykset ja hallinta



Ylemmän ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Hämeenlinnan korkeakoulukeskus, Biotalousliiketoiminnan kehittäminen

Kevät, 2021

Sanna Tuomi

Biotalousliiketoiminnan kehittäminen, YAMK
Hämeenlinnan korkeakoulukeskus

Tekijä	Sanna Tuomi	Vuosi 2021
Työn nimi	Termofiilinen kuivamädätyslaitos - Prosessin toimintaedellytykset ja hallinta	
Työn ohjaaja	Maritta Kymäläinen	

TIIVISTELMÄ

Biokaasutuotannon lisääminen anaerobisella mädätysmenetelmällä on yksi keino ratkaista globaaleja kestävyysongelmia. Erityisesti korkean kuiva-ainepitoisuuden biomassossa on paljon käyttämätöntä potentiaalia, mutta näiden hyödyntäminen edellyttää uusien, korkean kuiva-ainepitoisuuden syötteille soveltuvien menetelmien kehittämistä.

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja oli biokaasulaitosratkaisuja toimittava Doranova Oy. Yritys oli tämän työn aloitusvaiheessa rakentamassa Uuteenkaarlepyyhyn Jepualle jatkuvatoimista termofiilistä kuivamädätyslaitosta. Työn tavoitteena oli selvittää kuivamädätysprosessin toimintaedellytykset ja prosessihallinnan keinot, sekä näiden perusteella laatia biokaasuprosessin ylösajo- ja seurantasuunnitelma uudelle laitokselle. Teoreettisen ylösajo- ja seurantasuunnitelman pohjalta laadittiin hallinta- ja seurantatyökaluiksi excel-laskentataulukot prosessin ja sen ylösajon mallintamiseksi ja seuraamiseksi. Laskentataulukot on laadittu siten, että niitä voidaan hyödyntää myös muiden prosessien hallinnassa. Seurantatyökalut sisältävät myös näytteenottosuunnitelman, alustavat viitearvot seurattaville parametreille sekä yhteenvedon mahdollisista häiriöiden syistä ja prosessitasapainon palauttamiseksi tehtävistä toimenpiteistä.

Keskeisenä havaintona laskelmista kävi ilmi, että tässä tarkastelluilla syötteillä ammoniakki-inhibition vaara on termofiilisessä prosessissa ilmeinen. Termofiilisen lämpötilan lisäksi korkea pH nostaa inhiboivan ammoniakki-muotoisen (NH₃) typen pitoisuutta. Korkean typpipitoisuuden syötteillä ammoniakkipitoisuuden pitäminen siedettävällä tasolla saattaa olla haastavaa.

Avainsanat biokaasu, termofiilinen kuivamädätys, prosessin hallinta, ylösajo

Sivut 134 sivua, joista liitteitä 7 sivua

Degree Programme in Bioeconomy Business Development
Hämeenlinna University Centre

Author	Sanna Tuomi	Year 2021
Subject	Dry thermophilic anaerobic digestion plant - Operating conditions and process control means	
Supervisors	Maritta Kymäläinen	

ABSTRACT

Increasing biogas production by anaerobic digestion is one way to solve global sustainability problems. There is a lot of untapped potential especially in dry matter biomass, but the exploitation of these requires the development of new methods for high dry matter feeds.

This thesis was commissioned by Doranova Oy, which supplies biogas plant solutions. The company was in the early stages of this work, building a continuous thermophilic dry digestion facility in Uusikaarlepyy in Jepua. The aim of the work was to find out the operating conditions and process control means of the dry digestion process, and on the basis of these the start-up and monitoring plan of the biogas process for the new plant. On the basis of the theoretical start-up and monitoring plan, excel sheets were developed as a management and monitoring tool to model and monitor the process and its start-up. Spreadsheets have been prepared so that they can also be used to manage other processes. Monitoring tools also include a sampling plan, preliminary reference values for the parameters to be monitored and a summary of possible causes of disturbances and measures to restore process equilibrium.

The calculations showed that the risk of the ammonia inhibition feeds considered is obvious in the thermophilic process. In addition to thermophilic temperatures, high pH increases the concentration of inhibitory ammonia nitrogen (NH₃). With high nitrogen content, keeping the ammonia content at a tolerable level can be challenging.

Keywords biogas, thermophilic dry digestion, process control, start-up

Pages 134 pages including appendices 7 pages

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	BIOKAASUTUOTANNON YHTEISKUNNALLISET VAIKUTUKSET SUOMESSA	2
2.1	Perustietoa biokaasusta.....	2
2.2	Biokaasutuotannon merkitys kestävyysvajeeseen	3
2.2.1	Jätteidenkäsittely.....	3
2.2.2	Ravinnekierto.....	4
2.2.3	Energiatuotanto.....	6
2.3	Biokaasun tulevaisuus Suomessa	7
2.3.1	Biokaasutuotannon kehitys	7
2.3.2	Kaasu tieliikennekäytössä.....	8
3	TYÖN TARKOITUS JA TUTKIMUSKYSYMYKSET	9
4	BIOKAASUN TUOTANTO MÄDÄTTÄMÄLLÄ	10
4.1	Anaerobinen hajoaminen.....	12
4.2	Anaerobisen hajoamisprosessin mikrobisto	13
4.3	Anaerobisen hajoamisen vaiheet.....	15
4.3.1	Hydrolyysi	16
4.3.2	Asidogeneesi eli fermentaatio.....	17
4.3.3	Asetogeneesi eli anaerobinen hapettuminen	18
4.3.4	Metanogeneesi.....	19
4.4	Prosessin luokittelu toimintaperiaatteen mukaisesti	20
4.4.1	Kuiva- ja märkämädätys	20
4.4.2	Panostoinen prosessi ja jatkuvatoiminen prosessi	21
4.4.3	Yksi- ja kaksivaiheiset prosessit.....	23
4.4.4	Meso- ja termofiilinen prosessi.....	23
4.5	Biokaasutuotannon syötteen.....	24
4.5.1	Puhdistamolietteen.....	25
4.5.2	Lannat	26
4.5.3	Maatalouden kasvibiomassat ja energiakasvit	27
4.5.4	Yhdyskuntabiojätteet	28
4.5.5	Teollisuuden sivuvirrat ja jätevedet	29
4.5.6	Syötteiden saatavuus ja potentiaali	29
4.5.7	Syötteiden yhteiskäsittely	32
4.5.8	Syötteiden esikäsittely.....	34
4.6	Prosessin toimintaedellytykset ja inhiboivat tekijät	35
4.6.1	Lämpötila	35
4.6.2	Hiili–typpisuhde.....	37
4.6.3	pH ja alkaliteetti.....	38
4.6.4	Haihtuvat rasvahapot	40
4.6.5	Ammoniumtyppi.....	42
4.6.6	Sulfaatit ja sulfidit.....	45
4.6.7	Pitkaketjuiset rasvahapot	46
4.6.8	Makro- ja mikroravinteet	46

4.6.9	Antibiootit ja desinfiointiaineet	48
4.7	Prosessiolosuhteiden optimointi ja hallinta.....	49
4.7.1	Yleistä syötteiden soveltuvuuden arvioinnista.....	49
4.7.2	Syötteestä tehtävät analyysit	50
4.7.3	Sekoitus	53
4.7.4	Orgaaninen kuormitus.....	54
4.7.5	Viipymäaika	55
4.7.6	Ammoniikki-inhibition hallinta	57
4.7.7	Prosessin ylösajo.....	59
4.7.8	Prosessista seurattavat parametrit	60
4.7.9	Viitearvot	63
4.7.10	Näytteenotto	64
5	TERMOFIILINEN TULPPAVIRTAUSPROSESSI	65
5.1	Kuivamädätyksen kaupallisia reaktoriratkaisuja.....	65
5.1.1	Thöni Industriebetriebe GmbH	65
5.1.2	Eisenmann	66
5.1.3	Hitachi Zosen Inova AG.....	67
5.1.4	STRABAG	67
5.1.5	Doranova	68
5.1.6	Eneferm	69
5.2	Termofiilisen prosessin erityispiirteitä.....	70
5.2.1	Termofiilisen prosessin mikrobisto	71
5.2.2	Termofiilisen prosessin inhibitio	72
5.2.3	Hygienisointikäsitely	73
5.3	Kuivamädätysprosessin tyypillisiä ongelmia	73
6	JEPUAN BIOKAASULAITOS	75
6.1	Yleiskuvaus	75
6.2	Jatkuvatoiminen termofiilinen kuivamädätyslaitos.....	75
6.3	Kuivamädätysprosessin kuvaus.....	76
6.4	Kuivamädätysprosessin laskennallinen tarkastelu	77
6.4.1	Laskelmissa käytetyt oletusarvot	77
6.4.2	Syötteet	78
6.4.3	Syötemäärät ja ominaisuudet	80
6.4.4	Syöteseoksen koostumus	82
6.5	Prosessin kulun ennakointi ja arvioita muuttujien vaikutuksesta	84
6.5.1	Syötekoostumuksen vaikutus prosessiin.....	84
6.5.2	Ammonifikaation ja pH:n vaikutus ammoniakkipitoisuuteen.....	87
6.5.3	Orgaaninen kuormitus ja viipymäaika.....	88
6.5.4	Mädätysjäännöksen kierrätys	89
7	PROSESSIN HALLINTA	90
7.1	Prosessin seurantasuunnitelma	91
7.1.1	Parametrien valinta	91
7.1.2	Näytteenotto	93
7.1.3	Viitearvojen määrittäminen	94
7.1.4	Tulosten tallennus ja seuranta	97
7.1.5	Toimenpiteet viitearvojen ylityksissä	98

7.2	Prosessin ylösajo	100
7.2.1	Ylösajon eteneminen	100
7.2.2	Ymppi	102
7.2.3	Kuormituksen nostaminen	103
7.2.4	Ylösajon näytteenottosuunnitelma	105
7.2.5	Vakaan operointivaiheen saavuttaminen	109
8	PROSESSIN SUUNNITTELU- JA SEURANTATYÖKALUT.....	110
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	112
10	POHDINTA.....	115
	LÄHTEET	117

Liitteet

Liite 1	Syötenäytteiden analyysitulokset
Liite 2	Prosessin mallinnuslaskelmataulukko
Liite 3	Yksinkertaistettu OLR:n ja viipymääjan laskentataulukko
Liite 4	Ylösajon kuormitus- ja syöttölaskentataulukko
Liite 5	Näytteenottosuunnitelma
Liite 6	Analyysien viitearvot ja korjaavat toimenpiteet
Liite 7	Tulosten kirjaustaulukko ja esimerkkejä kuvaajista

1 JOHDANTO

Keskustelu ilmastonmuutoksesta käy vilkkaana, ja 4.11.2016 voimaan tullut Pariisin ilmastosopimus velvoittaa sopimuksen hyväksyneiltä mailta kunnianhimoisia ja ajan myötä kiristyviä toimia päästöjen vähentämiseksi. Tämä aiheuttaa suurta painetta korvata fossiilisia energialähteitä hiilineutraaleilla tai vähäpäästöisillä vaihtoehtoilla. Yksi suuri sektori, joka on perinteisesti ollut yksinomaan fossiilisten polttoaineiden varassa, on liikenne. Edelleen on ratkaisematta tulevaisuuden kulkuvälineiden käyttövoima. Sähköautot yleistyvät vähitellen, mutta akkujen kesto ja niiden raaka-ainesten riittävyyden takaaminen ovat edelleen ratkaisemattomia ongelmia. Bioetanolin tai biodieselin tuotantoon liittyy eettisiä ongelmia, jos polttoaineiden tuottamiseen käytetään ruoantuotantoon hyödynnettävissä olevaa peltopinta-alaa ja jopa ruoaksi kelpaavan materiaalin prosessointia.

Eri puolilla maailmaa jätteet ja niiden riittämätön käsittely aiheuttavat merkittävää haittaa, ja maat ovat kasvavien jätevuorien edessä pakotettuja kehittämään jätehuoltojärjestelmiään. Suomessa jätteen kaatopaikkasijoittamista on rajoitettu lainsäädännöllä, esimerkiksi orgaanisen jätteen kaatopaikkasijoittaminen kiellettiin vuonna 2016. YLE uutisoi syyskuussa 2019, että viisi vuotta sitten vielä 65 % Suomessa syntyvistä jätteistä päättyi kaatopaikalle, mutta nykyisin enää arviolta pari prosenttia. Tehokkailla toimilla jätteen käsittelyyn on siis mahdollista vaikuttaa, mutta edelleen monissa maissa suurin osa jätteistä päättyy käsittelemättöminä kaatopaikoille. Yhtenä viimeisimmistä uutisoinneista on käsitelty Venäjän jätehuolto-ongelmia, missä Moskovan täyttyneen kaatopaikan korvaajaksi on suunniteltu uutta, jättimäistä kaatopaikkaa. Kansalaiset ovat Moskovassa ja myös ympäri maata järjestäneet mielenosoituksia jäteongelman ratkaisemiseksi kestäväällä tavalla.

Energia- ja jätteenkäsittelyongelmien lisäksi ratkaistavana on metaanipäästöjen vähentäminen. Maatalous ja jätesektori tuottavat ilmastoon merkittäviä määriä metaania. Aiemmin kaatopaikkapäästöt ovat Suomessa olleet suuremmat kuin maatalouden päästöt, mutta tilastokeskuksen mukaan kaatopaikkapäästöt ovat vähentyneet sen verran, että nykyisin maatalouden päästöt ovat suuremmat. Metaanipäästöjä voidaan vähentää huomattavasti oikeanlaisella käsittelyllä, joista biokaasutuotanto on yksi potentiaalinen vaihtoehto.

Ympäristön, ja myös maatalouden kannalta ravinteiden tehokkaampi kiertäys nähdään välttämättömänä ravinteiden, erityisesti fosforin riittävyyden turvaamiseksi ja typpilannoitteiden valmistuksen kestäväyyden varmistamiseksi. Biokaasuprosessissa syntyvä mädätysjäännös ja siitä jalostettuja lannoitevalmisteita hyödyntämällä arvokkaat ravinteet saadaan pidettyä kierrossa, kasvien kannalta edullisempaan muotoon prosessoituna. Jos orgaaninen aines hyödynnetään energiana poltossa, menetetään hyödyllisiä

ravinteita. Lisäksi märkä aines haittaa polttoprosessia. Toisaalta ravinteiden käyttö käsittelemättömänä lannan muodossa edesauttaa ravinteiden huuhtoutumista hallitsemattomasti vesistöihin. Myös kompostoinnilla saadaan pidettyä ravinteet kierrossa, mutta silloin menetetään biomassan sisältämä energia.

Anaerobinen mädätys ja siitä talteen kerättävä biokaasu ovat yksi keino ratkoa edellä mainittuja ongelmia. Biokaasun sisältämä metaani on mm. edullisuutensa ja vähäpäästöisyytensä vuoksi erittäin kilpailukykyinen polttoaine liikennevälineissä, mutta käytön yleistymisen esteenä on vielä ongelmia, kuten liian harva jakeluverkosto. Biokaasu käy lähteeksi myös sähkön ja lämmön tuotantoon. Biokaasutuotannolla saadaan vähennettyä myös maatalouden ilmastovaikutuksia keräämällä syntyvä metaani hyötykäyttöön, jolloin se ei vapaudu ilmakehään.

Biokaasutuotanto on monesta näkökulmasta merkittävä keino vähentää maailmanlaajuisia kestävyysongelmia, ja uusien teknologioiden kehittäminen edesauttaa näiden ongelmien ratkaisemista. Niin valtiot kuin yrityksetkin voivat aktiivisella kehitystyöllä auttaa saavuttamaan kestävyystavoitteet, mutta lisäksi uusilla ratkaisuilla voidaan saavuttaa merkittävää taloudellista etua. Uusien menetelmien kehittämisessä yhtenä tavoitteena on saada erilaiset biomassat tehokkaammin hyödynnettyä. Erityisesti runsaasti saatavilla olevien peltobiomassojen ja muiden kuivamädätykseen soveltuvien syötteiden käsittelyä voitaisiin lisätä uusilla teknologioilla.

2 BIOKAASUTUOTANNON YHTEISKUNNALLISET VAIKUTUKSET SUOMESSA

2.1 Perustietoa biokaasusta

Biokaasu on energiapitoinen kaasuseos, jota muodostuu orgaanisen aineksen hajotessa hapettomissa olosuhteissa eli mädätysprosessissa. Biokaasu koostuu pääasiassa metaanista (50–75 %) ja hiilidioksidista (25–50 %), mutta sisältää lisäksi pieniä määriä monia muita aineita, kuten vettä, happea ja rikkivetyä. (Da Costa Gomez, 2013, s. 2) Biokaasua muodostuu luonnossa mm. soilla ja eläinten ruoansulatuskanavissa, mutta sitä voidaan tuottaa myös tarkoituksellisesti biokaasulaitoksissa. Lisäksi kaasua muodostuu ihmisten toiminnan seurauksena mm. kaatopaikoilla.

Biokaasun sisältämä energia on sitoutuneena metaaniin (CH₄). Kuutio (m³) metaania sisältää energiaa 10 kWh eli 36 MJ. Kevyeen polttoöljyyn rinnastettuna litra öljyä sisältää saman energiamäärän kuin kuutio metaania. Biokaasun energiasisältö saadaan laskettua, kun tiedetään biokaasun metaanipitoisuus. (Kymäläinen & Luostarinen, 2015, ss. 32, 36)

Metaani on voimakas kasvihuonekaasu, 20–70 kertaa hiilidioksidia voimakkaampi, mutta sillä ei ole muita haitallisia vaikutuksia ympäristöön (Lampinen, 2015a, s. 136). Palaessa metaanista muodostuu hiilidioksidia ja vettä, jolloin sen kasvihuonevaikutus vähenee huomattavasti.

Biokaasua voi polttaa sellaisenaan, mutta käytännössä biokaasu puhdistetaan epäpuhtauksista ennen käyttöä. Terveydelle tai ympäristölle vaarallisia, tai laitteistoille haitallisia, puhdistuksessa poistettavia aineita ovat mm. ammoniakki, rikkiyhdisteet ja halogenoidut hiilivedyt. Sen sijaan hiilidioksidi ja typpi ovat inerttejä kaasuja, eivätkä ne häiritse polttoa tai aiheuta haitallisia ympäristövaikutuksia, joten niiden poisto polttoa varten ei ole tarpeellista. Jos biokaasu on tarkoitus käyttää maakaasun tavoin esimerkiksi liikennepolttoaineena, poistetaan jalostusprosessissa myös hiilidioksidia ja tyyppiä siten, että metaanipitoisuus nousee vähintään 84 %:iin. Biokaasusta jalostettu metaani vastaa maakaasua, ja maakaasun tavoin jalostettu biokaasu voidaan paineistaa ja syöttää maakaasuverkkoon. Kaasu voidaan myös nesteyttää (LBG, Liquified BioGas), jolloin sen kuljetus on helpompaa. Nesteytetty kaasu soveltuu erityisesti raskaalle liikenteelle. (Lampinen, 2015a, ss. 131, 135)

Anaerobisen mädättämisen lisäksi uusiutuvaa metaania voidaan tuottaa myös muilla menetelmillä. Biomassasta voidaan valmistaa synteettistä metaania termokemiallisella menetelmällä, ja uusiutuvaa metaania voidaan tuottaa myös vedystä hiilidioksidin avulla. Kun energialähteenä käytetään tuulta, puhutaan tuulimetaanista, ja auringosta saatavaa energiaa hyödynnettäessä puhutaan aurinkometaanista. (Lampinen, 2015b, ss. 195–196)

2.2 Biokaasutuotannon merkitys kestävyysvajeeseen

Biokaasun tuotanto anaerobisella mädätysmenetelmällä voi olla ainakin osaratkaisu useampaan kestävyysongelmaan, kuten energiatuotantoon, jätteidenkäsittelyyn sekä ravinteiden kierrätykseen. Lisäksi hyödynnettäessä biokaasutuotantoa näiden ongelmien helpottamisessa, vähentää se aina myös kasvihuonekaasupäästöjä.

2.2.1 Jätteidenkäsittely

Jätteiden käsittelyä ja sijoittamista ohjataan useilla EU-direktiiveillä, jotka täytäntöönpannaan kansallisilla laeilla ja asetuksilla. EU:n jätesäädöspaketti on uudistettu, ja uusien direktiivien täytäntöönpanoksi myös kansallista jätesäädöspakettia ollaan uudistamassa. Hallitus on jättänyt 27.4.2020 eduskunnalle esityksen jätelain ja eräiden muiden lakien muuttamisesta. Lakimuutosten olisi tarkoitus tulla voimaan vuoden 2020 kuluessa. (Eduskunta, 2020) Muutosehdotuksen mukaan mm. erilliskeräysvelvoitteita kiristettäisiin merkittävästi, ja esimerkiksi biojätteen erilliskeräys tulisi pakolliseksi kaikkiin vähintään viiden asunnon asuinkiinteistöihin

sekä kaikkiin kiinteistöihin, jotka sijaitseva yli 10 000 asukkaan taajamissa. (Kauppila, 2020)

Biohajoavien jätteen kierrätystarve on merkittävä, koska ne aiheuttavat jätehuollon kasvihuonepäästöistä suuren osan. Lisäksi biojätteen kierrätyksellä saadaan nostettua yhdyskuntajätteen kierrätysastetta, jolle on asetettu omat tavoitteensa. Biojätteen kierrätys on merkittävässä roolissa myös ravinteiden kierrätyksessä. (Laaksonen ym., 2018, s. 51) Kierrätystavoitteiden saavuttamisen lisäksi biojäte tulisi saada kerättyä erilleen sekajätteestä, koska märän biojätteen lämpöarvo on poltossa alhainen (Kinnunen & Rintala, 2015, s. 12). Erilliskerätty biojäte voidaan käsitellä biokaasulaitoksessa, missä siitä saadaan energiaa sekä lannoitteeksi sopivaa mädätysjäännöstä. Biojätettä voidaan erottaa myös sekajätteestä, mutta EU:n lannoitevalmistelaki ((EU) 2019/1009) saattaa rajoittaa sekajätteestä erotetun biojätteen käsittelyssä syntyvän mädätysjäännöksen lannoitekäyttöä. (Laaksonen ym., 2018, s. 47)

Biohajoavan jätteen sijoittaminen kaatopaikoille kiellettiin vuoden 2016 alussa voimaan tulleella Valtioneuvoston asetuksella kaatopaikoista 331/2013, jolla täytäntöönpantiin kaatopaikoille sijoitettavan biohajoavan jätteen määrää vähennettäväksi velvoittava EU:n kaatopaikkadirektiivi (1999/31/EY) (Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013). Biojätteen ja muun orgaanisen jätteen päätyminen kaatopaikoille aiheuttaa metaanipäästöjä ilmakehään. Metaanipäästöjen lisäksi kaatopaikkasijoittamisella menetetään orgaanisen aineksen sisältämä energia sekä ravinteet.

Aiemmin kaatopaikoille päätyneestä orgaanisesta materiaalista saadaan kerättyä energiaa talteen kaatopaikkapumppaamojen avulla, jolloin kaatopaikoilla syntyvää biokaasua kerätään talteen poltettavaksi energiaksi joko lämmön tai sähkön tuotantoon, ja vähennetään samalla ilmakehään vapautuvaa metaania.

Kompostointi on biokaasutuotannon ohella vaihtoehtoinen menetelmä biojätteen käsittelylle, mutta kompostoinnissa ei saada hyödynnettyä orgaanisen aineksen sisältämää energiaa.

2.2.2 Ravinnekierto

Typpi ja fosfori ovat kasvien kasvuunsa tarvitsemia pääravintoaineita, ja molempien saatavuutta parannetaan lannoitevalmisteilla. Perinteisten epäorgaanisten mineraalilannoitteiden valmistukseen käytetään louhitua, neitseellistä fosforia. Maailman fosforivarannot ovat rajalliset, ja fosforin kierrättäminen on todettu välttämättömäksi maatalouden lannoite-tarpeiden turvaamiseksi. (Laitinen, Alhola, Manninen & Säylä, 2014, s. 3) Typeä sen sijaan on runsaasti saatavilla, mutta typen sidonta ilmakehästä mineraalilannoitteiden raaka-aineeksi on erittäin energiaintensiivinen prosessi. Ruokatuotannon kestävyuden varmistamiseksi tulee ravinteiden kierrätystä tehostaa ja parantaa ravinteiden käytön tehokkuutta. (Työ- ja

elinkeinoministeriö, 2020, s. 29) Lisäksi ravinteiden joutumista vesistöihin tulee välttää, koska vesistöihin joutuessaan ne aiheuttavat rehevöitymistä, ja esimerkiksi Itämeren tilan vakavin ongelma johtuu ravinteiden, typen ja fosforin aiheuttamasta ravinnekuormasta (Laitinen ym., 2014, s. 3).

Ravinteiden tehokkaampaan kierrätykseen ja kierrätettyjen ravinteiden käytön yleistymiseen on tähdätty mm. ympäristöministeriön vuonna 2010 alkunsa saaneella ravinteidenkierrätysohjelmalla (RAKI-ohjelma) sekä ravinteiden kierrätyksen kärkihankkeella (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020, s. 29). Kierrätysraaka-aineista valmistettujen lannoitteiden käytön lisääminen on myös valtakunnallisen jätesuunnitelman yhtenä painopisteenä. Tavoitteen saavuttamiseksi kierrätyslannoitevalmisteiden tutkimukseen kohdennetaan rahoitusta ja erilaisilla ohjaukskeinoilla pyritään kannustamaan laadukkaiden kierrätysravinteiden käyttöön. (Laaksonen ym., 2018, ss. 12, 37–38)

Biokaasuprosessissa lopputuotteena syntyvän mädätysjäännöksen ja siitä valmistettujen lannoitevalmisteiden käytöllä voidaan tehostaa ravinteiden kierrätystä. Fosforin ja typen osalta niiden määrä ei muutu prosessin aikana, vaan syötteissä olevat ravinteet konsentroituvat mädätysjäännökseen eli mädätteeseen. Mädätteestä voidaan separoinnilla erottaa typpi-pitoinen nestejake ja fosforipitoinen kuivajake. Yksinkertaisella toimenpiteellä mahdollistetaan ravinteiden lisääminen sinne, missä siitä on puutetta, lisäämättä muita ravinteita turhaan. Lisäksi jalostamalla tuotetta pidemmälle, massa tiivistyy ja ravinteiden kuljettaminen ravinneköyhemmille alueille saadaan kannattavaksi. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020, ss. 29–30)

Mädätysprosessissa tapahtuva typen mineralisoituminen eli muuntuminen liukoiseen, ammoniumtyppimuotoon edesauttaa ravinteiden pysymistä ravinnekierrossa. Ammoniumtyppi sitoutuu maapartikkeleihin, jolloin typpi ei huuhtoudu maasta niin herkästi kuin esimerkiksi nitraattityppi. Tämän vuoksi biokaasuprosessin mädätysjäännöksestä valmistetut lannoitevalmisteet ovat ravinnekierron kannalta edullisempia kuin syötemateriaalin, kuten lannan käyttö sellaisenaan. (Paavola & Kapuinen, 2015, s. 95)

Biokaasuprosessissa käytettävät syötteet vaikuttavat mädätysjäännöksen hyödyntämismahdollisuuksiin. Esimerkiksi jätevesilietteissä ja sekajätteestä erotetussa biojätteessä saattaa olla haitta-aineita, jotka eivät ole sallittuja lannoitevalmisteissa. Tämän vuoksi sekajätteestä erotetusta biojätteestä prosessoitua mädätysjäännöstä ei kansallisen lannoitevalmistelainsäädännön nojalla hyväksytä lannoitevalmisteiden raaka-aineeksi. Ravinteiden kierrätyksen kannalta onkin tärkeää, että biojätteen erilliskeräyksen astetta saataisiin nostettua. (Laaksonen ym., 2018, s. 18) Maatalouden biomassat eivät sisällä lannoitevalmistekäyttöä estäviä haitta-aineita, ja ovat siksi ravinteiden kierrätyksen kannalta ihanteellisia syötteitä.

Lannoitevalmisteita, niiden tuottamista ja käyttöä säädelään tiukasti lain-säädännöllä.

2.2.3 Energiatuotanto

Biojalostamot ovat perinteisesti tuottaneet nestemäisiä tuotteita kuten bioetanolia ja biodieseliä. On kuitenkin osoitettu, että tuottaessa veh-nästä tai maissista biometaania biodieselin tai -etanolin sijaan, raaka-ai-neista tuotettu nettoenergia on jopa kolme kertaa suurempi. Biokaasutuotannon etuja ovat myös mahdollisuus paikalliseen tuotantoon, sen monet käyttömahdollisuudet sekä puhdas palaminen. Biokaasua voidaan käyttää lämmittämiseen, sähköntuotantoon, näiden yhdistelmään sekä liikenne-polttoaineena. (Sevda, Pant & Singh, 2013, s. 33)

Biokaasua on yleisesti käytetty lämmöntuotannossa tai yhdistetyssä läm-mön- ja sähköntuotannossa. Lämpöä tuottaessa saavutetaan paras hyö-tysuhde, mutta usein tuotetulle lämmölle ei ole riittävästi kysyntää, jolloin osa kannattaa tuottaa sähköksi. Tuotantotavasta riippuen biokaasun ener-giasisällöstä 30–40 % saadaan muutettua sähköksi, ja lopusta muodostuu lämpöä. Tuotettu sähkö voidaan käyttää paikallisesti tai syöttää valtakun-nan verkkoon. Jos biokaasu jalostetaan biometaaniksi, se voidaan syöttää kaasuverkkoon, mistä se voi päätyä esimerkiksi tankkausasemalle. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020, s. 22)

Lämmön ja sähkön tuotanto biokaasulla on melko kannattamatonta, ja suurten reaktorilaitosten tuloista suuri osa muodostuu usein porttimak-suista. Biokaasutuotannon kannattavuutta voitaisiin parantaa suuntaa-malla biometaania liikennepolttoaineeksi. Biometaanin käyttö on kuiten-kin vielä vähäistä ja vaihtelevaa, mikä lisää liiketoiminnan riskiä. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020, s. 23)

Maataloudessa, missä syötteitä muodostuu tilan omista toiminnoista, bio-kaasutuotannolla voidaan lisätä energiaomavaraisuutta ja kasvattaa ha-jautetun energian tuottamista (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020, s. 21). Yleisesti biokaasutuotantoa lisäämällä voitaisiin parantaa Suomen energia-omavaraisuutta, koska nykyisin Suomen energiatuotanto on hyvin riippu-vaista tuontien energiasta, erityisesti fossiilisista polttoaineista, joita biome-taanilla voitaisiin korvata (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017, s. 79). Biokaa-sutuotanto vastaa myös energia- ja ilmastopolitiikan tavoitteisiin jätepe-räisten biopolttoaineiden lisäämisestä (Laaksonen ym., 2018, s. 19).

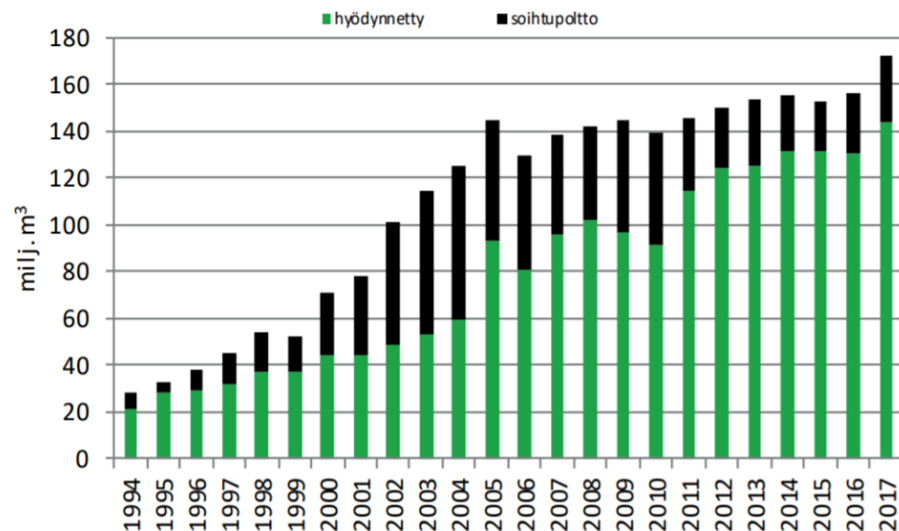
Biometaanin etuna on myös sen hyvä varastoitavuus verrattuna muihin energialähteisiin. Metaania voidaan varastoida teoriassa miljoonia vuosia, kun esimerkiksi raakaöljytuotteet säilyvät varastossa enintään vuoden ja sähköä voidaan varastoida akuissa vain kuukauden verran. Biometaania varastoidaan joko nesteytettynä tai paineistettuna, ja varastointiin voi-daan käyttää samoja varastoja kuin maakaasulle, joita on rakennettu 100 TWh:n energiamäärälle. Huomioiden pitkä varastointiaika ja suuret

varastot, biometaanin varastoinnilla voidaan parantaa energiansaannin huoltovarmuutta sekä tehostaa uusiutuvan energian tuotantoa, koska tuuli- ja aurinkoenergialla voidaan tuottaa energiaa silloin, kun sitä on parhaiten saatavilla, ja varastoida sitä biometaanina myöhempää käyttöä varten. (Lampinen, 2015a, ss. 168–170)

2.3 Biokaasun tulevaisuus Suomessa

2.3.1 Biokaasutuotannon kehitys

Biokaasutuotannolla on monia merkittäviä etuja sekä jätteidenkäsittelyn, ravinnekierron sekä energiatuotannon kannalta, jotka kaikki vaikuttavat myös kasvihuonekaasupäästöihin, mutta biokaasutuotannon huonon kannattavuuden vuoksi sen lisääntyminen on Suomessa ollut hidasta (kuva 1). Yhteismädätyslaitokset eli erityyppisiä syötteitä käsittelevät laitokset alkoivat yleistyä 2000-luvun ensimmäisen vuosikymmenen lopulla, mutta biokaasutuotannon kapasiteettia voitaisiin edelleen lisätä huomattavasti, jopa kymmenkertaistaa.



Kuva 1. Suomessa vuosina 1994–2017 tuotettu biokaasu ja sen hyödynttäminen. (Huttunen, Kuittinen & Lampinen, 2018, s. 8)

Suomi on sitoutunut YK:n maailmanlaajuiseen ja oikeudellisesti sitovaan, Pariisin ilmastopöytäkirjaan, jonka tavoitteena on kasvihuonekaasuja vähentämällä ja hiilinielua lisäämällä saada maapallon ilmaston lämpeneminen rajattua alle 1,5 °C:een (Ympäristöministeriö, 2018). Keinot tavoitteiden saavuttamiseksi asetetaan kansallisesti, ja yhtenä keinona Valtioneuvoston selonteossa kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030 mainitaan biokaasutuotannon lisääminen. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi pääministeri Marinin hallitusohjelman mukaisesti Suomelle laaditaan kansallinen biokaasuohjelma. Ohjelman valmistelemiseksi asetetun työryhmän loppuraportti julkaistiin tammikuussa 2020. Raportissa

kuvataan mm. biokaasutoimialan nykytila, merkittävimmät esteet ja hidas-teet tuotannon lisäämiselle sekä toimenpiteitä näiden ratkaisemiseksi.

2.3.2 Kaasu tieliikennekäytössä

Suomen hiilidioksidipäästöistä noin viidennes aiheutuu liikenteestä, ja tie-liikenteen osuus tästä on noin 90 %. Hallitus on linjannut, että liikenteen päästöjen tulisi vähintään puolittua vuoteen 2030 mennessä vuoden 2005 tasosta. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020, s. 23) Tieliikenteen päästöistä 58 % aiheutuu henkilöautoliikenteestä ja 37 % paketti- ja kuorma-autolii-kenteestä (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2017, s. 5).

Yhtenä keinona tieliikenteen hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen näh-dään kaasuautokannan kasvattaminen. Kansalliseksi tavoitteeksi oli ase-tettu, että vuonna 2020 käytössä olisi noin 6 000 paineistettua kaasua käyttävää autoa. Syksyllä 2019 kaasuautoja oli hieman yli 9 000, joten ta-voite saavutettiin hyvin. Edelleen vuodelle 2030 on asetettu tavoitteeksi, että käytössä olisi vähintään 50 000 kaasuautoa. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020, s. 24)

Merkittävä kaasuautojen yleistymisen este on vähäinen kaasutankkaus-asemien määrä. Vuonna 2018 tankkausasemia oli Suomessa yhteensä 41, joista 27 oli Gasumin ja loput 14 olivat yksittäisten toimijoiden asemia. (Gasum, 2018) Jakeluasemien määrää tavoitellaan nostettavaksi, ja liiken-teen vaihtoehtoisia käyttövoimia koskevassa kansallisessa jakeluinfraoh-jelmassa on asetettu jakeluinfradirektiivin suositusten mukaisesti tavoit-teeksi, että Suomessa olisi vuosikymmenen kuluessa paineistetun kaasun tankkausasema 150 km välein ja nesteytetyn kaasun jakeluasema vähin-tään 400 km välein (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020, s. 27).

Biometaaniksi jalostettu biokaasu voidaan paineistaa ja syöttää kaasuverk-koon, missä se sekoittuu kaasuverkossa olevaan maakaasuun, ja on tan-kattavissa kaasuautoon kaasutankkausasemalla. Tankkausasemia on ra-kennettu myös biokaasulaitosten yhteyteen, jolloin biometaanin ei sekoitu maakaasuun. Biometaanin voidaan myös kuljettaa konteissa tankkausase-mille, jotka eivät voi hyödyntää kaasuverkkoa ja sijaitsevat kauempana bio-kaasulaitoksista. Kaasu voidaan myös nesteyttää, jolloin sen tilavuus pie-nenee ja kuljetus helpottuu. Nesteytettyä kaasua voidaan käyttää raskaan kaluston polttoaineena. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020, s. 23)

Nykyisin autoteollisuus panostaa sähköautojen kehittämiseen, mutta ras-kaan kaluston sähköistäminen on haastavaa, eikä nykytiedon valossa tieli-iikenteessä voida täysin siirtyä sähköön. Biokaasu sen sijaan soveltuu hyvin korvaamaan fossiilisia polttoaineita erityisesti raskaalle kalustolle, jossa voidaan käyttää nesteytettyä biokaasua, jolloin kaasun kuljetuksesta ai-heutuu pienemmän tilavuuden vuoksi vähemmän kustannuksia. Suomen biokaasutuotannon arvioidaan olevan mahdollista kymmenkertaistaa, mutta joka tapauksessa sitä saatavilla rajallinen määrä, ja se voi olla vain

osaratkaisu henkilöautojen vähäpäästöisyyteen. Biokaasu olisikin järkevää ohjata ensisijaisesti raskaaseen kalustoon ja muihin käyttökohteisiin, joiden sähköistäminen on haastavaa. (SUOMEN ILMASTOPANEELI The Finnish Climate Change Panel, n.d., s. 5)

3 TYÖN TARKOITUS JA TUTKIMUSKYSYMYKSET

Biokaasutuotanto on osaratkaisu edellä esitettyihin kestävyysongelmiin. Biokaasuala tarvitsee kuitenkin uusia teknisiä ratkaisuja, jotta saatavilla olevat biomassat saadaan kattavammin hyödynnettyä. Etenkin peltobiomassoissa on paljon käyttämätöntä potentiaalia, mutta nykyisin yleisesti käytössä olevat märkämädätyslaitokset eivät voi käsitellä suuria määriä korkean kuiva-ainepitoisuuden syötettä.

Doranova on suomalainen biokaasulaitosratkaisuja sekä pilaantuneiden maiden ja pohjavesien kunnostushankkeita tarjoava yritys. Biokaasualalla yrityksellä on kokemusta märkämädätyslaitoksista sekä kaatopaikkojen kaasunkeräyksestä. Uutena teknologiana on kehitetty Hardferm -kuivämädätyslaitosratkaisu, jolla saadaan käsiteltyä sellaisia biomassoja, joiden käsittely perinteisillä märkämädätysratkaisuilla on mahdotonta.

Biokaasulaitoksen käynnistys vaatii aina huolellista suunnittelua, mutta erityisen tärkeää se on silloin, kun ollaan ottamassa käyttöön uudenlaista prosessia, josta ei ole aiempaa kokemusta. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli laatia Doranova Oy:lle jatkuvatoimisen termofiilisen kuivämädätyslaitoksen seuranta- ja hallintatyökalut prosessin ylösajovaiheeseen sekä jatkuvan toiminnan vaiheeseen.

Seuranta- ja hallintatyökalujen luomiseksi teoriataustassa haettiin vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

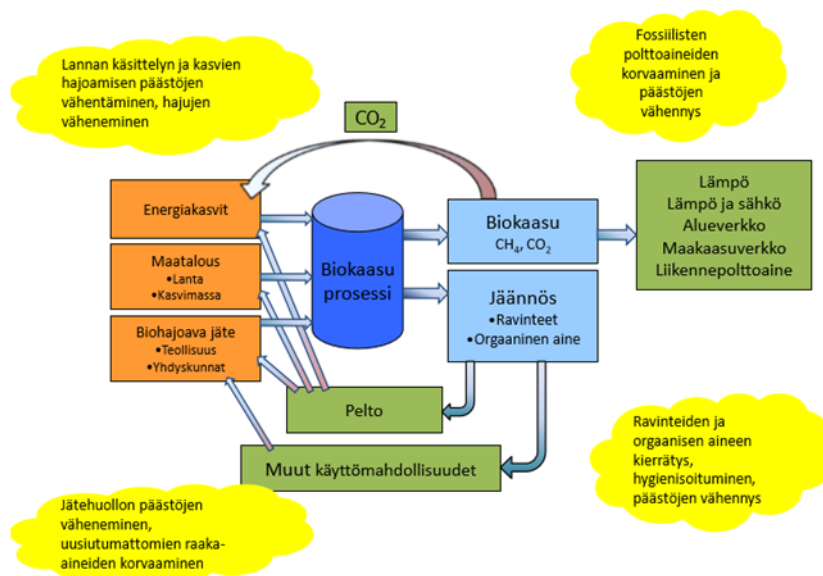
1. Mitkä ovat termofiilisen kuivämädätysprosessin toimintaedellytykset?
2. Prosessihallinnan keinot termofiilisessä kuivämädätyksessä:
 - a. Mitkä ovat keskeiset seurattavat parametrit ja niiden viitearvot?
 - b. Mitä mittauksia ja analyyskejä tarvitaan, ja kuinka usein, prosessin ylösajovaiheessa ja jatkuvan toiminnan vaiheissa?
 - c. Mitkä ovat toimenpiteet viitearvojen ylityksissä?

Tutkimuskysymysten vastauksia hyödyntäen laadittiin prosessin suunnittelu- ja seurantatyökaluiksi laskentataulukot, jotka laskevat valittujen

syötteiden, niiden määrät ja ominaisuudet huomioiden, prosessitasapainon kannalta oleelliset parametrit. Näiden perusteella voidaan mallintaa prosessin kulkua erilaisissa prosessiolosuhteissa.

4 BIOKAASUN TUOTANTO MÄDÄTTÄMÄLLÄ

Biokaasua tuotetaan mädättämällä orgaanista materiaalia biokaasureaktorissa, jossa tapahtuu orgaanisen aineksen mikrobiologinen, anaerobinen hajoaminen. Yksinkertaistettuna biokaasua tuotetaan syöttämällä orgaanista materiaalia sisältävää syötettä biokaasureaktoriin ja keräämällä mikrobituottama metaanipitoinen biokaasu talteen reaktorin kaasutilasta. Biokaasun tuotantoketjuun (kuva 2) kuuluu lisäksi muodostuneen biokaasun sekä mädätysjäännöksen hyödyntäminen, joten käytännössä biokaasulaitokseen kuuluu reaktorin lisäksi myös muita rakenteita (kuva 3).



Kuva 2. Biokaasun tuotantoketju. Biokaasuprosessissa syötteistä muodostuu biokaasua, joka hyödynnetään lämpönä, sähköinä tai liikennepolttoaineena. Mädätysjäännös voidaan hyödyntää lannoitteena, jolloin ravinteet saadaan palautettua kiertoon. (Marttinen, Luostarinen, Winquist & Timonen, 2015, s. 26).

Käytännössä käsittelyyn tulevaa syötettä ei siirretä sellaisenaan suoraan biokaasureaktoriin, vaan se vastaanotetaan erilliseen vastaanottoyksikköön, missä syötteitä voidaan esikäsittää esimerkiksi poistamalla niistä reaktoriin soveltumatonta ainesta tai sekoittamalla syötteitä prosessiin sopivaksi seokseksi. Usein syötteitä hienonnetaan raekoon pienentämiseksi, mikä parantaa kaasuntuottoa. Syötteet voivat käydä läpi myös muita esikäsittelyvaiheita.

Esikäsittelyn jälkeen syöte siirretään erilaisilla kuljettimilla tai pumpuilla biokaasureaktoriin. Reaktori itsessään on rakenteeltaan hyvin yksinkertainen. Reaktorissa voi olla lämmitysjärjestelmä ja sekoitin, mutta anaerobinen hajoaminen on puhtaasti mikrobiologinen prosessi, joka tapahtuu syötemassassa mikrobien hajottaessa orgaanista materiaalia.

Muodostuva biokaasu kerätään reaktorin kaasutilasta ja siirretään joko suoraan biokaasun hyödyntämysyksikköön tai puhdistettavaksi ja jalostettavaksi erilaista jatkokäyttöä varten. Muodostuvan kaasun virtausta hyödyntämysyksikköön voidaan tasata puskurivarastolla, joka on biokaasulaitokselle tyypillinen kaasukello tai kaasuhuppu. Kaasukello on pallomainen, erillinen rakenne, kun taas kaasuhuppu asennetaan biokaasureaktorin päälle. Näihin puskurivarastoihin mahtuu tyypillisesti muutaman päivän biokaasutuotanto. (Luostarinen & Pyykkönen, 2013, ss. 16–17)



Kuva 3. Havainnekuva biokaasulaitoksesta. Kaasuhuppu tai kaasukello (kuvassa) on biokaasulaitokselle tunnusomainen rakenne. (Bioenergy International, 2017)

Massaa prosessoidaan reaktorissa ennalta optimaaliseksi määritetty aika, jonka jälkeen massa poistetaan reaktorista mädätysjäännöksenä. Mikäli massa tuottaa vielä metaania, siirretään se jälkikaasutuslaitokseen, mistä loppu metaani voidaan kerätä talteen, tai mädätysjäännös siirretään jatkokäsittelyyn. Mädätysjäännös voi vaatia syötteestä riippuen hygienisointikäsittelyn, mikä suoritetaan käytännössä lämpökäsittelynä. Hygienisointi voidaan suorittaa erillisessä hygienisointiyksikössä tai se voidaan suorittaa prosessin aikana, mikäli prosessilämpötila on riittävän korkea (Paavola ym., 2015, s. 97). Tietyissä prosessityypeissä reaktorissa on takaisinsyöttöjärjestelmä, jolla saadaan kierrätettyä joko mädätysjäännöstä tai suotovettä. Kierrätyksellä varmistetaan mikrobipopulaation säilyminen reaktorissa.

4.1 Anaerobinen hajoaminen

Anaerobisessa hajoamisessa orgaaninen aines hajotetaan hapettomissa olosuhteissa mikrobien toimesta lopputuotteikseen, biokaasuksi (taulukko 1) ja mädätysjäännökseksi. Substraattien kemiallisista sidoksista vapautuva energia sitoutuu pääasiassa metaaniin, toisin kuin aerobisessa hajoamisessa, missä energia vapautuu lämpönä. Anaerobisessa hajoamisessa lämpöä vapautuu sen sijaan vain vähän. (Al Seadi ym., 2008, s. 21)

Anaerobinen hajoaminen on tapahtumasarja, jossa orgaaninen aines hajotetaan vaiheittain pienemmiksi osiksi, ja jossa edellisen vaiheen mikrobien lopputuotteet toimivat seuraavan vaiheen mikrobien substraatteina. Prosessin vaihteellisuus aiheuttaa anaerobisen hajoamisprosessin suuremman alttiuden inhibitiolle kuin aerobisen prosessin, jossa mikrobit toimivat rinnakkain käyttäen samoja substraatteja, eikä vastaavia synergisiä suhteita esiinny kuten anaerobisessa hajoamisessa. (Murphy & Thamsiroj, 2013, s. 112)

Mikrobit ovat sopeutumiskykyisiä, ja pystyvät adaptoitumaan merkittäviin olosuhteiden muutoksiin, kun muutokset tapahtuvat riittävän hitaasti. Nopeat muutokset kasvuympäristössä saattavat tuhota mikrobit. Anaerobisille mikrobeille on tyypillistä hidas kasvu, mikä johtaa hitaaseen sopeutumiskykyyn, ja altistaa ympäristössä tapahtuvien muutosten aiheuttamalle inhibitiolle. Anaerobisten mikrobien kasvunopeus on noin 10 % aerobien mikrobien kasvunopeudesta. (Murphy ym., 2013, s. 111)

Prosessiin osallistuvat mikrobit tarvitsevat sopivan syötteen eli substraatin lisäksi sopivat kasvuolosuhteet, kuten sopivan lämpötilan, pH:n, happipitoisuuden ja suolapitoisuuden. Eri mikrobeilla on erilaiset vaatimukset optimaalisille kasvuolosuhteilleen, mutta mikrobeilla on myös kyky sopeutua erilaisiin olosuhteisiin. (Schnürer & Jarvis, 2010, s. 6)

Taulukko 1. Biokaasun tyypillinen koostumus (mukaeltu lähteestä Cheng, 2010a, s. 152).

Komponentti	%
Metaani (CH ₄)	50–80
Hiilidioksidi (CO ₂)	20–40
Typpi (N ₂)	0–5
Vety (H ₂)	0–1,0
Rikkivety (H ₂ S)	0,05–1,0
Ammoniakki (NH ₃)	0,02–0,5
Happi (O ₂)	0–0,5

Biokaasun koostumus riippuu käytetyistä syötteistä sekä prosessiolosuhteista. Esimerkiksi eläinperäisiä lietteitä käsiteltäessä biokaasun

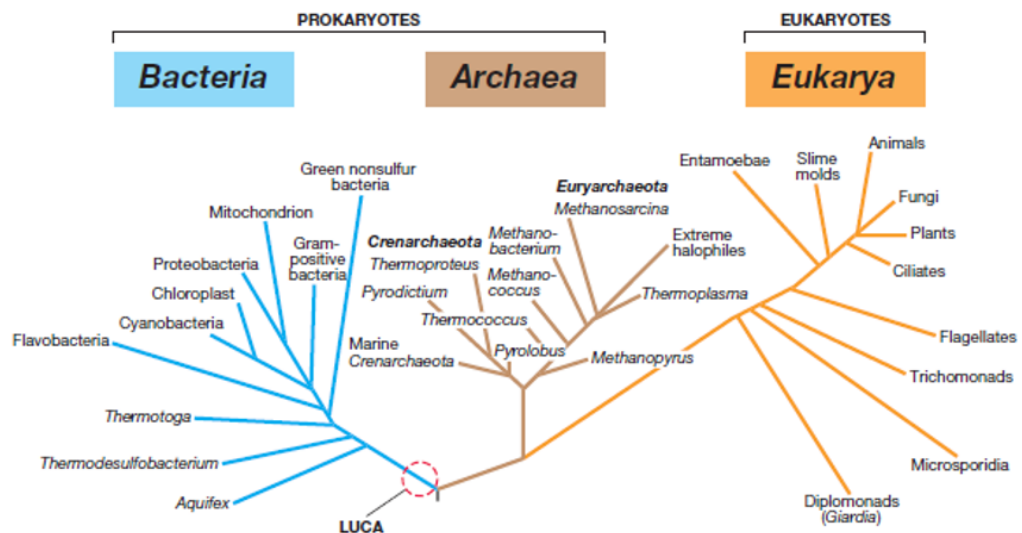
rikkivetypitoisuus on tyypillisesti korkeampi kuin kasveista tuotetun biokaasun (Murphy ym., 2013, s. 105). Mädätysjäännökseen jää kaikki se aines, joka ei poistu syötteistä biokaasun mukana. Prosessista ei esimerkiksi poistu vettä, vaan se jää mädätysjäännökseen.

4.2 Anaerobisen hajoamisprosessin mikrobisto

Anaerobiseen hajoamisprosessiin osallistuva mikrobikirjo on erittäin laaja. Mikrobisto koostuu pääasiassa eliökunnan kahteen pääryhmään, bakteereihin ja arkeoneihin eli arkkeihin kuuluvista lajeista (kuva 4). Prosessiin osallistuvia bakteerilajeja on löydetty lähes 6 000, minkä arvioidaan edustavan noin 60 % bakteerilajien kokonaismäärästä. Arkkeja on tunnistettu noin 300, jonka arvioidaan olevan 90 % kaikista prosessiin osallistuvista arkkilajeista. Suuremman lajikirjon lisäksi bakteereita esiintyy prosessissa myös määrällisesti enemmän kuin arkkeja. (Argyropoulos, Varzakas & Benzie, 2013, s. 265)

Anaerobinen hajoamisprosessi tapahtuu nimensä mukaisesti anaerobisissa eli hapettomissa olosuhteissa. Prosessin mikrobistoon kuuluu fakultatiivisesti aerobeja lajeja sekä ehdottoman anaerobeja lajeja. Fakultatiiviset aerobit mikrobit voivat kasvaa sekä hapettomissa että hapellisissa olosuhteissa. Lukuisat hajoamisketjun alkupäässä toimivista fermentatiivisista mikrobeista kuuluvat tähän ryhmään. Hapen läsnä ollessa ne käyttävät kasvuunsa aerobista soluhengitystä, ja hapettomissa olosuhteissa ne saavat kasvuun tarvitsemansa energian fermentoinnilla. Mikäli anaerobiseen prosessiin joutuu happea, sen fakultatiiviset aerobit kuluttavat sen nopeasti. Ehdottomat anaerobit kasvavat ainoastaan hapettomissa olosuhteissa. Metaanin tuotosta vastaavat metanogeeniset arkit kuuluvat ehdottomiin anaerobeihin. Ne ovat erityisen herkkiä hapen läsnäololle ja kuolevat joutuessaan kosketuksiin hapen kanssa. (Schnürer ym., 2010, s. 11)

Metanogeenisiä arkkeja lukuun ottamatta minkään muun organismin ei tiedetä kykenevän tuottamaan metaania. Metanogeenit tuottavat metaania joko kemo-organotrofisesti muutamista orgaanisista yhdisteistä, joista tärkeimpänä asetaatti, tai kemolitotrofisesti hiilidioksidista (CO₂) ja vedystä (H₂). Rakenteellisesti arkit poikkeavat bakteereista mm. solukalvon osalta. Arkeilla on myös erityisiä ominaisuuksia, kuten kyky kasvaa erityisen kylmissä tai kuumissa olosuhteissa. (Madigan, Martinko, Stahl & Clark, 2012, ss. 488–489, 586)



Kuva 4. Evoluutiopuu muodostuu kolmesta pääryhmästä: bakteereista, arkeista ja eukaryooteista. Anaerobiseen hajoamisprosessiin osallistuvat bakteerit ja arkit ovat prokaryootteja eli tumattomia soluja. Kasvi- ja eläinsolut kuuluvat eukaryooteihin eli tumallisiin soluihin. (Madigan ym., 2012, s. 488)

Suurin osa anaerobisen hajoamisprosessin metaanista tuotetaan asetaattista asetilaktisten eli asetotrofisten arkkien toimesta. Asetaattia hyödyntävistä arkeista on tunnistettu kaksi sukua, *Methanosarcina* ja *Methanosaeta*. *Methanosarcinan* kahdentumisaika on tyypillisesti 1–2 päivää ja *Methanosaetan* 4–9 päivää. (Khanal, 2008b, ss. 36–37) Vedystä ja hiilidioksidista metaania tuottavien hydrogenotrofien ryhmä on laajakirjoisempi kuin asetilaktisten arkkien (Schnürer ym., 2010, s. 20).

Bakteerit hyödyntävät substraatteinaan lukemattomia eri aineita, kun taas metaania tuottavien metanogeenien substraatteja ovat vain asetaatti ja vety. Substraattien saatavuus vaikuttaa mikrobien, erityisesti bakteerilajien esiintymissuhteisiin. Myös prosessiolosuhteet vaikuttavat mikrobien esiintyvyyteen ja niiden suhteellisiin osuuksiin. (Argyropoulos ym., 2013, ss. 271–272) *Methanosarcina* pystyy hyödyntämään asetaattia tehokkaasti vain korkeissa asetaattikonsentraatioissa. Myös substraatin syöttöfrekvenssillä ja sekoituksella on merkitystä eri arkkisukujen esiintyvyyteen prosessissa. (Schnürer ym., 2010, s. 20)

Mikrobien tarvitsema energia tuotetaan hapettumisreaktioilla, joko hapen läsnä ollessa eli aerobisesti, jolloin happi toimii elektronin vastaanottajana tai hapettomissa olosuhteissa eli anaerobisesti, jolloin elektronin vastaanottajana voi toimia joko orgaaninen tai epäorgaaninen yhdiste. Fermentoinnissa elektronin vastaanottaja toimivat erilaiset orgaaniset yhdisteet, kuten sokerit ja rasvat, ja lopputuotteina syntyy mm. alkoholeja ja happoja. Anaerobisessa soluhengityksessä mikrobit käyttävät ensisijaisia substraatteinaan epäorgaanisia yhdisteitä kuten sulfaattia (SO_4^{2-}), rautaa

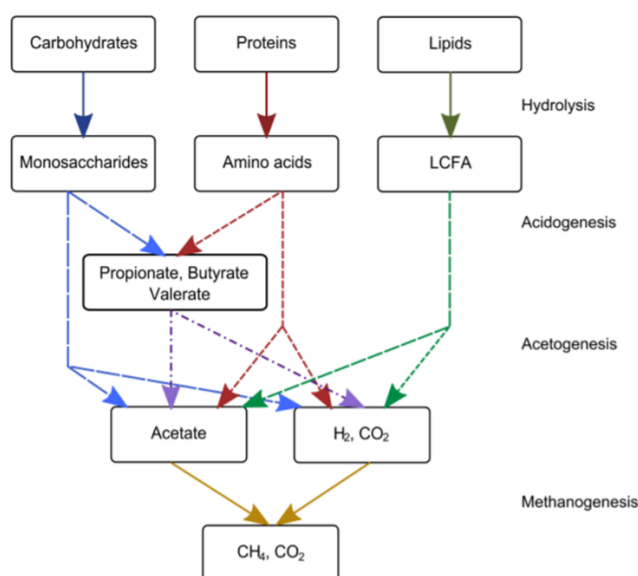
(Fe^{3+}), mangaania (Mn^{4+}), nitraattia (NO_3^-) ja hiilidioksidia (CO_2). (Al Seadi ym., 2008, s. 7)

Biokemiallisista hapettumisreaktioista energiansa saavat mikrobit ovat kemotrofeja (chemotrophs), jotka jaetaan orgaanisia aineita hyödyntäviin kemo-organotrofeihin (chemoorganotrophs) ja epäorgaanisista aineista energiansa ottaviin kemolitotrofeihin (chemolithotrophs). Monet kemolitotrofien energialähteenään käyttämät yhdisteet, kuten H_2 ja H_2S , ovat kemo-organotrofien aineenvaihduntatuotteita. Nämä ryhmät kasvavatkin yleisesti tiiviisti yhdessä. (Madigan ym., 2012, s. 64)

Mikrobit voivat ottaa tarvitsemansa hiilen orgaanisista yhdisteistä tai hiilidioksidista. Mikrobeja, jotka käyttävät hiilen lähteenä orgaanisia yhdisteitä, kutsutaan heterotrofeiksi ja hiilidioksidia hiilen lähteenä käyttäviä mikrobeja kutsutaan autotrofeiksi. Autotrofit kasvavat tavallisesti hitaammin kuin heterotrofit, koska epäorgaanisen hiilen hyödyntäminen kuluttaa enemmän energiaa kuin orgaanisen hiilen. (Cheng, 2010a, s. 142)

4.3 Anaerobisen hajoamisen vaiheet

Anaerobinen hajoaminen voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen, missä lähtöaineet pilkotaan vaiheittain pienemmiksi toisistaan riippuvaisena tapahtumaketjuna (kuva 5). Eri mikrobit osallistuvat pilkkomiseen eri vaiheissa, ja edellisen vaiheen tuotteet toimivat seuraavan vaiheen substraatteina. (Al Seadi ym., 2008, s. 21).



Kuva 5. Anaerobisen hajoamisketjun vaiheet ja hajoamisreitit. (Vega De Lille, 2015, s. 9)

Hajoamisprosessin etenemisnopeus on riippuvainen hitaimmasta vaiheesta. Hajoamisen nopeuteen eri vaiheissa vaikuttavat mm. saatavilla olevat substraatit. Mikäli prosessoidaan hitaasti hajoavaa ainesta,

selluloosaa, hemiselluloosaa tai ligniiniä sisältäviä substraatteja, ensimmäinen eli hydrolyysivaihe on hitain ja näin ollen prosessin etenemisnopeutta rajoittava. (Al Seadi ym., 2008, s. 21) Mikäli yksikin hajoamisketjun vaihe inhiboituu, saattaa koko prosessi pettää (Khanal, 2008b, s. 32).

Anaerobiseen hajoamisprosessiin osallistuvien mikrobien kasvunopeudet vaihtelevat, mikä myös voi vaikuttaa vaiheiden etenemiseen. Asidogeenillä on selvästi lyhyin kahdentumisaika, noin 30 minuuttia. Asetogeenisten mikrobien kahdentumisaika on 1,5–4 päivää ja metanogeenillä 2–4 päivää eli ne kasvavat hitaasti verrattuna hydrolyyttisiin mikrobeihin. (Kothari ym., 2014, ss. 175–176) Eri lajien kahdentumisajat vaihtelevat, joten eri mikrobiryhmille ei voida esittää yleispäteviä kahdentumisaikoja. Esitetyt ajat kuvaavat eri vaiheisiin osallistuvien mikrobien keskimääräisten kahdentumisaikojen suhteellisia eroja.

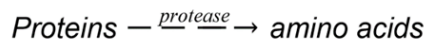
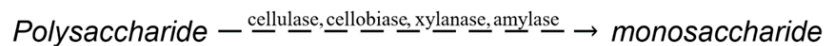
4.3.1 Hydrolyysi

Anaerobisen hajoamisen ensimmäisessä vaiheessa suurimolekyyliset orgaaniset aineet, kuten hiilihydraatit, proteiinit ja rasvat pilkotaan pienemmiksi molekyyleiksi (Cheng, 2010b, s. 154). Hydrolyysivaiheeseen osallistuu suuri kirjo erilaisia mikrobeja, jotka tuottavat solun ulkopuolelle hydrolyyttisiä entsyymejä hajottamaan yhdisteitä, jotka ovat muutoin liian suuria otettavaksi solun sisään. Entsyymien pilkkoessa pitkäketjuiset polymeerit pienemmiksi, yhdisteet liukoistuvat. Rasvat pilkotaan rasvahapoiksi ja glyseroliksi, polysakkaridit monosakkarideiksi ja proteiinit aminohapoiksi (kuva 6). (Al Seadi ym., 2008, s. 22)

Polysakkaridit ovat yhdisteitä, jotka ovat muodostuneet yhteen liittyneistä sokereista. Selluloosa, hemiselluloosa, tärkkelys, pektiini ja glykokeeni ovat tavallisia polysakkarideja. Proteiinit muodostuvat aminohappoketjuista. Lyhyitä, alle 50 aminohapon ketjuja kutsutaan peptideiksi. Myös rasvoja on useita erilaisia, ja niiden koostumus riippuu niiden alkuperästä. Yleisesti rasvat koostuvat glyserolista (alkoholi) ja erilaisista rasvahapoista. (Schnürer ym., 2010, ss. 14–15)

Jotkut hydrolyyttiset bakteerit erittävät useita erilaisia entsyymejä, joiden avulla ne voivat hajottaa erilaisia orgaanisia materiaaleja. Toiset mikrobit tuottavat entsyymejä vain esimerkiksi sokereiden tai proteiinien pilkkomiseksi. (Schnürer ym., 2010, s. 14)

Syötteen sisältäessä runsaasti hitaasti hajoavia substraatteja, hydrolyysivaihe saattaa olla anaerobisen hajoamisprosessin nopeutta rajoittava tekijä, ja metaanintuotto on verrannollinen suurimolekyylisten aineiden pilkkoutumiseen liukoiseen muotoon (Khanal, 2008b, s. 30). Nopea hydrolyysivaihe sen sijaan altistaa haitallisten välituotteiden kertymiselle prosessiin.



Kuva 6. Rasvoja, polysakkarideja ja proteiineja pilkkovat entsyymit ja pilkkoutumisessa syntyvät lopputuotteet. (Kuva: Al Seadi ym., 2008, s. 22)

Hydrolyysivaiheen lopputuotteina syntyy pääasiassa sokereita, rasvahappoja, aminohappoja ja peptidejä, mutta pieniä määriä myös asetaattia, vetyä ja hiilidioksidia. Hydrolyysivaiheessa alkuperäisistä suurimolekyylisistä aineista vapautuvasta energiasta sitoutuu vetyyn 5 %, asetaattiin (etikkahappo) 20 % ja muihin pienimolekyylisiin orgaanisiin yhdisteisiin 75 %, jotka hajotetaan edelleen seuraavissa vaiheissa. (Cheng, 2010b, s. 154)

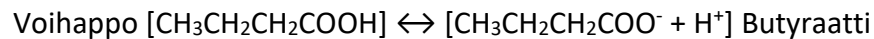
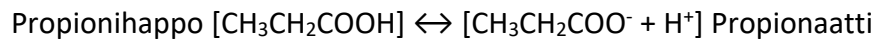
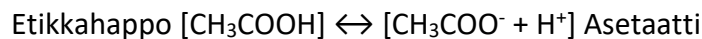
4.3.2 Asidogeneesi eli fermentaatio

Anaerobisen hajoamisen toisessa vaiheessa, asidogeneesissä, ensimmäisessä vaiheessa syntyneet sokerit, rasvahapot, aminohapot ja peptidit fermentoidaan haihtuviksi rasvahapoiksi (VFAs, Volatile Fatty Acids), kuten etikkahapoksi, propionihapoksi ja voihapoksi. Kuten hydrolyysivaiheessa, myös asidogeneesissä muodostuu pieniä määriä myös vetyä, hiilidioksidia ja alkoholeja. (Cheng, 2010b, s. 154) Asidogeneesin oletetaan olevan anaerobisen hajoamisen nopein vaihe (Schnürer ym., 2010, s. 15).

Asidogeneesiin osallistuu hajoamisprosessin eri vaiheista laajin kirjo erilaisia mikrobeja, joista monet ovat samoja kuin hydrolyysivaiheen mikrobit, mutta osa on myös muihin sukuihin kuuluvia lajeja. Erilaisia fermentaatioreittejä on lukuisia, ja tuotekoostumus riippuu substraateista, läsnä olevista mikrobeista sekä ympäristön olosuhteista, kuten lämpötilasta ja pH:sta. Eri mikrobit tuottavat samoista lähtöaineista erilaisia lopputuotteita, mutta myös saman mikrobin metaboliareitit voivat muuttua olosuhteiden muuttuessa, jolloin samasta substraatista voidaan tuottaa eri lopputuotteita. (Schnürer ym., 2010, ss. 15–17)

Asidogeneesivaiheessa tuotetut haihtuvat rasvahapot esiintyvät mädätysprosessissa yleensä negatiivisesti varautuneina ioneina. Kullekin hapolle on olemassa ominainen pKa-arvo, ja kun ympäristön pH on korkeampi kuin pKa, happo esiintyy ionimuodossa. Mädätysprosessissa tuotettujen haihtuvien rasvahappojen, kuten voihamon, etikkahapon ja propionihapon pKa-arvot ovat alle 5, joten anaerobisessa mädätysprosessissa pH-arvon ollessa lähellä neutraalia, haihtuvat rasvahapot esiintyvät negatiivisesti varautuneina ioneina. Ionimuodossa hapot muodostavat herkästi suoloja

metallien kanssa. Happojen ionimuodot on nimetty omilla nimillään. (Schnürer ym., 2010, s. 16)



(Schnürer ym., 2010, s. 16)

Fermentaatiovaiheen pääasiallisena lopputuotteena syntyneet haihtuvat rasvahapot esiintyvät asetaattina, propionaattina ja butyraattina. Lisäksi muodostuu pieniä määriä muita haihtuvia rasvahappoja sekä vetyä ja hiilidioksidia. (Murphy ym. 2013, s. 106) Fermentaatiovaiheen jälkeen energiasta on sitoutuneena vetyyn 10 %, asetaattiin 35 % ja loput muihin haihtuviin rasvahappoihin (Cheng, 2010b, s. 154).

4.3.3 Asetogeneesi eli anaerobinen hapettuminen

Asetogeesissä edellisessä vaiheessa syntyneet haihtuvat rasvahapot pilkotaan asetaatiksi, vedyksi ja hiilidioksidiksi erilaisissa hapettumisreaktioissa, joihin osallistuu myös hapettuneita yhdisteitä, kuten nitraattia, sulfaattia ja karbonaattia, joita asetogeenit käyttävät elektronien vastaanottajina (Kymäläinen, 2015, s. 62).

Asetogeneesi on biokaasuprosessissa erittäin tärkeä vaihe, joka vaatii läheistä yhteistyötä hapettumisreaktioihin osallistuvilta mikrobeilta ja metaania tuottavilta arkeilta, jotka ovat aktiivisia anaerobisen hajoamisketjun seuraavassa vaiheessa, metanogeesissä. Metaboliareitit ovat todellisuudessa hyvin monimutkaisia, mutta yksinkertaistettuna voidaan sanoa, että yhteistyö linkittyy prosessin vetypitoisuuteen. Anaerobisessa hapettumisessa protoneja käytetään lopullisina elektronien vastaanottajina, ja tästä muodostuu vetykaasua. Termodynamiikan laeista johtuen vedyn muodostuminen onnistuu vain, jos vedyn osapaine pysyy riittävän matalana. Metanogeenit osallistuvat vedyn poistoon, ja tätä yhteistyötä kutsutaan syntrofiksi. Jos metanogeenien toiminta häiriintyy, eikä vetyä poisteta jatkuvasti, anaerobinen hapettuminen loppuu, koska mikrobit eivät saa enää riittävästi energiaa kasvuunsa. (Schnürer ym., 2010, ss. 16–17)

Vedyn osapaine tulee olla alle 10^{-3} atm, jotta olosuhteet pysyvät asetogeesille suotuisina. Haihtuvista rasvahapoista propionaatin hapettuminen edelleen asetaatiksi vaatii alhaisimman vedyn osapaineen, alle 10^{-4} atm. Suuri osa (30 %) prosessin elektroneista osallistuu nimenomaan propionaatin hapettumiseen, joten propionaatin hapettuminen on kriittisempää kuin muiden haihtuvien rasvahappojen. Mikäli asetogeenisten ja metanogeenisten mikrobien symbioottinen toiminta on epätasapainossa, eivät asetogeenit pysty hajottamaan haihtuvia rasvahappoja, ja happojen

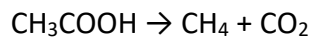
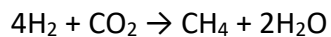
kertyminen johtaa anaerobisen hajoamisprosessin häiriintymiseen. (Khanal, 2008b, ss. 30–31, 33–34)

Asetogeneesivaiheessa myös sellaiset mikrobit voivat tuottaa vetyä, joilla ei ole muihin mikrobeihin syntrofista yhteyttä eli ne eivät ole riippuvaisia vedyn kulutuksesta. Lisäksi useilla syntrofeilla voi olla sellaisia metaboliareittejä, joissa ei muodostu vetyä, ja ne voivat näin sopeutua erilaisiin olosuhteisiin. (Schnürer ym., 2010, s. 19)

Asetogeenisten mikrobien rooli koko anaerobisessa hajoamisprosessissa on ratkaiseva, koska siinä välituotteet muutetaan lopullisesti metanogeenien substraateiksi: vedyksi, hiilidioksidiksi ja asetaatiksi (Murphy ym., 2013, s. 107).

4.3.4 Metanogeneesi

Metanogeneesissä aiemmissä anaerobisen hajoamisen vaiheissa syntyneet vety ja asetaatti muutetaan metaaniksi (CH₄). Lisäksi lopputuotteena syntyy hiilidioksidia (CO₂). Metaanin muodostukseen osallistuu hydrogenotrofisia metanogeeneja, jotka muuttavat vedyn ja hiilidioksidin metaaniksi sekä asetilaktisia metanogeeneja, jotka vastaavat asetaatin muuttamisesta metaaniksi. (Murphy ym., 2013, s. 107) Muodostuvasta metaanista noin 70 % on peräisin asetaatista ja loput 30 % vedystä ja hiilidioksidista (Al Seadi ym., 2008, s. 23).



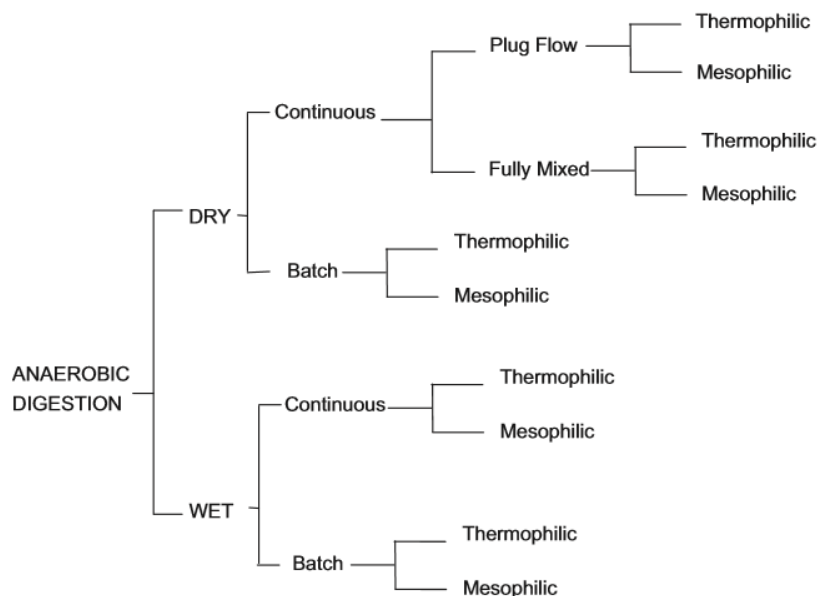
(Cheng, 2010b, s. 154)

Metanogeneesi on anaerobisen hajoamisen kriittisin vaihe, koska sen biokemialliset reaktiot ovat hitaimmat, ja se on herkin olosuhteiden vaikutukselle kuten lämpötilavaihteluille. Metanogeenit ovat herkimpiä myös hapelle ja vaativat ehdottoman hapettomat olosuhteet. (Al Seadi ym., 2008, s. 23)

Vaikka metanogeenien kahdentumisajan tiedetään yleisesti olevan melko pitkä, se ei täysin pidä paikkaansa. Hydrogenotrofisilla metanogeeneilla on melko lyhyt kahdentumisaika, mutta asetilaktiset metanogeenit hyödyntävät asetaattia melko tehottomasti, ja kasvavat siksi hitaasti. Niiden kahdentumisaika vaihtelee 2–12 vrk:n välillä (Kymäläinen, 2015, s. 63; Murphy ym., 2013, s. 107)

4.4 Prosessin luokittelu toimintaperiaatteen mukaisesti

Anaerobiset mädätysprosessit voidaan luokitella toimintaperiaatteensa mukaisesti panostoimisiin ja jatkuvatoimisiin prosesseihin, kuiva- ja märkämädätysprosesseihin, yksi- ja kaksivaiheisiin prosesseihin sekä lämpötilan mukaan meso- ja termofiilisiin prosesseihin (kuva 7) (Da Costa Gomez, 2013, s. 3). Lähtökohta kaikille prosesseille on kuitenkin ilmatiivis reaktori, jossa on syötteen sisäänsyöttöjärjestelmä sekä mädätysjäännöksen ja muodostuvan biokaasun poistojärjestelmä (Al Seadi ym., 2008, s. 74).



Kuva 7. Anaerobisten mädätysprosessien luokittelu toimintaperiaatteen mukaisesti. Kaaviossa ei ole esitetty yksi- ja kaksivaiheista prosessia. (Kothari ym., 2014, s. 178)

4.4.1 Kuiva- ja märkämädätys

Prosessit jaetaan kuiva- ja märkämädätysprosesseihin syötteen sisältämän kuiva-ainepitoisuuden mukaan. Mikäli syötteen kuiva-ainepitoisuus on enintään 15 %, puhutaan märkäprosessista, ja kuiva-ainepitoisuuden ollessa 20–40 %, puhutaan kuivaprozessista. Kuiva- ja märkäprosessien laitosratkaisut poikkeavat merkittävästi toisistaan, joten biokaasulaitoksen suunnittelun lähtökohtana on valita joko kuiva- tai märkäprosessi käsiteltävien syötteiden mukaan. (Al Seadi ym., 2008, ss. 74–75)

Märkäprosessissa syötteet ovat pumpattavia, ja sekä syötteen että mädätysjäännöksen siirtelyyn käytetään pääsääntöisesti pumppuja. Matalan kuiva-ainepitoisuuden vuoksi reaktorissa oleva massa on helposti sekoitettavissa. (Luostarinen, 2015, s. 83) Märkäprosessille tyypillisiä syötteitä ovat erilaiset lietteet ja lannat sekä orgaanista ainesta sisältävät teollisuuden jätevedet. Märkäprosesseja on ollut käytössä pitkään, ja niiden tekniikka

on kehittynyt. Märkäprosesseilla ei kuitenkaan voida käsitellä kaikkia syötteitä, koska korkean kuiva-ainepitoisuuden syötteet saattavat tukkia pumput ja painavaa kiintoainesta voi sedimentoitua reaktorin pohjalle. Lisäksi märkämädätys vaatii suuremman reaktoritilavuuden ja siten myös enemmän mm. lämmitysenergiaa.

Kuivamädätys on edullinen korkean kuiva-ainepitoisuuden syötteille, jolloin syötettä ei tarvitse laimentaa pumpattavaan muotoon. Kuivamädätyksessä syötteet ovat kasalla pysyviä, ja niiden siirtämiseen käytetään erilaisia hihnoja ja ruuveja. Kuivaprosesseissa sekoittaminen on haastavampaa kuin märkämädätyksessä, ja teknisiä ratkaisuja kehitetään edelleen. (Luostarinen, 2015, s. 83)

Kuivamädätyksen etuna on myös pienempi reaktoritilavuus, mikä vähentää investointikustannuksia sekä operointikustannuksia, kuten lämmityksen ja sekoituksen vaatimaa energiatarvetta (Li ym., 2015, ss. 969–970). Korkean kuiva-ainepitoisuuden syötteitä on helppo käsitellä, ja niitä voidaan kannattavasti kuljettaa myös muualle käsiteltäväksi, toisin kuin matalan kuiva-ainepitoisuuden syötteitä. Matalan kuiva-ainepitoisuuden syötteissä biokaasupotentiaali tuoretonna kohden on matala, mikä nostaa kuljetuskustannusten osuutta ja heikentää kokonaiskannattavuutta. (ProAgria, n.d., s. 4)

Hyvin matalan kuiva-ainepitoisuuden syötteiden, kuten teollisuuden jätevesien, käsittelyyn voidaan käyttää erilaisia korkeakuormitteisia prosesseja, jotka poikkeavat merkittävästi perinteisestä märkämädätyksestä (Kinnunen ym., 2015, ss. 14–15).

4.4.2 Panostoiminen prosessi ja jatkuvatoiminen prosessi

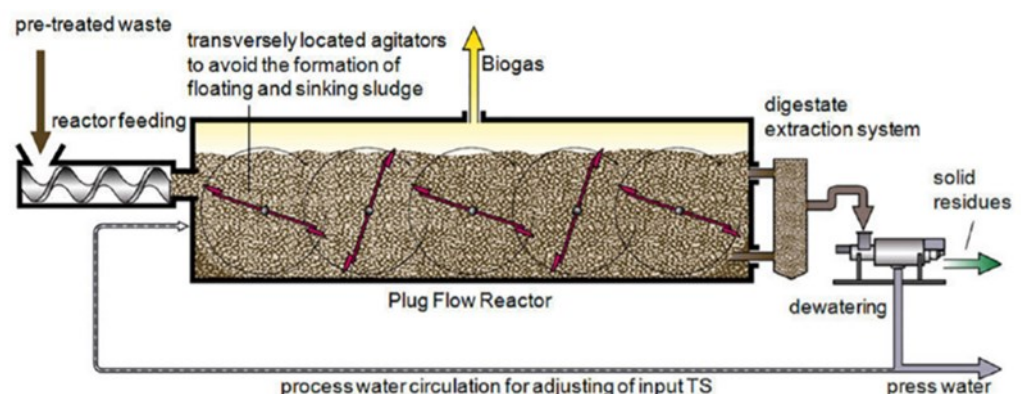
Panostoimisessa prosessissa reaktori täytetään syötteellä, annetaan hajoamisen tapahtua ja kerätään kaasu talteen, ja lopuksi tyhjenetään reaktori mädätysjäännöksestä. Prosessi ja reaktori ovat toimintaperiaatteeltaan yksinkertaisia. Jatkuvatoimisessa prosessissa sen sijaan prosessiin lisätään syötettä ja mädätysjäännöstä poistetaan prosessin aikana säännöllisesti, joko tietyin väliajoin tai jatkuvasti ilman taukoja. Kuivamädätyksessä, erityisesti maatilamittakaavan laitoksissa käytetään panostoimista prosessia, kun taas märkämädätysprosessit ovat jatkuvatoimisia. Jatkuvatoimiset kuivamädätyslaitokset ovat uudempaa teknologiaa, mutta ne ovat viime vuosina yleistyneet.

Jatkuvatoiminen märkämädätysreaktori on tyypillisesti lieriön muotoinen. Reaktoriin pumpataan uutta syötettä säännöllisesti ja saman verran mädätysjäännöstä poistetaan reaktorista, jolloin uusi, hajoamaton syöte sekoittuu tasaisesti jo prosessoidun massan sekaan. Tämän vuoksi reaktorista poistuu osin loppuun hajottamatonta mädätysjäännöstä, ja mädätysjäännöksestä muodostuu vielä merkittäviä määriä biokaasua, jopa 20–30 % koko biokaasutuotannosta. Tämän vuoksi prosessi vaatii

jälkikaasutusaltaan, josta mädätysjäännöksen tuottama biokaasu kerätään talteen ja hyödynnetään reaktorin tuottaman biokaasun kanssa. (Luostarinen ym., 2013, s. 16) Jatkuvatoimisessa märkämädätysreaktorissa uuden ja vanhan massan sekoittuminen varmistaa myös mikrobipopulaation säilymisen reaktorissa. Poishuuhtoutumisen estämiseksi viipymäajan tulee olla riittävän pitkä.

Panostoimisessa prosessissa mikrobipopulaation säilyminen ja prosessin nopeampi alkaminen varmistetaan jättämällä osa mädätysjäännöksestä seuraavan panoksen ympiksi. Panoksen päälle voidaan myös suihkuttaa prosessissa syntyvää nestettä parantamaan mikrobien ja syötteen välistä kontaktia. Panosreaktoreita käytetään yleensä kuivaprosesseissa, kun syötteen kuiva-ainepitoisuus on 30–40 %. Panosprosessilla ei saavuteta yhtä suurta kaasuntuottoa kuin jatkuvatoimisilla prosesseilla, mutta panosprosessit eivät ole häiriöherkkiä, eikä niissä ole rikkoutuvia osia kuten jatkuvatoimisissa prosesseissa. Jos panosprosessia käytetään kaupalliseen biokaasutuotantoon, on reaktoreita yleensä useampia, jotta kaasuntuotto saadaan pidettyä suhteellisen tasaisena. (Murphy ym., 2013, s. 116) Panosperiaatteella toimivat prosessit sopivat hyvin maatilamittakaavaan, koska ne ovat edullisia, yksinkertaisia ja maatiloilla on valmiiksi reaktorin käyttöön, täyttöön ja tyhjennykseen tarvittavat laitteet.

Jatkuvatoimiset, korkean kuiva-ainepitoisuuden prosessit ovat yleensä tulppavirtausprosesseja (kuva 8). Tulppavirtausreaktorissa substraattia sekoitetaan hitaasti ja massa siirtyy eteenpäin vaakasuorassa reaktorissa. Koska koko massa ei sekoitu yhdellä kertaa ja syöttöpään massa siirtyy pikkuhiljaa kohti poistopäätä, saadaan estettyä massan nopea poistuminen reaktorista ja viipymäaika saadaan pidemmäksi. (Da Costa Gomez, 2013, s. 3)



Kuva 8. Tulppavirtausperiaatteella toimivan biokaasureaktorin perusrakenne (Logan & Visvanathan, 2019, s. 32).

Tulppavirtausprosessille on tyypillistä, että syöttöpäässä substraattikoncentraatio on korkea, ja se vähenee vähitellen siirryttäessä kohti poistopäätä, kun mikrobit hajottavat substraatteja (Cheng, 2010b, s. 183). Tulppavirtausperiaate voidaan saavuttaa, kun syötteen kuiva-ainepitoisuus on

yli 20 % (Bachmann, 2013, s. 196). Tulppavirtausreaktoriin voidaan yleensä syöttää suurempia määriä orgaanista ainesta kuutiometriä kohden kuin jatkuvasekoitteisiin märkäreaktoreihin (Da Costa Gomez, 2013, s. 3). Tulppavirtausreaktorit edellyttävät yleensä suotoveden tai mädätysjännöksen kierrättämistä mikrobipopulaation säilyttämiseksi prosessissa. Tulppavirtausreaktorissa vanhan ja uuden syötteen sekoittuminen on rajallista toisin kuin jatkuvatoimisessa märkämädätyksessä, ja riittävän mikrobiston säilyttämiseksi prosessissa on esitetty jopa 40 %:n kierrätysastetta. (Gómez ym., 2019, ss. 13–14)

4.4.3 Yksi- ja kaksivaiheiset prosessit

Yksivaiheisessa prosessissa, joka on yleisemmin käytössä, kaikki hajoamisen vaiheet tapahtuvat yhdessä reaktorissa. Prosessi voidaan toteuttaa myös kaksivaiheisena, jolloin olosuhteet voidaan optimoida suotuisiksi hajoamisen eri vaiheissa toimiville mikrobeille. (Cheng, 2010b, s. 160)

Kaksivaiheisessa prosessissa on erilliset hydrolyysisäiliöt, joista massa siirretään hydrolyysivaiheen jälkeen varsinaiseen reaktoriin, jossa muodostuu suurin osa metaanista. Myös hydrolyysivaiheessa muodostuu jonkin verran metaanipitoista biokaasua, joka kerätään talteen hyödynnettäväksi varsinaisessa reaktorissa muodostuvan biokaasun lisänä.

Hydrolyysivaiheen mikrobeille hieman alhaisempi lämpötila on edullisempi kuin metanogeeneille, ja metanogeenit toimivat paremmin kaapeammalla hiili–typpisuhdealueella kuin hydrolyyttiset mikrobit. Merkittäv in olosuhde-ero on kuitenkin pH-optimissa, joka on hydrolyysivaiheessa 4,0–6,3 eli selvästi hapan, mutta metanogeeneille suotuisin pH on 6,7–7,5 eli lähellä neutraalia. (Korres & Nizami, 2013, s. 208) Yksivaiheisessa prosessissa olosuhteet tulee luoda sellaisiksi, joihin kaikki anaerobiseen hajoitusprosessiin osallistuvat mikrobit voivat kohtuudella sopeutua.

Kaksivaiheisessa prosessissa voidaan hydrolyysivaiheen pH:lla vaikuttaa myös hydrolyysivaiheen lopputuotekoostumukseen, koska eri pH-alueilla lopputuotteita syntyy erilaisina pitoisuuksina (Cheng, 2010b, s. 160).

4.4.4 Meso- ja termofiilinen prosessi

Biokaasuprosessi voidaan toteuttaa erilaisissa lämpötiloissa, ja lämpötilan mukaan puhutaan mesofiilisistä ja termofiilisistä prosesseista. Mesofiilisen prosessin lämpötila on tyypillisesti välillä 35–43 °C ja termofiilisen prosessin lämpötila vaihtelee välillä 50–55 °C. Mikrobit pystyvät toimimaan laajalla lämpötila-alueella, mutta prosessitasapainon kannalta on tärkeää, että lämpötila pysyy mahdollisimman tasaisena. (Kymäläinen, 2015, ss. 63–64)

Perinteisesti biokaasulaitokset ovat olleet mesofiilisiä, mutta nykyisin perustetaan yhä enemmän termofiilisinä toimivia laitoksia (Al Seadi ym., 2008, s. 24). Termofiilisen prosessin kaasuntuottokyky on todettu paremmaksi kuin mesofiilisen prosessin, johtuen termofiilisen prosessin tehokkaammasta ja nopeammasta substraattien hajottamisesta, korkeammasta kuormituksesta ja lyhyemmästä viipymääjasta (Korres ym., 2013, ss. 208–209).

Toisaalta termofiilisen prosessin on todettu olevan vaativampi ravinteiden suhteen ja herkempi lämpötilavaihteluille. Lisäksi termofiilinen prosessi vaatii enemmän energiaa lämmitykseen, ja on alttiimpi prosessia inhiboiville tekijöille. (Korres ym., 2013, ss. 208–209)

Mesofiilinen prosessi on vakaampi hitaamman hajoamisen vuoksi. Lisäksi mesofiilisen prosessin mikrobisto on laajakirjoisempi kuin termofiilisen. Monipuolinen mikrobisto tarjoaa paremmat mahdollisuudet adaptoitua muuttuviin olosuhteisiin. Laajempi lajikirjo voi olla myös selitys sille, että mesofiilisessä prosessissa epäorgaaniset haitta-aineet hajoavat paremmin kuin termofiilisessä prosessissa. (Schnürer ym., 2010, s. 33)

Biokaasuprosessi tarvitsee yleensä ulkopuolista lämmitystä, koska anaerobinen hajoaminen vapauttaa vain vähän lämpöä. Reaktorit ovat yleensä lämmitettyjä ja eristettyjä, mutta myös syötteen voidaan esilämmittää. (Kymäläinen, 2015, s. 64) Termofiilisen prosessin vaatima lämmitysenergian tarve on korkeampi kuin mesofiilisen, ja erityisesti kuivämädätyksessä lämmitys ja tasainen lämmön siirtyminen ovat osoittautuneet haasteellisiksi.

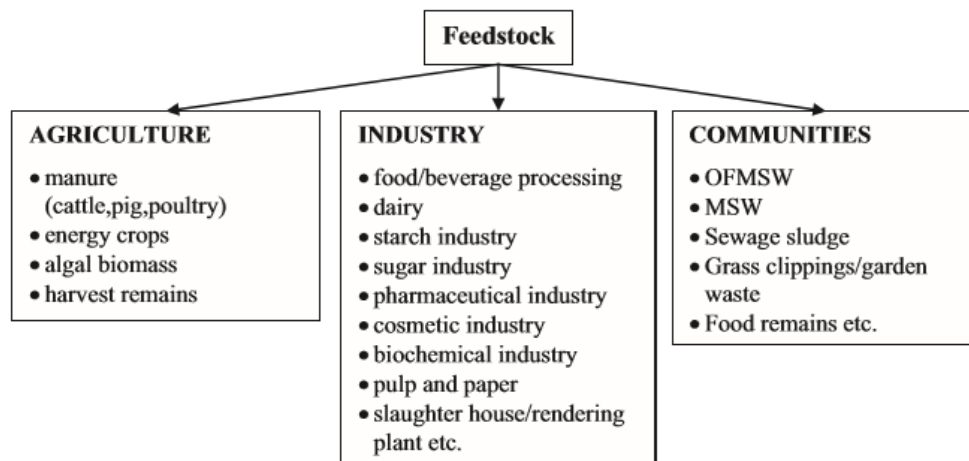
Biokaasuprosessi voi olla myös psykrofiilinen, jolloin prosessilämpötila on välillä 10–25 °C. Psykrofiiliset prosessit ovat hitaita, mutta niitä käytetään lämpimissä ilmasto-olosuhteissa, jolloin ne eivät tarvitse ulkopuolista lämmitystä, mikä laskee niiden käyttökustannuksia. (Cheng, 2010b, s. 157)

4.5 Biokaasutuotannon syötteen

Biomassa on yleisnimitys kaikelle biologiselle materiaalille, ja pitää sisälleen kaiken elävistä organismeista lähtöisin olevan aineksen (Al Seadi, Rutz & Janssen, 2013, s. 19). Biomassoista biokaasutuotannon syötteiksi soveltuvat sellaiset materiaalit, jotka sisältävät runsaasti helposti biohajoavaa ainesta, kuten hiilihydraatteja, proteiineja ja rasvoja. Lähtökohtaisesti syöte soveltuu sitä paremmin biokaasutuotantoon, mitä suurempi osa sen sisältämästä kuiva-aineesta on helposti hajoavaa orgaanista ainesta, ja mitä pienempi osa on epäorgaanista materiaalia tai huonosti hajoavaa materiaalia kuten kuituja. Esimerkiksi metsäbiomassat, jotka sisältävät runsaasti vaikeasti hajotettavaa ligniiniä, eivät sellaisenaan sovellu biokaasutuotannon syötteiksi. (Kymäläinen ym., 2015, s. 21) Kuitenkin myös tällaisia, vaikeammin hajoavaa materiaalia sisältäviä syötteitä voidaan käsitellä

biokaasutuotannossa, mutta ne vaativat esikäsittelyä hajoamisen parantamiseksi (Al Seadi ym., 2008, s. 19).

Biokaasutuotantoon soveltuvat syötteen voidaan jakaa niiden alkuperän perusteella maatalouden biomassoihin, teollisuuden biomassoihin sekä yhdyskuntien biomassoihin (kuva 9). Kestävyyssnäkökulmasta jäteperäiset syötteen ja sivuvirrat ovat parhaita syötteen. (Al Seadi ym., 2013, s. 20)



Kuva 9. Syötteen jaottelu alkuperän perusteella. (OFMSW = organic fractions of municipal solid waste, MSW = municipal solid waste) (Kothari ym., 2014, s. 179)

Biokaasutuotannossa käytettävät biomassat ovat ominaisuuksiltaan hyvin erilaisia, ja kunkin prosessoitavan syötteen kohdalla on tunnettava niiden ominaisuudet ja huomioitava niiden erityispiirteet.

4.5.1 Puhdistamolietteet

Biokaasuprosessia on käytetty Suomessa puhdistamolietteiden stabilointiin jo vuosikymmeniä, ja vanhimmat lietemädättämöt on rakennettu jätevesipuhdistamoiden yhteyteen vuonna 1962. Suurin osa nykyisistä laitoksista on otettu käyttöön 1980-luvulla. Jätevesipuhdistamoiden yhteydessä sijaitsevien laitosten lisäksi lietteitä käsitellään yhteismädätyslaitoksissa. (Huttunen ym., 2018, s. 11; Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020, s. 17)

Puhdistamolietteet soveltuvat hyvin biokaasuprosessiin niiden käsiteltävyyden ja säännöllisen saatavuuden vuoksi. Lietteillä on melko alhainen kuiva-ainepitoisuus, kuivauksenkin jälkeen 10–15 %, ja niistä onkin poistettava vettä, mikäli niitä kuljetetaan puhdistamolialueelle käsiteltäväksi. Yhteismädätyslaitoksille kuljetettavan lietteen kuiva-ainepitoisuus nostetaan mekaanisella kuivauksella ennen kuljetusta 20–30 %:iin. Suomessa lietemädättämissä käsiteltävien lietteiden keskimääräinen kuiva-ainepitoisuus on noin 4 %. (Kymäläinen ym., 2015, ss. 42–43)

Mädätysjäännökseen saattaa joutua puhdistamolietteitä käsiteltäessä haitta-aineita, jotka saattavat rajoittaa mädätysjäännöksen käyttöä lannoitteena. Puhdistamolietteet sisältävät paljon erilaisia kemikaaleja, orgaanisia haitta-aineita, lääkettäjämiä ja mikromuoveja, jotka joutuvat jätevesiin esimerkiksi kotitalouksista. Jätevesivirtaan saattaa joutua myös huulevesiä, joiden mukana mädätysjäännökseen päätyy raskasmetalleja. Puhdistamolietteiden laatu on kuitenkin parantunut viime vuosina, ja puhdistamolietteistä peräisin olevaa mädätysjäännöstä voidaan käyttää lannoitevalmisteisiin, jos mädätysjäännös täyttää lannoitelainsäädännössä asetetut haitta-aineiden rajat. (Paavola ym., 2015, s. 97)

Vaikka puhdistamolietteiden on osoitettu sisältävän ennakoitua vähemmän haitta-aineita ja lainsäädäntö sallisi puhdistamolietteiden käsittelystä peräisin olevan mädätysjäännöksen käytön lannoitevalmisteena, käytön yleistymistä on rajoittanut kielteinen asenne puhdistamolietepohjaisia lannoitevalmisteita kohtaa. Osa viljanostajista on kieltänyt tällaisten lannoitevalmisteiden käytön sopimusviljelijöiden pelloilla. (Vieno ym., 2018, s. 3)

4.5.2 Lannat

Lannoilla on useita ominaisuuksia, jotka tekevät niistä hyviä biokaasuprosessin syötteitä. Lannat sisältävät luonnostaan anaerobiseen hajoamisprosessiin osallistuvia mikrobeja, suuren vesipitoisuutensa vuoksi niitä voidaan käyttää laimentamaan suuremman kuiva-ainepitoisuuden syötteitä, lannat ovat edullisia syötteitä ja ne ovat kestävyysnäkökulmasta hyväksyttävissä. (Al Seadi ym., 2008, s. 18) Lantoja muodostuu säännöllisesti, ne ovat tasalaatuisia, eivätkä ne sisällä haitta-aineita kuten puhdistamolietteet. Lisäksi lannoilla on hyvä puskurikyky, ja ne sisältävät prosessille välttämättömiä hivenaineita.

Lannoilla on yleisesti melko huono metaanintuottopotentiali, koska ne sisältävät energiapitoisia orgaanisia aineita vain rajallisesti. Lantoja käsiteltäessä prosessissa on usein vajetta hiilen lähteistä, ja metaanintuoton parantamiseksi lantojen kanssa käsitellään usein syötteitä, joilla on korkea hiilipitoisuus. (Holm-Nielsen & Oleskiewicz-Popiel, 2013, s. 228; Al Seadi ym., 2008, s. 19)

Turkiseläinten lanta on perinteisesti käsitelty kompostoimalla ja levitetty peltoon. Lannoitekäyttöä rajoittaa kuitenkin lannan korkea fosforipitoisuus, joka johtuu runsasfosforisesta rehusta. Sen hyödyntämisen merkittävimpiä haasteita on turkistuotannon sijoittuminen maantieteellisesti alueelle, jolla on runsaasti muutakin kotieläintuotantoa. Ravinteiden runsas tarjonta vaikeuttaa merkittävästi turkiseläinten lannan käyttöä alueen kasviviljelyn lannoitteena. (Luostarinen ym., 2017, s. 3)

Turkiseläinten lannat sisältävät kuivikkeena käytettävän turpeen, oljen tai kutteripurun lisäksi hiekkaa ja kiviä, eivätkä siksi sovellu prosessoitavaksi

märkämädätysprosessissa kuten kotieläinten lannat. Turkiseläinten lannat soveltuvat kuitenkin kuivämädätysprosessin syötteiksi. Niillä on myös suhteellisen hyvä metaanintuottopotentiaali.

4.5.3 Maatalouden kasvibiomassat ja energiakasvit

Maatalouden kasvibiomassoja muodostuu maatalouden erilaisista sivuvirroista, mutta kasvibiomassoja voidaan kasvattaa myös energiatuotannon tarpeisiin, jolloin puhutaan energiakasveista (Luostarinen ym., 2013, s. 13). Tyypillisiä maatalouden kasvibiomassoja ovat nurmi ja olki, mutta biomassoja syntyy myös mm. naateista ja lajittelujätteistä.

Maatalouden biomassoilla on tyypillisesti melko korkea metaanintuottopotentiaali, ja ne soveltuvat korkean kuiva-ainepitoisuutensa vuoksi hyvin käsiteltäväksi kuivämädätysprosesseissa. Maatalouden biomassat ovat syötteinä puhtaita, jolloin mädätysjäännöksen hyödyntämiselle ei ole rajoitteita. Käytön kannattavuutta biokaasutuotannon raaka-aineina heikentävät kuitenkin korjuusta ja kuljetuksesta aiheutuvat kustannukset. (ProAgraria, n.d., ss. 1–2) Jäteperäisistä syötteistä biokaasulaitos saa yleensä porttimaksuja, mutta mm. nurmesta joudutaan yleensä maksamaan. Vaikka ylimääräistä nurmea olisi saatavilla, aiheuttaa sen korjaaminen ja kuljetus joka tapauksessa kustannuksia. Korjuu lisää myös lannoitustarvetta (Seppälä ym., 2014, ss. 9, 12).

Nurmen kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti välillä 20–25 % ja hiili–typpi-suhde (C/N-suhde) on 10–25 (Al Seadi ym., 2013, s. 21; Korres ym., 2013, s. 200). Nurmilla on yleisesti melko hyvä metaanintuottopotentiaali, mutta vaihtelu on melko suurta riippuen mm. lajikkeesta, korjuuajasta sekä kasvuolosuhteista kuten lämpötilasta ja maan ravinteikkuudesta (McEniry, Korres & O'Kiely, 2013, ss. 51–55). Nurmi on niittotuoreena heikosti säilyvää, joten se edellyttää käytännössä aina säilöntää. Kuivaheinän käyttö on nykyisin vähäistä, ja yleensä nurmi säilötään säilörehuna. Säilöttynä nurmen saatavuus on tasaista, mikä on edullista biokaasutuotannon kannalta. (Seppälä ym., 2014, ss. 9, 12)

Olkea muodostuu viljan viljelyn sivuvirtana. Oljen kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti 86–90 %, josta orgaanista ainesta on 92 %. Myös oljen metaanintuottopotentiaali on kasvibiomassalle tyypilliseen tapaan melko korkea. (Kymäläinen ym., 2015, s. 38) Oljen C/N-suhde on 90, eli olki sisältää runsaasti hiiltä, joten se soveltuu täydentämään vähähiilisiä syötteitä. Olki on korsiintunutta, ja vaatii siksi pidemmän käsittelyajan kuin nurmi. Oljen käsittelyaika on 10–50 päivää, kun se nurmella on noin 10 päivää. (Korres ym., 2013, s. 200)

Energiantuotantoon käytettävien biomassojen kestävyyskriteerit määritetään Uusiutuvan energian direktiivissä (RED II) vuosille 2021–2030. Luonnonvarakeskus (Rasi ym., 2019, s. 27) on tehnyt laskelmia eri tavoin tuotettujen nurmien kasvihuonepäästökertoimista niiden kestävyyskriteerien

täyttymisen arvioimiseksi biokaasutuotannossa. Laskelmissa todettiin, että päästövähennykset tavoitetaan, jos nurmi on alun perin viljelty muuta tarkoitusta varten, esim. viherlannoitusnurmeksi tai nurmea käytetään muiden syötteiden ohessa.

Prosessoitaessa yksinomaan energiakasveja, saattaa kestävyyskriteerien täyttymisen lisäksi ongelmaksi muodostua syötteiden yksipuolisuus, ja siitä johtuva hivenaineiden, kuten kobolttin, nikkelin, molybdeenin ja seleenin puute. Suomessa biokaasun tuotanto yksinomaan energiakasveista ei ole yleistynyt, mutta esimerkiksi Saksassa energiakasvien, erityisesti maisin ja ruohokasvien käyttö biokaasutuotannossa on yleistä. Tällaisiin prosesseihin voi olla kaasuntuoton parantamiseksi hyödyllistä lisätä tarvittavia hivenaineita. (Motiva Oy, 2013, ss. 7–8)

4.5.4 Yhdyskuntabiojätteet

Yhdyskuntabiojäte on kotitalouksissa, kaupoissa, suurtalouksissa ja vastaavissa toiminnoissa syntyvää biohajoavaa jätettä. Biojäte voidaan erilliskerätä syntypaikallaan tai sitä voidaan erottaa sekajätteestä. Biojätteen koostumuksessa on tyypillisesti kausivaihteluita, ja koostumukseen vaikuttaa myös mm. keräyspaikka: onko biojäte peräisin suurtaloudesta vai kotitaloudesta, jolloin seassa saattaa olla mm. puutarhajätettä. (Kymäläinen ym., 2015, s. 39)

Biojätteen kuiva-ainepitoisuus vaihtelee tyypillisesti välillä 20–35 %, ja orgaanisen aineksen osuus kuiva-aineesta on korkea, tyypillisesti 70–90 %. Biojätteillä on hyvä metaanintuottopotentialiaali, ja pH on selvästi hapan, yleensä 4–6. (Kymäläinen ym., 2015, s. 41) Suuri osa biojätteen runsaasti sisältämästä orgaanisesta aineksesta on nopeasti hajoavaa, mikä johtaa massan merkittävään kuiva-ainepitoisuuden laskuun prosessin kuluessa. Tällä on merkitystä erityisesti käsiteltäessä biojätettä jatkuvatoimisessa tulppavirtausperiaatteella toimivassa kuivaprosessissa, jossa kuiva-ainepitoisuuden tulisi olla vähintään 20 %.

Biojätteen kuiva-ainepitoisuus on liian korkea, jotta sitä voitaisiin sellaisenaan käsitellä märkämädätysreaktorissa, jossa kuiva-ainepitoisuus tulee olla 10–15 %. Biojäte käsitelläänkin usein nestemäisemmän jakeen kanssa, jolla kuiva-ainepitoisuus saadaan säädettyä halutulle tasolle. Biojäte on helposti hajoavaa, ja happokäyminen alkaa nopeasti varastosäiliöissä, joten biojätteen pidempiaikainen varastointi ei ole mahdollista. (Luostarinen & Jaakkola, 2015, s. 52)

Biojätteet ovat hyviä biokaasutuotannon syötteitä korkean kaasuntuottopotentialinsa vuoksi. Yhdyskuntabiojätteet sisältävät kuitenkin epäpuhtauksia, kuten muovia, metallia ja lasia, jotka häiritsevät prosessia tai mädätysjäännöksen hyödyntämistä. Yhdyskuntabiojätteet vaativatkin aina esikäsittelyä epäpuhtauksien poistamiseksi. (Luostarinen ym., 2013, s. 13)

4.5.5 Teollisuuden sivuvirrat ja jätevedet

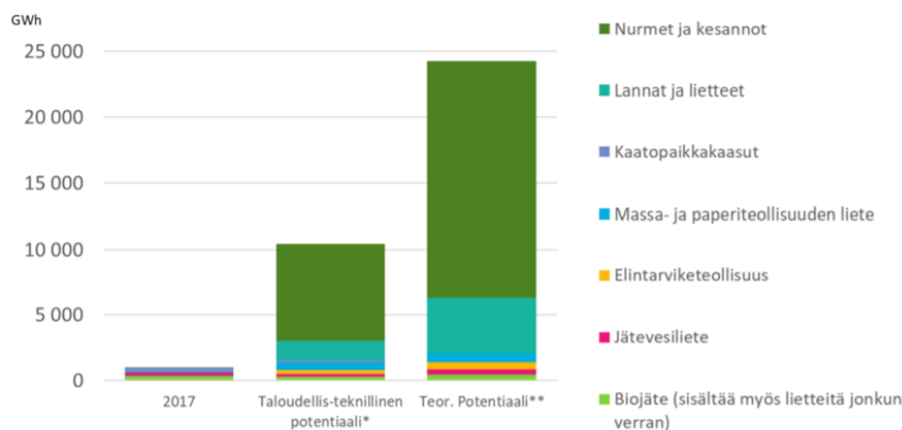
Teollisuudessa syntyy erilaisia sivuvirtoja ja jätevesiä, jotka soveltuvat biokaasutuotannon syötteiksi. Erityisesti elintarviketeollisuuden jätteet soveltuvat hyvin biokaasutuotantoon korkean metaanintuottopotentialinsa vuoksi. (Luostarinen ym., 2013, s. 13)

Teollisuuden sivuvirrat koostuvat erilaisista materiaaleista, mutta yleensä materiaalit ovat tasalaatuisia, ja myös tuotanto on usein tasaista, mikä on edullista biokaasutuotannolle (Kymäläinen ym, 2015, s. 43). Toisaalta teollisuuden sivuvirrat voivat olla koostumukseltaan yksipuolisia, jolloin joistakin ravinteista saattaa olla pulaa tai joitakin aineita voi olla liikaa, jolloin prosessi ei etene optimaalisesti ja metaanintuotto saattaa jäädä vähäiseksi.

Teollisuuden jätevesissä saattaa myös olla merkittävästi metaanintuottopotentialia, mutta jätevesien käsittelyyn tarvitaan erikoistunutta biokaasuteknologiaa, koska jätevesien kiintoainepitoisuudet ovat matalia ja käsiteltävät määrät ovat suuria. Suomen biokaasulaitosrekisterin mukaan Suomessa oli vuonna 2017 neljä teollisuuden jätevesiä käsittelevää laitosta, yksi puunjalostusteollisuuden yhteydessä ja kolme elintarviketeollisuudessa. (Huttunen ym., 2018, s. 14)

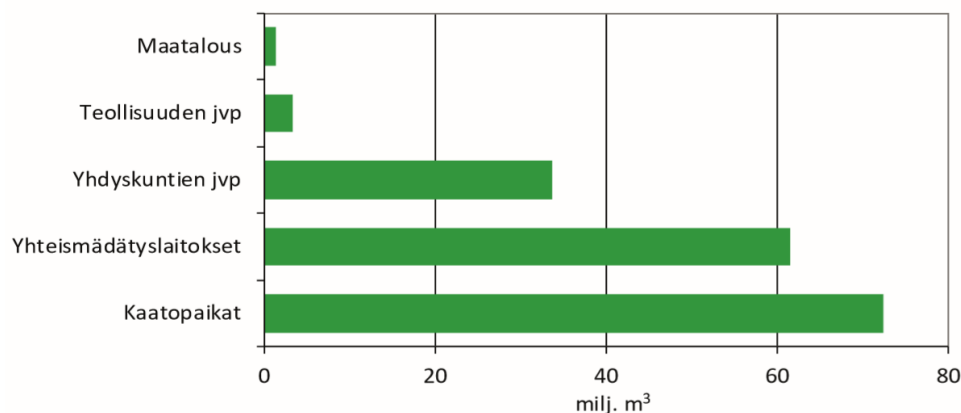
4.5.6 Syötteiden saatavuus ja potentiaali

Suomessa biokaasutuotannon raaka-aineena käytetään pääasiassa puhdistamolietteitä ja orgaanisia yhdyskuntajätteitä. Myös peltobiomassoja käytetään, mutta sekä peltobiomassoissa että lannoissa arvioidaan olevan suuret määrät hyödyntämätöntä potentiaalia. Nykyisin biokaasulla tuotetaan energiaa noin 1 TWh vuodessa, joka on noin 0,3 % energiantuotannosta. Teoreettisen kokonaispotentiaalini arvioidaan olevan 15–20 TWh, mutta arvio taloudellis–teknisestä potentiaalista mädätystekniikalla tuotetulle metaanille on noin 10 TWh (kuva 10). (Kestävä Energiatalous, 2018; Virolainen-Hynnä, 2020, s. 3)



Kuva 10. Biokaasun tuotanto Suomessa eri biomassoista vuonna 2017, taloudellisesti-tekniillinen potentiaali sekä teoreettinen potentiaali. (Virolainen-Hynnä, 2020, s. 8)

Toistaiseksi merkittävä osuus energiana hyödynnetystä biokaasusta kerätään kaatopaikoilta (kuva 11). Kaatopaikkojen kaasutuotanto tulee kuitenkin vähenemään biojätteen kaatopaikkasijoittamisen kiellon tultua voimaan vuonna 2016.



Kuva 11. Biokaasuntuotanto Suomessa vuonna 2017. Yhteismädätyslaitoksissa käsitellään erilaisia syötteitä, kuten jätevesilietteitä ja yhdyskuntien biojätteitä. (Huttunen ym., 2018, s. 9)

Maatalouden osuus tuotetusta biokaasusta on hyvin pieni, mutta potentiaalia arvioidaan olevan selvästi enemmän kuin muilla biomassoilla (taulukko 2). Yhdyskuntien jätevesilietteitä muodostuu runsaasti, noin 4,7 milj. tonnia vuosittain, mutta niiden sisältämä energiapotentiaali on suhteellisen matala. Lisäksi käyttämätöntä potentiaalia on vain vähän, koska jo nykyään jätevesilietteistä noin 80 % käsitellään biokaasulaitoksissa. (Huttunen ym., 2018, s. 11; Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020, s. 17)

Taulukko 2. Arvio biomassojen saatavilla olevista määristä ja energiapotentiaalista biokaasuna. (Mukaeltu lähteestä Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020, s. 14)

Biomassa	Saatavilla oleva määrä (1000 t/a)	Energiapotentiaali biokaasuna (TWh/vuosi)
Kotieläinten lanta	15 500	3,94
Säilörehunurmi	3 485	3,29
LHP ja suojavyöhykkeiden nurmi	1 211	1,22
Olki	2 840	6,76
Yhdyskuntien puhdistamoliete	4 725	0,27
Yhdyskuntien biojäte	357	0,41
Teollisuuden biohajoavat jätteet (pl. Sivutuotteet)	337	0,19

Yhdyskuntabiojätettä arvioidaan muodostuvan vuosittain 0,8 milj. tonnia, josta kierrätetään noin kolmasosa. Erilliskerättyä biojätettä käsiteltiin vuonna 2017 biokaasulaitoksissa noin 130 000 tonnia, josta tuotettiin biokaasuna energiaa noin 0,15 TWh. Biojätteen keräysmääriä nostamalla kokonaispotentiaalini arvioidaan olevan 0,62 TWh. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020, s. 17) Lajittelematon biojäte päättyy sekajätteesseen, ja jätehuoltoyritysten tekemien koostumustutkimusten mukaan sekajätteen painosta noin kolmasosa muodostuu biojätteestä (Suomen Kiertovoima ry, n.d.). Sekajätteesseen päätyvä biojäte on pois biokaasutuotannon raaka-aineesta ja heikentää merkittävästi materiaalina polttoon päätyvän sekajätteen polttoarvoa. Biojätteen erilliskeräystä ja kierrätystä pyritään parantamaan erilaisilla toimenpiteillä, mm. ympäristöministeriön vuonna 2018 julkaisemassa Valtakunnallisessa jätesuunnitelmassa vuoteen 2023 yhdeksi painopistealueeksi on valittu biohajoava jäte, jolle on suunnitelmassa esitetty yksityiskohtaisia tavoitteita. Yhdyskuntajätteen sisältämästä biojätteestä tavoitellaan kierrätettävän 60 % vuoteen 2023 mennessä. (Laaksonen ym., 2018, ss. 12, 18, 21)

Teollisuuden biohajoavia jätteitä on laskettu muodostuvan yli 300 000 tn vuodessa, ja biokaasupotentiaalini arvioidaan olevan 0,19 TWh. Potentiaali on melko matala suhteutettuna kaikkien biomassojen potentiaaliin, mutta teollisuuden, erityisesti elintarviketeollisuuden jätteillä on usein korkea metaanintuottopotentiaali, joten niiden käsittely biokaasulaitoksessa on taloudellisesti kannattavaa.

Nurmea viljellään karjan rehuksi, mutta nurmea muodostuu myös viherkesanto- ja luonnonhoitopelloilla, suojavyöhykkeillä sekä viherlannoitusnurmista. Luonnonhoitopeltojen ja viherkesantojen satoa ei juuri hyödynnetä, ja myös nurmirehulle varattua peltopinta-alaa jää hyödyntämättä, koska etenkin Etelä-Suomessa nautakarjan määrä, ja siten myös säilörehun kulu on vähentynyt. Lisäksi rehuksi päätyvän nurmen viljelypinta-ala arvioidaan yleensä yläkanttiin, jotta rehua saadaan riittävästi myös huonoina

satovuosina. Hyvinä satovuosina ylimääräistä nurmea voitaisiin korjata ja hyödyntää biokaasutuotannossa. Myös edellisvuoden ylijäämänurmissa on käyttämätöntä biokaasupotentiaalia. (Luonnonvarakeskus, n.d.a)

Nurmi suositellaan pidettäväksi viljelykierrossa peltomaan rakenteen ylläpitämiseksi, ja tätä myös tuetaan maataloustukijärjestelmässä erilaisin keinoin. Rehukäytön vähennyttyä nurmelle ei kuitenkaan ole käyttöä, ja nurmelle tulisikin löytää uusia käyttökohteita, jotta nurmen viljelykierrossa pitäminen olisi mielekästä. Biokaasulaitosten heikko kannattavuus rajoittaa nurmen käyttöä, koska biokaasulaitostoimijat joutuvat yleensä maksamaan nurmesta. Kannattavuutta voitaisiin parantaa sopimustuotannolla (Seppälä ym., 2014, ss. 8, 13).

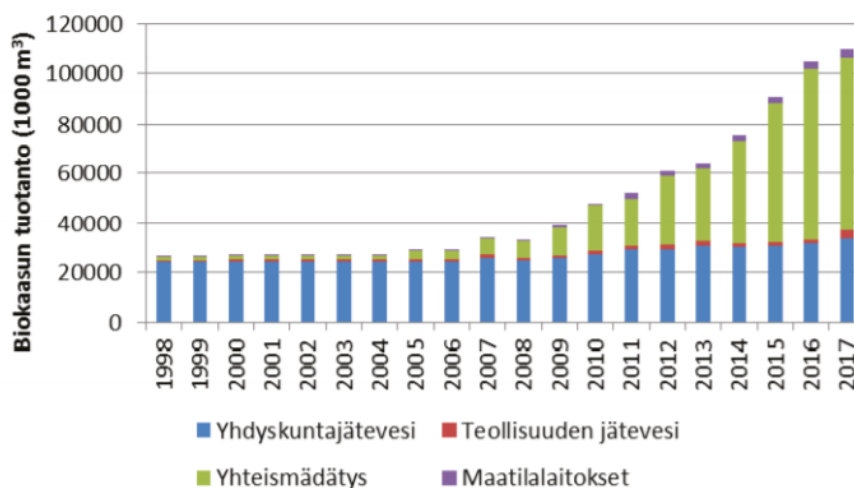
Olki on viljantuotannon sivutuote, joka pääsääntöisesti silputaan sadonkorjuun yhteydessä peltoon. Olkea muodostuu vuosittain lähes 3 000 tn eli yli puolet yhdyskuntien jätevesilietteiden määrästä, mutta biokaasutuotannon energiapotentiaalin arvioidaan olevan noin 25-kertainen verrattuna jätevesilietteiden potentiaaliin. Kaikkea olkea ei kuitenkaan voida kerätä pelloilta energiatuotantoon maan kasvukunnon säilyttämiseksi. Oljen käytössä biokaasutuotannon raaka-aineena on vastaavia ongelmia kuin nurmen käytössä: korjuu ja kuljetus aiheuttavat kustannuksia, jotka heikentävät käsittelyn kannattavuutta.

Kotieläinten lantoja arvioidaan muodostuvan Suomessa vuosittain yli 15 milj. tn, josta prosessoidaan noin 6 %. Biokaasutuotantoon päätyy muodostuvista lannoista arviolta 1,4 %. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020, s. 15) Lannoilla on melko huono metaanintuottopotentiaali, mutta suuren määrän vuoksi lantojen biokaasupotentiaalin arvioidaan olevan 3,94 TWh eli lähes neljä kertaa niin paljon kuin koko biokaasutuotanto on tällä hetkellä. Kannattavuuden vuoksi lannat tulisi käsitellä mahdollisimman lähellä syntypaikkaa. Tämä edellyttää maatilamittakaavan laitosten yleistymistä.

Työ- ja elinkeinoministeriö on laatinut kansallisen biokaasuohjelman, jossa kuvataan biokaasutoimialan nykytilaa ja esitetään toimenpide-ehdotuksia, joilla käyttämätön potentiaali saataisiin hyödynnettyä. (Virolainen-Hynnä, 2020, s. 12)

4.5.7 Syötteiden yhteiskäsittely

Suurin osa reaktorilaitoksissa tuotetusta biokaasusta on nykyään peräisin yhteiskäsittelylaitoksista eli laitoksista, joissa käsitellään samanaikaisesti useampaa kuin yhtä syötettä, kuten jätevesilietteitä ja yhdyskuntabiojätteitä. Yhteiskäsittelylaitokset alkoivat yleistyä 2010-luvun taitteessa (kuva 12), ja ohittivat muutamassa vuodessa kaasuntuotannossa lietemädättämöt.



Kuva 12. Biokaasun tuotantokapasiteetti vuonna 2017 (Winqvist, Rikonen & Varho, 2018, s. 8).

Yksipuolisia syötteitä, kuten yksinomaan kasviperäisiä syötteitä käsiteltäessä metaanintuotto saattaa olla heikko, koska prosessi kärsii välttämättömien ravintoaineiden ja mineraalien puutteesta. Mineraaleja ja ravinteita on riittävästi jätevesilietteissä ja lannoissa, mutta niiden metaanintuottopotentiali on suhteellisen heikko. (Cheng, 2010b, s. 160) Yhteiskäsittely tuottaakin usein enemmän kaasua kuin yhteiskäsittelyn syötteet yksinään. Tämä johtuu siitä, että käsiteltäessä erilaisia syötteitä, seos sisältää todennäköisemmin kaikkia mikrobien kasvuunsa tarvitsemiaan komponentteja, kuten hivenaineita ja sopivassa suhteessa hiiltä ja typpeä. Lisäksi syötteen monipuolinen ravinnekoostumus antaa edellytykset laajakirjoisen mikrobiston kasvuille. Jatkuvatoimissa prosessissa, missä käytetään pitkään yksipuolista syötettä, mikrobit adaptoituvat tämän syötteen hyödyntämiseen, kuten sokerin, eikä prosessi enää kykene pilkkomaan proteiineja tai rasvaa yhtä tehokkaasti, koska näitä hyödyntävät mikrobit häviävät prosessista. (Schnürer ym., 2010, s. 52)

Yhteiskäsittelyn vaikutusta metaanintuottopotentialiin on tutkittu mm. käsiteltäessä lantaa ja nurmirehua. Nurmen lisääminen lannan joukkoon on todettu nostavan metaanintuottoa jopa 100 % verrattuna siihen, että käsiteltäisiin pelkkää lantaa. Paras metaanintuotto todettiin seossuhteella, jossa rehuperäisen orgaanisen aineksen osuus oli 70 %. Tätä korkeammalla rehupitoisuudella prosessin todettiin altistuvan happojen kertymiselle ja pH:n laskulle. (Comino, Rosso & Riggio, 2010, ss. 3014, 3018) Lanta nostaa prosessin puskurikapasiteettia, joka nurmella on heikko. Puskurikyky suojaaa prosessia pH-muutoksilta.

Metaanintuoton ja prosessitasapainon lisäksi yhteiskäsittelyllä voidaan parantaa myös mädätysjännöksen lannoitekäyttöarvoa. Lisättäessä nurmea lannan joukkoon, vähenee fosforin osuus suhteessa typpeen, jolloin mädätysjännöksen lannoitearvo paranee. (ProAgria, n.d., s. 2)

Yhteiskäsittelyssä syöteseoksen vaihtelut saattavat aiheuttaa haasteita, jos käsiteltävänä on kausittain syntyviä biomassoja. Syötekoostumuksen vaihtelut altistavat prosessihäiriöille, ja koostumus tulisi pitää mahdollisimman tasalaatuisena.

4.5.8 Syötteiden esikäsittely

Usein syötteet vaativat esikäsittelyä ennen prosessiin siirtämistä. Erilaisia esikäsittelyjä voidaan tehdä kaasun tuoton parantamiseksi, mutta jotkin käsittelyt voivat olla välttämättömiä prosessin toimivuuden tai lainsäädäntövaatimusten täyttymisen varmistamiseksi. Esikäsittelyn tarkoituksena voi olla syötteen hygienisointi, haitallisten materiaalien poistaminen kuten hiekan ja biojätteiden mukana tulevien muovipussien, pakkausten ja ruokailuvälineiden, syötteen konsentrointi eli ylimääräisen nesteen poistaminen tai metaanintuoton lisääminen parantamalla orgaanisen materiaalin liukoisuutta tai pienentämällä partikkelikokoa. (Schnürer ym., 2010, s. 53)

Lannat soveltuvat usein sellaisenaan biokaasuprosessiin, etenkin, jos käsittely tapahtuu samalla tilalla tai tilan välittömässä läheisyydessä, eikä nestejakeen erottamista edellytetä kuljetuskustannusten madaltamiseksi. Nestettä voidaan poistaa lingolla, ruuvi- tai suotonauhapuristimella, joita käytetään yleisesti runsaasti nestettä sisältävien puhdistamolietteiden esikäsittelyinä. Lantoja käsiteltäessä märkäprosessissa ongelmaksi saattaa muodostua kuivikkeena käytetty olki, joka saattaa tukkeuttaa pumpput ja kietoutua sekoituslapoihin. Jos olki on silputtu jo ennen kuivikkeena käyttöä, ei lantaa enää tarvitse käsitellä. Silppuaminen parantaa myös kaasuntuottoa, koska pienempi partikkelikoko suurentaa mikrobien mahdollista tartuntapinta-alaa ja parantaa näin substraattien käytettävyyttä. Partikkelikoko voi määräytyä myös lainsäädännön vaatimuksista, jos hygienisointikäsittely tehdään jo syötteille tai prosessin aikana. Ennen prosessia tehty, lämpöön perustuva hygienisointikäsittely toimii myös orgaanisen aineksen hajoamista helpottavana esikäsittelyinä. (Luostarinen ym., 2015, ss. 48, 53; Schnürer ym., 2010, s. 54)

Runsaasti vaikeasti hajotettavaa lignoselluloosaa, pääasiassa selluloosaa, hemiselluloosaa ja ligniiniä, sisältäviä syötteitä käsiteltäessä hydrolyysi voi muodostua prosessin etenemistä rajoittavaksi vaiheeksi. Lignoselluloosa saadaan hajotettua sopivalla esikäsittelyllä muotoon, jossa se on hydrolyyttisten bakteerien hajotettavissa. Lignoselluloosan esikäsittelyinä käytetään mm. hienontamista sekä entsyymaattisia käsittelyitä. Esikäsittelyä lignoselluloosan hajottamiseksi käytetään esimerkiksi käytettäessä syötteenä maissia. Lignoselluloosaa voidaan hajottaa myös kemikaaleilla tai lämmön avulla, mutta näillä toimenpiteillä saattaa olla haitallisia vaikutuksia syötteen sisältämiin muihin ainesosiin, kuten haitallisten sivutuotteiden muodostumiseen tärkkelyksestä. (Neureiter, 2013, s. 69)

Metaanintuoton parantamiseksi on kehitetty myös useita muita menetelmiä. Metaanintuottoa voidaan parantaa fysikaalisilla, kemiallisilla ja

biologisilla menetelmillä. Fysikaalisia menetelmiä ovat edellä käsitellyn mekaanisen murskaamisen lisäksi lämpö- ja painekäsittelyt sekä sähköön perustuvat menetelmät. Kemiaalisia menetelmiä ovat happo- ja emäskäsittelyt sekä erilaisten liuotainaineiden käyttö. Biologiin menetelmiin kuuluvat entsyymaattiset menetelmät ja mikrobien hyödyntämiseen perustuvat menetelmät. Esikäsittelyssä voidaan myös yhdistää erilaisia menetelmiä. (Bochmann & Montgomery, 2013, s. 85)

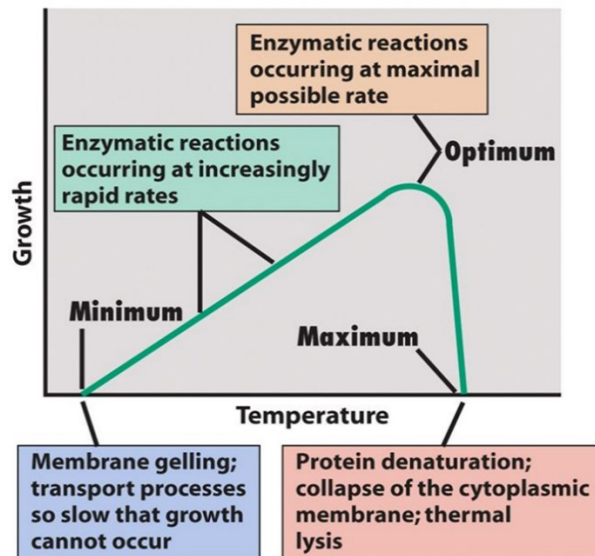
Esikäsittelymenetelmiä on tutkittu paljon pienessä mittakaavassa, mutta laitosmittakaavan tutkimusta on vasta vähän. Monet esikäsittelytekniikat ovat kalliita, eivätkä ne välttämättä nosta prosessin kokonaiskannattavuutta. (Bochmann ym., 2013, s. 85) Esimerkiksi maissirehun hienontaminen 2 mm kokoisiksi partikkeleiksi lisää metaanintuottoa, mutta hidastaa sadonkorjuuta, lisää energiankulutusta ja nostaa kuljetuskustannuksia. Huomioiden kokonaiskustannukset, optimaalisen koon arvioidaan olevan 7–8 mm. (Neureiter, 2013, s. 72)

4.6 Prosessin toimintaedellytykset ja inhiboivat tekijät

Biokaasun muodostuminen on monimutkaisen mikrobiologisen prosessin tulos, kuten aiemmin luvussa 4.3. on kuvattu. Lukemattomat eri mikrobit ovat osallisena prosessissa, ja tuottaakseen biokaasua, niiden yhteistyö tulee olla saumatonta. Jotta biokaasuprosessia osataan hallita oikein, tulee ymmärtää prosessin mikrobistoa ja sen toimintaa. (Schnürer ym., 2010, s. 6)

4.6.1 Lämpötila

Lämpötila on mikrobien kasvulle todennäköisesti tärkein ympäristötekijä. Mikrobit eivät pysty kasvamaan liian korkeissa, eivätkä liian matalissa lämpötiloissa. Kullakin lajilla on niille ominainen lämpötila-alue, jossa niiden kasvu on mahdollista. Lämpötila-alueesta voidaan erottaa kolme kriittistä lämpötilaa: matalin lämpötila, missä kasvu on mahdollista, optimilämpötila, missä kasvu on nopeinta sekä maksimilämpötila, jonka ylittyessä kasvu pysähtyy (kuva 13). Lämpötilan ollessa minimilämpötilaa matalampi, solukalvo geeliiytyy estäen molekyylien siirtymisen solukalvon läpi. Lämpötilan noustessa entsyymien toiminta nopeutuu, kunnes saavutetaan maksimilämpötila, jossa elintärkeät proteiinit, kuten entsyymit denaturoituvat. Tyypillisesti mikrobit pystyvät kasvamaan 25–40 asteen vaihteluvälillä optimilämpötilan ollessa lähellä maksimilämpötilaa. Vaihteluväli on tyypillisesti suurempi mesofiilillä kuin termofiilillä mikrobeilla. (Madigan ym., 2012, s. 162)



Kuva 13. Mikrobin kasvun kriittiset lämpötilat. (Madigan ym., 2012, s. 162)

Käytännössä biokaasuprosessit toimivat joko mesofiilisellä (n. 30–40 °C) tai termofiilisellä (n. 50–60 °C) lämpötila-alueella. Yli 60 °C:n lämpötiloissa metaania tuottavien mikrobin toiminta heikkenee suhteessa enemmän kuin happoja tuottavien, mikä johtaa haihtuvien rasvahappojen kertymiseen prosessissa. (Schnürer ym., 2010, s. 10)

Biokaasuprosessin lämpötila tulisi pysyä mahdollisimman tasaisena. Yleisenä ohjeistuksena on, ettei prosessin lämpötila saisi vaihdella enempää kuin ± 2 °C. Mesofiiliset prosessit eivät ole yhtä herkkiä lämpötilavaihteluille kuin termofiiliset prosessit, ja mesofiilisten prosessien on osoitettu sietävän ± 3 °C:n lämpötilavaihteluita. Toisaalta termofiilisessä prosessissa jo ± 2 °C vaihtelu saattaa johtaa 30 % biokaasutuotannon laskuun. Termofiilisille prosesseille onkin suositeltu, että lämpötilavaihtelu pysyisi $\pm 0,5$ °C:n rajoissa, tai ei vaihtelisi ainakaan enempää kuin ± 1 °C. (Korres ym., 2013, s. 209; Schnürer ym., 2010, s. 31)

Tutkijat ovat osoittaneet, että noin 10 % mesofiilisen biokaasuprosessin mikrobeista on termofiilejä. Tämän vuoksi mesofiilinen prosessi voidaan muuttaa termofiiliseksi. Termofiilisen prosessin mikrobistossa sen sijaan on nk. termotolerantteja lajeja, joiden optimilämpötila on mesofiilisellä lämpötila-alueella, mutta ne eivät inaktivoidu korkeammassakaan lämpötiloissa. Tämän vuoksi myös termofiilisen prosessin voi muuttaa mesofiiliseksi, kunhan mikrobit saavat riittävästi aikaa adaptoitua. (Schnürer ym., 2010, s. 11)

Lämpötilalla on monin tavoin vaikutusta myös prosessiolosuhteisiin, kuten mikrobin käytettävissä oleviin mikro- ja makroravinteisiin sekä lämpötilan mukaan muuttuvien metaboliareittien kautta prosessin kemialliseen koostumukseen. (Cieslik ym., 2016, s. 1500)

Anaerobisessa hajoamisessa suurin osa sen tuottamasta energiasta sitoutuu metaaniin, eikä prosessi juuri tuota lämpöä. Siksi prosessi yleensä aina vaatii ulkopuolisen lämmönlähteen, jotta mikrobien kasvu olisi optimaalista. (Schnürer ym., 2010, s. 31)

4.6.2 Hiili–typpisuhde

Mikrobit tarvitsevat energiatuotantaansa ja aineenvaihduntaansa makro- ja mikroravinteita. Biokaasuprosessin syötteen soveltuvuutta arvioitaessa kiinnitetään erityisesti huomiota hiili–typpisuhteeseen (C/N-suhde). Jos C/N-suhde on liian korkea eli typpipitoisuus on liian matala suhteessa hiilipitoisuuteen, johtaa se proteiinituotannon laskuun ja metabolian hidastumiseen eli substraattien hajottamisen tehottomuuteen ja kaasuntuotannon heikkenemiseen. Liian matala C/N-suhde eli korkea typpipitoisuus taas saattaa johtaa prosessin pH:n nousuun ja ammoniakki-inhibitioon. Mikrobien on yleisesti todettu kuluttavan hiiltä 25–30 kertaa nopeammin kuin typpeä. (Korres ym., 2013, s. 210)

C/N-suhteelle ei voida antaa yhtä tiettyä tavoitearvoa, vaan C/N-suhteessa voi olla prosessien välillä suuria eroja prosessin toimiessa tästä huolimatta hyvin. Kirjallisuudessa on esitetty sopivan C/N-suhteen olevan välillä 10:1–45:1, ja kaasun tuoton kannalta optimaaliseksi suhteeksi esitetään lähteestä riippuen 15–25:1 tai 20–30:1. (Drosg, Braun & Bochmann, 2013, s. 78; Kymäläinen ym., 2015, s. 26; Kothari ym., 2014, s. 183)

Käytännössä syötteiden suhdeluvut voivat olla toimivissa biokaasuprosesseissa vaihdella vieläkin enemmän, ollen välillä 5–50:1. Sekä hiili että typpi voivat olla sitoutuneena sellaisiin yhdisteisiin, joissa ne eivät ole mikrobien käytettävissä. Esimerkiksi ligniinipitoisissa syötteissä hiili ei ole mikrobien käytettävissä, joten korkeakaan suhde ei suoraan kerro typen puutteesta. Näissä tapauksissa C/N-suhteesta ei suoraan voida arvioida syötteen soveltuvuutta. (Kymäläinen ym., 2015, s. 26)

Ravinteiden saannin lisäksi tyypellä on merkitystä prosessin puskurikykyyn. Typpipitoiset syötteen parantavat prosessin puskurikykyä eli prosessissa tapahtuvat happo–emäsmuutokset tulevat neutraloiduksi, eivätkä vaikuta pH-arvoon. Vakaa pH on tasapainoisen prosessin edellytys. (Banks & Heaven, 2013, s. 142)

Myös mädätyksen eri vaiheille, hydrolyysille ja metanogeneesille on esitetty toisistaan poikkeavia optimaalisia hiili–typpisuhteita. Hydrolyysivaiheessa vaihtelu voi olla suurempaa, mutta metanogeneesissä suhde tulisi olla välillä 20:1–30:1. (Drosg ym., 2013, s. 78; Kymäläinen ym., 2015, s. 26)

4.6.3 pH ja alkaliteetti

Prosessin pH riippuu lähtökohtaisesti syötteiden ominaisuuksista, lämpötilasta sekä prosessissa muodostuvista happamista ja emäksisistä hajoamistuotteista sekä hiilidioksidista. Tasapainoisen prosessin pH asettuu tyypilliselle tasolle, ja pysyy suhteellisen muuttumattomana. Poikkeukselliset pH-muutokset kertovat prosessin epätasapainosta. pH vaikuttaa monin eri tavoin prosessiolosuhteisiin, sen mikrobistoon ja metaboliareitteihin. Biokaasuprosessin pH on tyypillisesti lähellä neutraalia, välillä 7–8. (Kymäläinen, 2015, s. 65)

Yksivaiheinen biokaasuprosessi toimii tietyllä, kullekin prosessille tyypillisellä pH-alueella, mutta eri mikrobien pH-optimit vaihtelevat huomattavasti. Anaerobit mikrobit voidaan jakaa kahteen ryhmään pH-optimin mukaisesti: asidogeenien pH-optimi on välillä 5,5–6,5 ja metanogeenien välillä 7,8–8,2. Yksivaiheisissa prosesseissa, joissa kaikki mikrobit toimivat samassa ympäristössä, sopivin pH on välillä 6,8–7,4. Metanogeenit ovat herkempiä pH-vaihteluille kuin asidogeeniset mikrobit, ja metanogeenien toiminta häiriintyy pH:n laskiessa välille 6,5–6,0. Metanogeenien toipuminen pH-muutoksista ja metaanintuoton palautuminen lähtötasolle on hidasta. (Khanal, Factors, 2008c, s. 47)

Prosessin pH:n lasku on seurausta happojen kertymisestä prosessiin, ja se on vaarana erityisesti silloin, kun käsitellään syötteitä, jotka sisältävät paljon nopeasti hajoavaa ainesta. Silloin substraatin pilkkoutuminen eli hydrolyysi tapahtuu metanogeneesiä nopeammin, prosessiin kertyy vetyä ja haihtuvia rasvahappoja, ja tämä johtaa pH:n laskuun. (Comino ym., 2010, s. 3015) Happojen kertymisestä aiheutunut pH-lasku voi johtua myös metanogeneesin inhiboimisesta. pH:ta sen sijaan nostaa proteiinipitoisten syötteiden hajoamisesta muodostuva ammoniumtyyppi, mikä on normaali ilmiö hajoamisprosessin edetessä (Al Seadi ym., 2008, s. 26). Syötteiden pH onkin tyypillisesti matalampi kuin mädätysjäännöksen.

Myös lämpötila vaikuttaa prosessin pH-arvoon. Hiilidioksidi liukenee paremmin veteen matalammassa lämpötiloissa eli mesofiilisessä prosessissa liuennutta hiilidioksidia on enemmän kuin termofiilisessä prosessissa. Liuennut hiilidioksidi muodostaa veden kanssa hiilihappoa, ja laskee näin prosessin pH:ta. Termofiilisessä prosessissa liuennutta hiilidioksidia on vähemmän, joten myös pH on tyypillisesti mesofiilistä prosessia korkeampi. (Al Seadi ym., 2008, s. 26)

pH vaikuttaa myös yhdisteiden esiintymismuotoon prosessissa. Yleisesti yhdisteiden ionisoitumattomat muodot ovat mikrobeille toksisia, mutta eri yhdisteet esiintyvät ionisoitumattomissa muodoissaan eri pH-arvoissa. Haihtuvilla rasvahapoilla ionisoitumattomat muodot alkavat vallita pH:n laskiessa alle 6:een. Toisilla yhdisteillä, kuten ammoniumtyyppillä, ionisoitumattoman muodon eli ammoniakkin (NH_3) osuus lisääntyy pH:n noustessa. Ammoniakki on matalinakin pitoisuuksissa toksinen erityisesti

metanogeeneille, ja pH:n noustessa yli 8:aan, saattaa metanogeenien toiminta romahtaa ammoniakki-inhibition vuoksi. (Murphy ym., 2013, s. 110)

pH:lla on merkitystä myös prosessin metaboliareitteihin, kuten haihtuvien rasvahappojen muodostumiseen. Mesofiilisessä prosessissa pH-väli 4,0–4,5 suosii propionaatin ja etanolin muodostumista, pH-arvon ollessa noin 5,5, muodostuu pääasiassa asetaattia, propionaattia, butyraattia ja etanolia, pH-välillä 6,0–6,5 päätuotteet ovat asetaatti ja butyraatti ja pH 8 on suotuisa asetaatin ja propionaatin muodostumiselle. (Cheng, 2010b, s. 160)

Anaerobisella mädätysprosessilla on syötekoostumuksesta riippuen vaihteleva määrä alkaliteettia eli puskurikykyä, eli kykyä neutraloida happojen ja emästen vaikutusta, ja estää näiden aiheuttamia pH-muutoksia. Happojen tai emästen kertyessä prosessiin, puskurijärjestelmä neutraloi muutokset, mutta puskurikapasiteetin ylittyessä pH muuttuu jyrkästi ja prosessi inhiboituu. Tämän vuoksi prosessissa tapahtuvat häiriöt näkyvät aiemmin muutoksina alkaliteetissä kuin pH:ssa, ja pH:n onkin yksinään riittämätön parametri prosessitasapainon seurantaan. (Al Seadi ym., 2008, s. 26)

Prosessin puskurikyky koostuu pääasiassa bikarbonaatista, jota muodostuu runsaasti orgaanista tyypeä sisältävien proteiinipitoisten syötteiden hajotessa. Hajoamisessa vapautuu ammoniumtyyppiä, joka reagoi hiilidioksidin kanssa muodostan alkaliteettia nostavaa bikarbonaattia. Alkaliteettia muodostuu myös rikki-pitoisista syötteistä, mutta hiilihydraattipitoisia syötteitä käsittelevän prosessin alkaliteetti on usein matala, jolloin prosessi on herkempi pH-muutoksille. (Korres ym., 2013, s. 211)

Prosessitasapainon kannalta olisi suotuisaa, että alkaliteetti olisi vähintään 6 000 mg(CaCO₃)/l, mutta mielellään yli 8 000 mg(CaCO₃)/l (Scherer, 2007). Käytännössä alkaliteetti vaihtelee huomattavasti prosesseittain, pitoisuuksien ollessa välillä 2 000–13 000 mg(CaCO₃)/l (Kymäläinen, 2015, s. 66).

Kuten edellä on esitetty, alkaliteetti auttaa neutraloimaan happoja. Siksi prosessitasapainon seuraamiseksi voidaan tarkkailla myös haihtuvien rasvahappojen (VFA, kuvattu seuraavassa luvussa) ja alkaliteetin suhdetta. Suhdeluku nousee, kun happojen määrä lisääntyy ja alkaliteetti vähenee. Mitä pienempi suhde, sitä enemmän prosessilla on puskurikykyä suhteessa happojen määrään.

VFA/alkaliteetti-suhteella voidaan arvioida prosessitasapainoa:

< 0,3	Stabiili prosessi
0,3–0,5	Vähäinen epästabiilisuus
> 0,5	Merkittävä epästabiilisuus

(Kymäläinen, 2015, s. 79)

Yleensä ensisijainen keino prosessihäiriöstä johtuvaan pH-laskuun on vaikuttaminen happojen kertymiseen, mikä yleisimmin korjataan rajoittamalla syöttöä. Joskus pH:ta voi olla tarpeellista säätää kemikaaleilla, jolloin pH:n nostoon voidaan käyttää natrium- tai kaliumbikarbonaattia tai karbonaattia. pH:ta voidaan joutua myös laskemaan, johon voidaan käyttää esimerkiksi rautakloridia tai sitraattia. Kemikaaleja ei käytetä yleisesti pH:n säätöön laitospittakaavan prosesseissa. (Kymäläinen, 2015, ss. 79–80)

4.6.4 Haihtuvat rasvahapot

Haihtuvat rasvahapot (VFA, Volatile Fatty Acids) ovat anaerobisen hajoamisketjun välituotteita, joita muodostuu asidogeneesin lopputuotteina, ja jotka metaboloidaan edelleen hajoamisketjun seuraavissa vaiheissa. Haihtuvat rasvahapot ovat lyhyistä, 2–6 hiilen ketjuista muodostuneita orgaanisia happoja, ja anaerobisessa hajoamisprosessissa niistä esiintyy suurimpina pitoisuuksina asetaattia, propionaattia ja butyraattia, mutta lisäksi myös mm. isobutyraattia, valeraatti ja isovaleraattia. (Khanal, 2008c, s. 58)

Haihtuvien rasvahappojen määrä on yksi oleellisimmista prosessin tasapainoa osoittavista tekijöistä. Useimmat anaerobisen mädätysprosessin ongelmista johtuvat haihtuvien rasvahappojen kertymisestä prosessiin, ja tämän aiheuttamasta pH:n laskusta. Metanogeenien kasvu alkaa inhiboitua pH-arvossa 6,6, mutta haihtuvia rasvahappoja tuottavien asidogeenisten bakteerien toiminta jatkuu pH-arvoon 4,5–5,0. Tämä aiheuttaa rasvahappojen nopean kumuloitumisen prosessiin, koska niitä tuotetaan prosessiin vielä silloinkin, kun niitä ei voida enää käsitellä seuraavassa hajoamisen vaiheessa. (Murphy ym. 2013, s. 110) Orgaanisen kuormituksen sääntely on ensisijainen keino hallita haihtuvien rasvahappojen pitoisuutta prosessissa. Myös syötekoostumus vaikuttaa rasvahappojen kertymisalttiuteen. Jos syöte sisältää nopeasti hajoavaa orgaanista materiaalia, hydrolyysi tapahtuu nopeasti ja metanogeneesistä muodostuu rajoittava vaihe, mikä saattaa johtaa happojen kertymiseen. (Holm-Nielsen ym., 2013, ss. 229–230) Ongelmaa voidaan helpottaa lisäämällä helposti hajoavaa materiaalia sisältävään syöteseokseen hyvän puskurikapasiteetin syötteitä, kuten lantaa, jolloin happojen kertyminen ei johda niin herkästi pH-muutokseen. (Karthikeyan & Visvanathan, 2013, s. 274)

Ohjeelliseksi haihtuvien rasvahappojen määräksi on esitetty pitoisuuksia välillä 1 000–4 000 mg/l (Korres ym., 2013, s. 208). Prosessit, joilla on hyvä puskurikyky, voivat toimia korkeilla VFA-pitoisuuksilla, jolloin happojen vaikutus saadaan neutraloitua, eivätkä ne aiheuta muutosta pH:ssa (Banks ym., 2013, s. 142). Haihtuvien rasvahappojen pitoisuudelle ei kuitenkaan voida asettaa tiettyjä raja-arvoja, koska saman pitoisuuden on todettu toisissa prosesseissa inhiboivan prosessia ja toisten prosessien on todettu sietävän hyvin vastaavia pitoisuuksia (Al Seadi ym., 2008, s. 26).

Vaikka haihtuvien rasvahappojen kertymisestä aiheutuvat ongelmat liittyvät ensisijaisesti niiden aiheuttamaan pH:n laskuun, voivat haihtuvat

rasvahapot olla prosessissa myös toksisia. pH:n laskiessa alle 6:een, muuttuu haihtuvien rasvahappojen esiintymismuoto vähemmän haitallisesta ionimuodosta ionisoitumattomaan muotoon, jolloin VFA:t voivat suoraan olla mikrobeille toksisia. Esimerkiksi korkeammissa pH-arvoissa etikkahappo esiintyy ionimuodossaan asetaattina, mutta pH:n laskiessa, se muuttuu toksiseen etikkahappomuotoon. (Kymäläinen, 2015, s. 79)

Haihtuvista rasvahapoista asetaatti on suoraan metanogeenien substraatti, ja prosessista muodostuvasta metaanista noin 70 % tuotetaan asetaatista (Khanal, 2008b, s. 31). Yksittäisistä haihtuvista rasvahapoista asetaattipitoisuuden nousu saattaa indikoida ammoniakki-inhibitiota. Tilanne johtuu siitä, että ammoniakki-inhibitiolle herkemmat asetilaktiset metanogeenit inhihoituvat, ja asetaatin kulutus lakkaa. Tilanne voi korjaantua ajan kuluessa, jolloin asetilaktiset metanogeenit alkavat korvautua hydrogenotrofisilla, ja ei-metaania tuottavat mikrobit alkavat muuttaa asetaattia hiilidioksidiksi ja vedyksi, ja pitoisuus palautuu vähitellen normaalille tasolle. (Banks ym., 2013, s. 149)

Asetaatin nouseminen yli 2 000 mg/l ja kokonais-VFA:n yli 8 000 mg/l on todettu vaikuttavan yleisesti prosessiin. (Karthikeyan ym., 2013, s. 274) Toisaalta Kothari ym. (2014, s. 134) toteavat artikkelissaan havaitun inhibiovaikutuksen astetaattipitoisuuden ollessa > 5 000 mg/l. Myös lämpötilalla on VFA-pitoisuuteen nostava vaikutus, ja termofiilissä prosesseissa onkin todettu mesofiilisiä prosesseja korkeampia VFA-pitoisuuksia (Nguyen ym., 2017, ss. 450–451). Prosessin ylösajovaiheessa on tyypillistä, että VFA-pitoisuudet ovat korkeammat kuin vakaan operoinnin vaiheessa.

Metanogeeneille haitalliseksi propionaattipitoisuudeksi on kirjallisuudessa esitetty arvoja 0,9–1,1 g/l, mutta inhibitoraja voi olla merkittävästi korkeampi. Prosessin pH vaikuttaa propionaatin inhihoivaan vaikutukseen, ja sen on todettu olevan merkittävämpi alhaisissa pH-arvoissa. Myös muiden haihtuvien rasvahappojen, kuten butyraatin lisääntymisen on todettu johtavan propionaatin inhihoivaan vaikutukseen matalammissa pitoisuuksissa. (Cieslik ym., 2016, s. 1499; Wang, Zhang, Wang & Meng, 2009, s. 849)

Liian suuresta kuormituksesta aiheutuva haihtuvien rasvahappojen kertyminen on yksi yleisimmistä biokaasuprosesseissa esiintyvistä häiriöistä. Rasvahappojen kertymistä voidaan hillitä vähentämällä kuormitusta, mutta myös hapen syöttämistä prosessiin on tutkittu yhtenä keinona mataltaa VFA-pitoisuutta. Hapen läsnä ollessa fakultatiivisesti anaerobiset mikrobit käyttävät VFA:t metaboliaansa ja näin vähentävät prosessin VFA-pitoisuutta. (Khanal, 2008c, s. 49)

4.6.5 Ammoniumtyppi

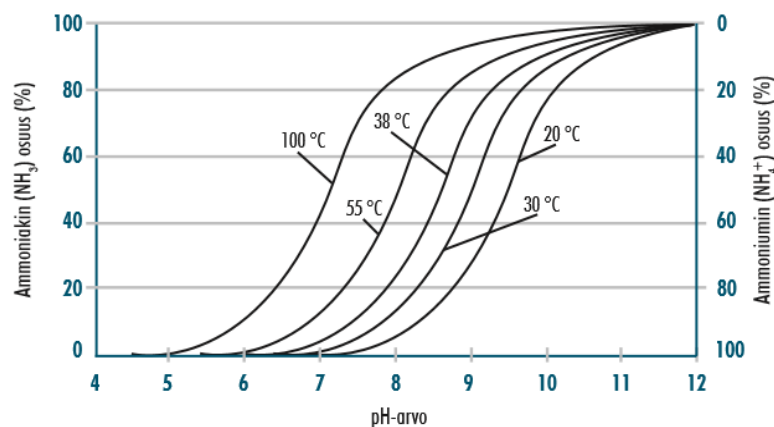
Ammoniumtyppi on anaerobisen hajoamisen sivutuote, jota muodostuu pääasiassa proteiinien ja urean, eli typpirikkaiden substraattien hajotessa. Ammoniumtyppi on epäorgaaninen typen muoto, joka esiintyy biokaasuprosessissa ammoniumionina (NH_4^+) ja vapaana ammoniakkinä (NH_3). Ammoniumtypen määrä voi olla melko korkea prosessin häiriintymättä, mutta vapaa ammoniakki on toksinen jo melko matalina pitoisuuksina, koska se pystyy tunkeutumaan ionimuotoa tehokkaammin mikrobien sisään häiriten solun sisäisiä metaboliareittejä. (Cheng, 2010b, ss. 167–168)

Typen määrä ei muutu biokaasuprosessissa, mutta osa orgaanisesta typestä hajoaa ammoniumtypeksi eli tapahtuu ammonifikaatiota (ts. typen liukoistumista eli mineralisoitumista). Ammonifikaation määrä prosessin aikana riippuu mm. syötteistä, prosessilämpötilasta ja viipymääjasta. Prosessoitaessa lehmän lantaa mesofiilisessä lämpötilassa, kokonaistypestä noin 20 % muuttuu prosessin aikana ammoniumtypeksi. Matala ammonifikaatio johtuu siitä, että ammonifikaatiota on jo tapahtunut lehmän ruoansulatusjärjestelmässä. Sian lannalla ammonifikaatio on suurempaa kuin lehmän lannalla. Kasvibiomassoilla ammonifikaatio on suurinta, ja orgaanisesta typestä jopa 50–80 % muuttuu ammoniumtypeksi. Prosessin termofiilisyyden nostaa ammonifikaation määrää. (Paavola ym., 2015, s. 95)

Ammoniumtypen inhibitiota aiheuttavan vaikutuksen on esitetty voivan alkavan pitoisuuksilla 1,5–3,0 g/l, mutta inhiboiva pitoisuus voi poiketa tästä huomattavasti. Prosessin on todettu toimivan jopa pitoisuudella 8,5 g/l, mutta toisaalta inhibitiota saattaa ilmetä jo pitoisuudella 1,4 g/l. Tasapainoisessa prosessissa tyypillinen ammoniumtyypipitoisuus on välillä 3–5 g/l. Vapaan ammoniakkin inhiboiva vaikutus alkaa huomattavasti matalammissa pitoisuuksissa, ja vapaalle ammoniakille on esitetty viitearvoja väliltä 30–100 mg/l, josta yleisesti sovelletaan viitearvoa < 80 mg/l. Suuri vaihteluväli viitearvoissa johtuu mikrobien kyvystä adaptoitua suuriinkin ammoniakkipitoisuuksiin. Muutokset tulee kuitenkin tapahtua riittävän hitaasti, jotta adaptoituminen ehtii tapahtua. Nopeat muutokset syötteen tyypipitoisuudessa ovat mikrobeille haitallisia. (Drosg ym., 2013, s. 79; Kymäläinen, 2015, s. 68)

Mikrobien herkkyys ammoniumtypen toksisuudelle vaihtelee eri mikrobilajien välillä, ja esimerkiksi mesofiilisille metanogeenille ammoniumtypen on todettu olevan toksinen pitoisuudessa 3 g/l, kun pH on 7,4 tai yli, mutta termofiiliset metanogeenit inhiboituvat jo pitoisuudessa 2,2 g/l (Korres ym., 2013, s. 213). Inhibitioraja riippuu myös syötteiden koostumuksesta. Tutkimuksissa on osoitettu, että maatalousbiomassoja prosessoitaessa VFA ja ammoniumtyypipitoisuudet voivat olla merkittävästi korkeampia kuin jätevesipuhdistamoiden lietteitä prosessoitaessa. Maatalousbiomassoja käsittelevien laitosten VFA-pitoisuudet olivat yleisesti tasoa 3 000 mg/l ja ammoniumtyypipitoisuudet vaihtelivat välillä 2–6 g/l. (Madsen, Holm-Nielsen & Esbensen, 2011, s. 3145)

Prosessoitessa typpipitoisia syötteitä, kuten lantoja, ammoniakki-inhibitiota esiintyy biokaasuprosesseissa yleisesti (Drosg ym., 2013, s. 79). Prosessin lämpötila ja pH vaikuttavat vapaan ammoniakin ja ionimuotoisen ammoniakin suhteellisiin osuuksiin siten, että lämpötilan ja pH:n noustessa mikrobeille toksisemman vapaan ammoniakin osuus kasvaa (kuva 14) (Cheng, 2010b, s. 168). Tämän vuoksi termofiilinen prosessi, jonka lämpötila ja pH ovat korkeampia kuin mesofiilisen prosessin, on alttiimpi ammoniakki-inhibitiolle (Al Seadi ym., 2008, s. 24).



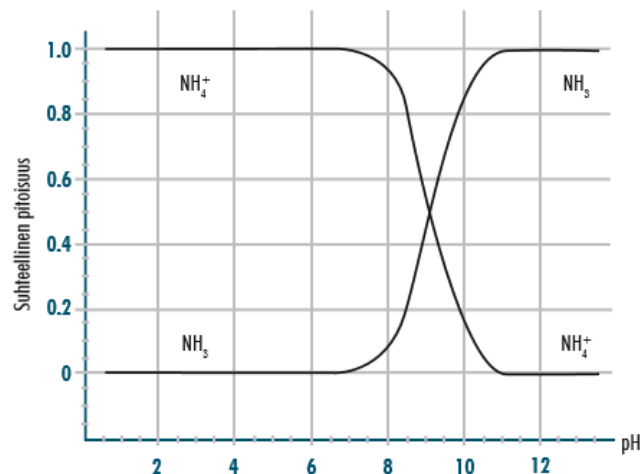
Kuva 14. pH:n ja lämpötilan vaikutus vapaan ammoniakin ja ionimuotoisen ammoniumin suhteellisiin osuuksiin. (Paavola ym., 2015, s. 103)

Ammoniumtyppimääritys ei erottele vapaan ja ionimuotoisen ammoniakin suhteellisiä osuuksia, vaan vapaan ammoniakin osuus kokonaisammoniumtypestä on laskennallinen. Ammoniakkipitoisuus saadaan laskettua kaavalla:

$$\frac{\text{Free } NH_3}{\text{Total } NH_3} = \left(1 + \frac{10^{-pH}}{10^{-\left(0,09018 + \frac{2729,92}{T(K)}\right)}} \right)^{-1}$$

(Banks ym., 2013, s. 142)

Lämpötilan vaikutus vapaan ja ionimuotoisen ammoniakin suhteellisiin osuuksiin on lineaarinen, mutta pH:n muutos aiheuttaa osuuskien jyrkän vaihtumisen tietyllä pH-alueella (kuva 15), joka riippuu lämpötilasta. Lämpötilan nousu siirtää vapaan ammoniakin osuuden nousua matalampaan pH-arvoon. Biokaasuprosessin kannalta olisi edullista, että massan pH pysyisi matalampana, kuin jyrkän pitoisuusmuutoksen pH-alue.



Kuva 15. Vapaan ammoniakkin (NH_3) ja ionimuotoisen ammoniumtyypin (NH_4^+) suhteellisten osuuksien muutos pH:n muuttuessa. (Kymäläinen, 2015, s. 68)

Ammoniakki inhiboi etenkin metanogeeneja, jonka seurauksena prosessiin kertyy haihtuvia rasvahappoja, koska inhiboituneet metanogeenit eivät ehdi kuluttaa happoja tasapainossa niiden muodostumisen kanssa. Haihtuvien rasvahappojen kertyminen laskee prosessiin pH:ta, jolloin ammoniakkin suhteellinen osuus ammoniumtyyppistä vähenee, joten myös inhibitiivaikutus pienenee. Tästä voi kehittyä vakaa tila, jossa prosessi toimii tasapainossa, mutta madaltuneella metaanintuottokyvyllä. Tutkimuksissa on todettu, että prosessi toipuu vain harvoin tällaisesta ”steady-state” -tilasta, mutta heikentyneitä metaanintuottoa voidaan kompensoida pidentämällä viipymäaika. (Cheng, 2010b, s. 168; Karthikeyan ym., 2013, s. 276)

Metanogeeneistä asetilaktisten eli asetaatista metaania tuottavien lajien on todettu inhiboituvan matalammissa ammoniakkipitoisuuksissa kuin hydrogenotrofisten metanogeenien. Prosessin adaptoituminen kohonneisiin pitoisuuksiin johtuu osittain metaanin muodostumisreitin muuttumisesta siten, että metaania ei tuoteta suoraan asetaatista, kuten normaalisti suurin osa metaanista muodostuu, vaan vedystä ja hiilidioksidista. Korkeissa ammoniakkipitoisuuksissa, kun asetilaktiset metanogeenit ovat inhiboituneet, metaania muodostuu asetaatista syntrofisen asetaatin hapettumisen kautta eli asetaatti muutetaan ensin vedyksi ja hiilidioksidiksi, ja tämän jälkeen hydrogenotrofisten metanogeenien toimesta metaaniksi. Tämän vaihtoehdoisen reitin kehittymisen on todettu alkavan muodostua ammoniakkipitoisuuksissa 128–330 mg/l. Syntrofiseen asetaatin hapettumiseen osallistuvat mikrobit kasvavat selvästi hitaammin kuin asetilaktiset metanogeenit, joten prosessi, jossa metaani tuotetaan pääasiassa tämän vaihtoehdoisen reitin kautta, vaatii pitkän, yli 30 vrk viipymäajan. Lisäksi syntrofinen asetaatin muuttaminen vedyksi ja hiilidioksidiksi edellyttää matalaa vedyn osapainetta, jota metanogeenit ylläpitävät. (Schnürer ym., 2010, ss. 21, 56–58)

Adaptoituneet prosessit voivat sietää 700 mg/l pitoisuuksia vapaata ammoniakkia, mutta mikäli prosessi ei ole adaptoitunut, voivat jo 100–150 mg/l pitoisuudet inhiboida prosessia (Khanal, 2008c, s. 56). Prosessoitavissa biojätettä asetilaktisten metanogeenien korvautumisen hydrognotrofisilla metanogeenilla on todettu alkavan vapaan ammoniakkipitoisuuden noustessa pitoisuuteen noin 500 mg/l. Ilmiö on todettu samanaikaisesti sekä mesofiilisessä että termofiilisessä prosessissa. (Banks ym., 2013, s. 142) Termofiilisten prosessien on joissakin tutkimuksissa todettu sietävän korkeampi ammoniakkipitoisuuksia kuin mesofiilisten prosessien (Karthikeyan ym., 2013, s. 277).

4.6.6 Sulfaatit ja sulfidit

Rikkivetyä muodostuu rikkiyhdisteiden hajotessa anaerobisessa prosessissa. Kuten ammoniakkin kohdalla, myös rikkiyhdisteet aiheuttavat inhibitiota liukoisessa muodossaan eli rikkivetyä (H_2S). Kirjallisuudessa rikkivedylle on esitetty erilaisia inhibitorajoja välillä 30–400 mg/l. Joissakin tutkimuksissa rikkivedyn inhiboivaa vaikutusta on todettu jo pitoisuudessa 30 mg/l, mutta toisaalta on todettu, ettei inhibitiota yleensä esiinny pitoisuuden ollessa alle 100 mg/l. Inhibitorajaan vaikuttaa käytännön kokemuksen mukaan myös muiden inhibitiota aiheuttavien tekijöiden läsnäolo, kuten korkea ammoniakkipitoisuus tai matala rautapitoisuus. Rikkivety on toksisempi < 7 pH:ssa, jolloin rikkivedyn toksisemmän muodon esiintyminen suhteessa vähemmän toksiseen ionimuotoon on suurempi. (Drosg ym., 2013, s. 80; Kymäläinen, 2015, ss. 68–69)

Mikäli syötteessä on runsaasti sulfaattia, metaanintuotto voi heikentyä myös sulfaattia pelkistävien mikrobin kilpaillessa asetogeenien ja metanogeenien kanssa samoista substraateista, asetaatista ja vedystä. Sulfaattia pelkistävillä mikrobeilla on korkeampi pelkistyspotentiaali, ja ovat siksi edullisemmassa asemassa asetaatin hyödyntämisessä. Lisäksi sulfaattia pelkistävät mikrobit hapettavat vetyä termodynaamisesti edullisemmin kuin hydrogenotrofiset metanogeenit. (Cheng, 2010b, s. 169)

Rikki voi olla prosessille haitallista myös siksi, että S^{2-} -muoto saostaa metalli-ioneja heikentäen niiden biosaatavuutta. Tämä saattaa johtaa mikrobeille välttämättömien hivenaineiden puutteeseen. (Drosg ym., 2013, s. 80) Saostumista voidaan toisaalta myös hyödyntää lisäämällä prosessiin rautaioneja käsiteltäessä rikkipitoisia syötteitä, jolloin rautaionit saostavat rikin ja ehkäisevät haitallisen rikkivedyn muodostumista (Kymäläinen, 2015, s. 80).

4.6.7 Pitkaketjuiset rasvahapot

Pitkaketjuisia rasvahappoja (LCFA, Long Chain Fatty Acids), joiden hiiliketjuissa on vähintään 14–16 hiiltä, muodostuu prosessin hydrolyysivaiheessa rasvan hajotessa. Pitkaketjuisia rasvahappoja ei metaboloida asidogeneesissä, vaan ne pilkkotaan asetogeneesissä hiilidioksidiksi, vedyksi ja asetatiiksi syntrofissa metanogeenien kanssa. (Kymäläinen, 2015, s. 69)

Rasvoilla on erityisen hyvä metaanintuottopotentiaali, mutta korkeina pitoisuuksina niistä muodostuvat pitkaketjuiset rasvahapot ovat haitallisia prosessille. Kumuloituminen on vaarana, kun prosessoidaan rasvapitoisia syötteitä, kuten rasvakaivojätettä tai elintarviketeollisuuden sivuvirtoja. Inhibitorajan on esitetty asettuvan 0,2–0,5 g/l välille. Kuten monessa muussakin tilanteessa, myös pitkaketjuisten rasvahappojen osalta termofiilisen prosessin on todettu inhiboituvan herkemmin kuin mesofiilisen prosessin. (Kymäläinen, 2015, s. 69)

4.6.8 Makro- ja mikroravinteet

Mikrobisolut koostuvat pääasiassa hiilestä (C), hapesta (O), typestä (N), vedystä (H), fosforista (P) ja rikistä (S). Näistä hiili, typpi, fosfori ja rikki muodostavat mikrobien kasvulle välttämättömät pääravintoaineet. Lisäksi solut sisältävät mineraaleista kaliumia (K), natriumia (Na), kalsiumia (Ca), magnesiumia (Mg), kloridia (Cl) ja rautaa (Fe) sekä hivenaineita kuten booria (B), alumiinia (Al), vanadiinia (V) ja sinkkiä (Zn) (taulukko 3). (Cheng, 2010a, s. 142; Kymäläinen ym., 2015, s. 27) Mikrobisolut saavat nämä ravintoaineet substraateista eli biokaasutuotannossa prosessin syötteistä.

Taulukko 3. Mikrobisolun alkuainekoostumus (mukaeltu lähteestä Cheng, 2010a, s. 143).

ALKUAINE	% KUIVA-AINEESTA
Hiili (C)	50
Happi (O)	20
Typpi (N)	14
Vety (H)	8
Fosfori	3
Rikki (S)	1
Kalium (K)	1
Natrium (Na)	1
Kalsium (Ca)	0,5
Magnesium (Mg)	0,5
Kloridi (Cl)	0,5
Rauta (Fe)	0,2
Hivenaineet	0,3

Syötteen sisältämistä makroravinteista erityisesti hiiltä ja typpeä tulee olla riittävästi ja oikeassa suhteessa mikrobien optimaalisen kasvun varmistamiseksi. Yleisesti typpeä ja fosforia voidaan olettaa olevan syötteissä riittävästi saatavilla, mutta yksipuolisia syötteitä prosessoitaessa, kuten teollisuuden jätevesiä, saattaa näistä olla puutetta. (Drosg ym., 2013, s. 78) Myös rikkiä on yleensä riittävästi saatavilla, sopivaksi C/S-suhteeksi on esitetty noin 600:1. Syötteen liian matala rikkipitoisuus on epätodennäköinen, mutta liian korkea rikkipitoisuus saattaa vaikuttaa systeemin metaboliareitteihin. (Banks ym., 2013, s. 143)

Mikrobit tarvitsevat entsyymitoimintansa ylläpitämiseen tiettyjä mikroravinteita eli hivenaineita. Metanogeeneille välttämättömiksi hivenaineiksi on osoitettu mm. nikkeli (Ni), koboltti (Co), molybdeeni (Mo), rauta (Fe), seleeni (Se) ja wolframi (Wo). Hydrolyyttisten bakteerien on taas todettu tarvitsevan mm. sinkkiä (Zn), kuparia (Cu) ja mangaania (Mn) (Drosg ym., 2013, s. 78). Suoloista hajoamisprosessiin osallistuville mikrobeille ovat välttämättömiä kalium, kalsium, magnesium, kloridi ja sulfaatti-ionit (Murphy ym., 2013, s. 111).

Hivenaineita on yleensä riittävästi saatavilla yhteiskäsittelyprosesseissa, erityisesti jos mukana on lantaa. Käsiteltäessä yksipuolisia syötteitä, kuten kasvubiomassoja tai teollisuuden sivuvirtoja, saattaa prosessi sen sijaan kärsiä hivenainepuutteesta. Näissä tilanteissa lisäämällä prosessiin puuttuvia hivenaineita, voidaan parantaa metaanintuottoa ja saavuttaa vaakaampi prosessi. (Drosg ym., 2013, s. 78; Schnürer ym., 2010, s. 9)

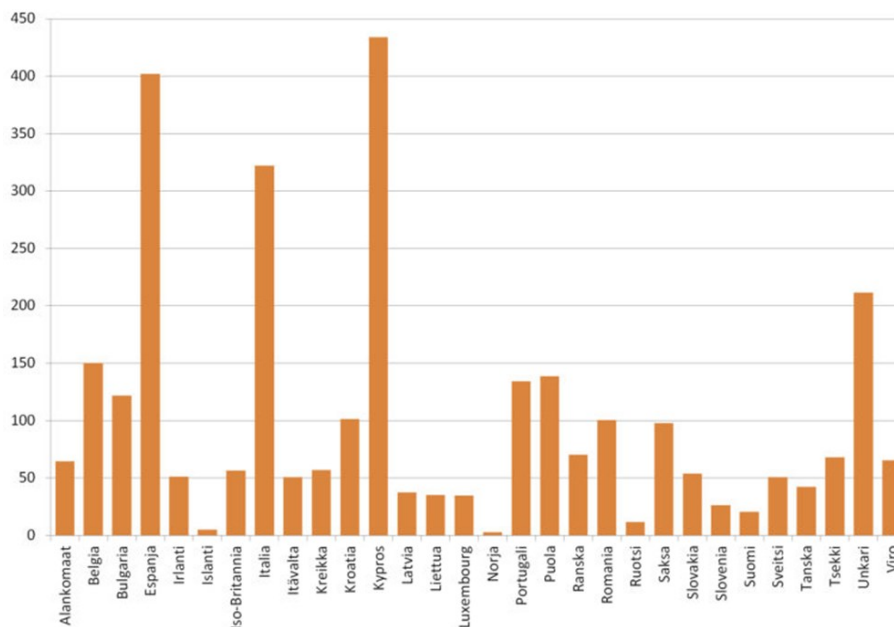
Syötteiden hivenainepitoisuudet on melko helppo analysoida, mutta ongelmana on määrittää niiden biosaatavuus, eli ovatko hivenaineet mikrobien käytettävissä (Drosg ym., 2013, s. 78). Hivenaineet muodostavat herkästi liukenemattomia saostumia sulfidien, karbonaattien ja fosfaattien kanssa, jolloin mikrobit eivät voi hyödyntää niitä. Muodostuvien saostumien vuoksi on myös vaikea antaa ohjeellisia annostusmääriä lisättäessä hivenaineita prosessiin. (Banks ym., 2013, s. 143)

Monet välttämättömät hivenaineet voivat olla mikrobeille toksisia korkeina pitoisuuksina. Tiettyjä viitearvoja on kuitenkin vaikea asettaa, koska inhibiovaikutus riippuu monista eri seikoista, kuten pH:sta ja mikrobien adaptoitumisesta. Eri tutkimuksissa on osoitettu tietyille hivenaineinakin toimiville metalleille seuraavat matalimmat pitoisuudet, joissa inhiboivaa vaikutusta on todettu: Cu 40 mg/l, Cd 20 mg/l, Zn 150 mg/l, Ni 10 mg/l, Pb 340 mg/l ja Cr 100 mg/l. (Drosg ym., 2013, s. 80)

4.6.9 Antibiootit ja desinfiointiaineet

Antibioottien ja desinfiointiaineiden tarkoitus on tappaa mikrobeja tai estää niiden kasvu. Antibiootteja saattaa esiintyä lannoissa ja muissa eläinperäisissä jätteissä. Desinfiointiaineita sen sijaan voi joutua esimerkiksi pesuvesien mukana elintarviketeollisuuden jätevesiin. (Drosg ym., 2013, s. 80)

Suurina pitoisuuksina syötteiden mukana biokaasuprosessiin päätyvät antibiootit ja desinfiointiaineet saattavat häiritä prosessin mikrobiston toimintaa. Tilastojen perusteella Suomessa tuotantoeläinten lääkitseminen mikrobilääkkeillä on eurooppalaisittain hyvin maltillista. Vuoden 2016 tilaston mukaan Euroopassa eläinyksikköä kohden myyty mikrobilääkemäärä vaihteli välillä 3–453 mg/PCU (milligrammaa vaikuttavaa ainetta populaatiokorjausyksikköä kohti) Suomen käyttömäärän ollessa 19 mg/PCU (kuva 16). Näin ollen mikrobilääkejäämien aiheuttaman inhibition todennäköisyys Suomessa on vähäinen. (Luonnonvarakeskus, n.d. b)



Kuva 16. Tuotantoeläinten määrään suhteutettu mikrobilääkkeiden kokonaismyynti 30 EU/EEA maassa vuonna 2016 (mg/PCU, milligrammaa vaikuttavaa ainetta populaatiokorjausyksikköä kohti) (Luonnonvarakeskus, n.d. b).

Mikrobilääkkeiden käyttö on ollut Suomessa tiukasti säädeltyä jo vuosikymmenten ajan, ja esimerkiksi eläinten ryhmälääkitys on Suomessa vähäistä. Euroopassa ryhmälääkitys on yleistä, ja suurin osa käytetyistä antibiooteista onkin annettu eläinryhmille. Mikrobilääkkeiden käyttöä on kuitenkin rajoitettu myös Euroopassa, ja maailmanlaajuisesti mikrobilääkkeiden käyttö tuotantoeläimille on monissa maissa huomattavasti massiivisempaa kuin Euroopassa. (Luonnonvarakeskus, n.d. b)

4.7 Prosessiolosuhteiden optimointi ja hallinta

Biokaasutuotannon optimoinnilla voidaan tarkoittaa metaanintuoton optimointia, mutta laajemmassa käsityksessä biokaasutuotannon optimointia voidaan tarkastella taloudellisena ja ympäristön kannalta kestäväenä jätteen käsittelyn menetelmänä ja uusiutuvan energian tuotantona. (Banks ym., 2013, s. 132) Tässä yhteydessä käsitellään prosessiolosuhteiden optimointia lähinnä prosessin vakauden ja mikrobien toiminnan kannalta.

4.7.1 Yleistä syötteiden soveltuvuuden arvioinnista

Biokaasulaitoksen rakentamisen edellytys on, että soveltuvaa syötettä on saatavilla. Syötteen saatavuutta arvioitaessa on huomioitava kuljetuskustannukset, joista saattaa muodostua merkittävä kuluera. Erityisesti matalan kuiva-ainepitoisuuden syötteitä, kuten lietteitä, ei ole kannattavaa kuljettaa muutamia kilometrejä kauemmaksi. Kuljetuskustannuksia voidaan pienentää poistamalla nestejätettä, mutta samalla saatetaan menettää osa metaanintuottopotentiaalista. Edullisinta on, jos syötteet voidaan käsitellä mahdollisimman lähellä syntypaikkaansa. (Luostarinen ym., 2013, s. 42)

Monipuolinen syötekoostumus takaa laajakirjoisen mikrobiston ja parantaa näin prosessin metaanintuottokykyä. Mikrobiston tasapainoisen kasvun kannalta on kuitenkin tärkeää, ettei syötteen koostumus vaihtelee liikaa. (Schnürer ym., 2010, s. 6) Tämän vuoksi syötteiden optimoinnissa tulee huomioida myös suunniteltujen syötteiden mahdolliset kausivaihtelut. Kausittain syntyviä syötteitä voi olla tarpeellista varastoida, tai jos varastointi ja käsittely myöhemmin ei ole mahdollista, tulee prosessi sopeuttaa syötemuutoksiin. (Drosg ym., 2013, s. 55)

Joissakin tilanteissa syötteen lämpötila voi olla huomioitava tekijä. Kylmissä ilmasto-olosuhteissa erityisesti vesipitoisten syötteiden lämmittäminen vaatii paljon energiaa ja heikentää näin biokaasuprosessin kannattavuutta. Toisaalta syötteet, esimerkiksi teollisuuden sivuvirrat, voivat joissakin tilanteissa olla liian kuumia, ja vaativat jäähdyttämistä ennen reaktoriin syöttämistä, jotta prosessin mikrobisto ei vahingoitu. (Drosg ym., 2013, s. 55)

Syötteellä tulee olla myös sopiva kuiva-ainepitoisuus, jotta syöte soveltuu käsiteltäväksi prosessissa kohtuullisella esikäsitteilyllä. Syötteillä saattaa olla myös muita esikäsitteilytarpeita, kuten raekoon pienentäminen, haitta-aineiden ja vierasesineiden poistaminen ja biohajoavuuden parantaminen. Erilaiset esikäsitteilyt lisäävät kustannuksia. (Drosg ym., 2013, ss. 54–57)

Syötteissä esiintyvät haitalliset aineet, kuten lääkejäämät ja haitalliset orgaaniset yhdisteet saattavat rajoittaa mädätysjäännöksen lannoitekäyttöä. Haitallisten yhdisteiden esiintymistä on tutkittu kattavasti keskitettyjen, mm. jätevesilietteitä, elintarviketeollisuuden sivuvirtoja ja

erilliskerättyä biojätettä käsittelevien biokaasulaitosten mädätysjäännöksistä. Erilaisia haitallisia yhdisteitä ja lääkeaineita esiintyy yleisesti kaiken tyyppisiä syötteitä käsittelevien laitosten mädätysjäännöksissä. Pitoisuuksien ei ole voitu osoittaa aiheuttavan merkittävää riskiä elintarviketurvallisudelle, mutta haitallisten yhdisteiden vaikutuksista ei kaikilta osin ole riittävän kattavaa tutkimusta, joten kemikaalien ympäristökuormitusta tulisi rajoittaa, ja välttää kemikaalien joutumista jätevesiin ja biojätteisiin. (Marttinen ym., 2014, s. 56)

Laitoksen kannattavuuden kannalta on oleellista, joudutaanko syötteistä maksamaan vai saako laitos niistä porttimaksuja. Peltobiomassojen käyttö aiheuttaa laitokselle yleensä kustannuksia, mutta jäteperäisistä syötteistä laitokset saavat porttimaksuja. Nykyisin huomiota tulee kiinnittää yhä enemmän myös syötteiden kestävyyskriteereihin. Velvoitteita hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen tulee maailmanlaajuisista sitovista sopimuksista, Euroopan unionin säädöksistä sekä kansallisista toimeenpanosäädöksistä. Näillä pyritään tukemaan biokaasutuotannon lisäämistä, mutta samalla rajoittamaan peltopinta-alan käyttöä syötteiden tuottamiseen.

4.7.2 Syötteestä tehtävät analyysit

Arvioitaessa syötteen ominaisuuksien soveltuvuutta biokaasutuotantoon, tietoa on saatavilla runsaasti kirjallisuudesta. Kuitenkin monien syötteiden koostumus riippuu tuotanto- tai muodostumisympäristöstä ja yhteiskäsitelyssä eri syötteiden käyttäytyminen prosessissa saattaa vaikuttaa toinen toisiinsa. Siksi kirjallisuudesta saatavia tietoja voidaan käyttää syötteiden soveltuvuuden alustavaan arviointiin, mutta prosessin suunnittelu vaatii lähes aina laboratoriossa tehtäviä syöteanalyyskejä. Syötteen soveltuvuuden arvioinnin lisäksi syöteanalyyskejä tarvitaan prosessin riskientunnistukseen, prosessin seurantasuunnitelman ja siihen liittyvien analyysitulosten tueksi.

Keskeisiin syöteanalyysseihin kuuluvat pH, kuiva-ainepitoisuus (TS, Total Solids), orgaaninen kuiva-ainepitoisuus (VS, Volatile Solids), kemiallinen hapenkulutus (COD, Chemical Oxygen Demand), kokonaistyyppi, ammoniumtyppi (NH₄ -N) ja metaanintuottopotentiaali. Lisäksi tarpeen mukaan analysoidaan orgaanista hiiltä, rikkiä, fosforia ja hivenaineita. Syötteen energiapitoisuuden arvioimiseksi yleensä riittää, että määritetään joko VS tai COD. VS-pitoisuuden määrittämistä käytetään kiinteille ja lietemäisille syötteille, ja COD määrittämistä käytetään vesipitoisille syötteille. Metaanintuottopotentiaalia määrittävä BMP-testi on yksi perusanalyysistä syötteiden ominaisuuksia arvioitaessa, mutta testi sisältää useita epävarmuuskijöitä. Parhaiten syötteen käyttäytymistä biokaasulaitoksessa voidaan arvioida jatkuvatoimisella fermentaatiokokeella. Tällaiset kokeet ovat kuitenkin melko kalliita suuren analyysimäärän ja kokeen viemän ajan vuoksi. (Drosg ym., 2013, s. 81)

Syötteen pH on perusanalyysi. pH vaihtelee syötetyypeittäin, ja esimerkiksi biojäte on happamampi syöte kuin lannat. Prosessin puskurikapasiteetin vuoksi tavanomaisia syötteitä käsiteltäessä prosessi kestää normaalit pH-vaihtelut. Vaikka syötteiden pH-arvolle ei ole varsinaista tavoitearvoa, on arvo hyvä tietää prosessin seurannan vuoksi. Prosessin aikana pH tyypillisesti nousee.

Kuiva-ainepitoisuus määritetään syötteen soveltuvuuden arvioimiseksi kyseiselle reaktorityypille. Märkäprosessissa kuiva-ainepitoisuus voi olla enintään 15 %, jotta massa pysyy pumpattavana. Kuivaprosesseissa TS-pitoisuus tulee olla 20–40 %. Matalammat kuiva-ainepitoisuudet altistavat raskaamman aineksen sedimentoitumiseen ja korkeammat pitoisuudet heikentävät mikrobien kontaktia substraatteihin. (Kothari ym., 2014, s. 178) Jatkuvatoimisessa tulppavirtausprosessissa liian alhainen kuiva-ainepitoisuus lisäksi vaarantaa prosessin etenemisen tulppavirtausperiaatteella.

VS/TS-suhde kuvaa orgaanisen aineksen osuutta kuiva-aineesta, ja mitä suurempi VS/TS-suhde on ja mitä helpommin hajoavaa orgaaninen aines on, sitä paremmin syöte soveltuu biokaasutuotantoon. Biojätteen VS/TS on korkea, tyypillisesti 70–90 % (Kymäläinen ym., 2015, s. 40). Lietemädättämöillä suhde on matalampi, tyypillisesti hieman alle 70 % (Kymäläinen, 2015, s. 75). Orgaanisen kuormituksen laskeminen perustuu syötteen VS-pitoisuuteen, joten myös siksi VS on oleellinen syöteanalyysi. VS-määritys kuuluu lisäksi mädätysjäännösanalyysiin, jolla arvioidaan, kuinka paljon mädätysjäännöksessä on jäljellä orgaanista ainesta. Syötteen ja mädätteen VS-vähenemä on tyypillisesti 45–55 % (Coyne, Wilson, Scarborough & Umble, 2017, s. 4). Pienempi vähenemä saattaa antaa viitteitä prosessihäiriöstä tai liian lyhyestä viipymääjasta.

COD kuvaa näytteen kemiallisesti hapetettavissa olevan materiaalin määrää eli osoittaa syötteen maksimaalisen kemiallisen energiapitoisuuden. COD-analyysi on herkkä virheille useiden näytteenkäsittelyvaiheiden vuoksi. Myös huolimaton näytteenotto epähomogeenisesta materiaalista johtaa virheelliseen tulokseen. (Drosg ym., 2013, s. 62)

Syötteen tyypipitoisuus määritetään yleensä Kjeldahl -menetelmällä. Tyypipitoisuudesta voidaan viitteellisesti arvioida prosessin aikana muodostuvan ammoniumtyypin määrää. Karkeana arvioina voidaan pitää, että biokaasuprosessin aikana 60–80 % kokonaistypestä muuttuu ammoniumtypeksi. Yleensä syötteen ammoniumtyypipitoisuus antaa vain viitteellistä informaatiota, koska prosessissa pitoisuus nousee huomattavasti proteiinien hajotessa. Testin perusteella voidaan kuitenkin arvioida syötteen proteiinipitoisuutta. Määrityksessä ei tule mitatuksi kaikkea tyyppiä, kuten syötteissä olevien nitraattien ja nitriittien sisältämää tyyppiä, mutta niiden pitoisuudet ovat käytännössä merkityksettömiä. (Drosg ym., 2013, s. 63)

Orgaanisen hiilen määrittäminen kuuluu perusanalyysiin, ja sitä tarvitaan syötteen hiili–typpisuhteen laskemiseen. Orgaaninen hiili antaa täsmällistä tietoa syötteen hiilipitoisuudesta, mutta se ei kerro hiilen biohajoavuudesta eli kuinka paljon hiiltä on todellisuudessa mikrobien käytettävissä. Esimerkiksi puupohjaiset materiaalit sisältävät paljon hiiltä, mutta suuri osa hiilestä on sitoutuneena lignoselluloosaan, jolloin hiili ei ole mikrobien käytettävissä.

Hiili- ja typpipitoisuuksien suhde (C/N-suhde) on syötteen soveltuvuuden arvioinnin perusmittareita, joka antaa viitteitä siitä, sisältääkö syöte näitä makroravinteita sopivassa suhteessa. Kuten aiemmin on todettu, suhde ei kuitenkaan kerro ravinteiden biosaatavuudesta.

Metaanintuottotestillä (BMP) voidaan arvioida metaanintuottopotentiaalia. Testi tuottaa tietoa myös syötteen anaerobisesta hajoamisasteesta sekä mahdollisista inhiboivista tekijöistä. (Drosg ym., 2013, s. 63)

Syötteen rikkipitoisuus on hyvä määrittää syötteestä tietyissä tapauksissa, mutta se ei aina ole tarpeellista. Korkea rikkipitoisuus saattaa johtaa prosessissa korkeaan H_2S -pitoisuuteen, mikä voi johtaa mikrobien inhibitioon. Rikkipitoisuus on syytä määrittää korkean typpipitoisuuden syötteistä, koska NH_3 :lla ja H_2S :llä on prosessissa synergistinen vaikutus, ja jo kohtalaisilla rikkipitoisuuksilla prosessi saattaa häiriintyä. Lisäksi rikkivety heikentää lopputuotteenä syntyvän biokaasun laatua ja saattaa heikentää sen käytettävyyttä. Korkea rikkipitoisuus saattaa aiheuttaa ongelmia käsitellessä korkean sulfaattipitoisuuden tislauksjätteitä ja teollisuuden jätevesiä. (Drosg ym., 2013, s. 69)

Fosforipitoisuus voidaan myös määrittää syötteestä, mutta se on harvoin tarpeellista, koska yleensä voidaan olettaa, että syöte sisältää riittävästi fosforia mikrobien tarpeisiin. Fosforipitoisuuden määrittäminen mädätysjäännöksestä on perustellumpaa arvioitaessa mädätysjäännöksen lannoitearvoa. (Drosg ym., 2013, s. 69)

Käytettäessä yksipuolisia syötteitä, joiden hivenainepitoisuudet ovat matalia tai joista joitakin hivenaineita puuttuu kokonaan, voidaan syötteestä tehdä hivenainemäärityksiä. Määritystulokset eivät kuitenkaan suoraan kerro, ovatko hivenaineet sellaisessa muodossa, että ne ovat mikrobien hyödynnettävissä. Hivenainemäärityksiä voidaan tehdä myös joidenkin toksisten aineiden, kuten raskasmetallien pitoisuuksien määrittämiseksi. Toksiset aineet inhiboivat prosessia korkeina pitoisuuksina. Lisäksi toksisilla aineilla voi olla merkitystä mädätysjäännöksen hyödyntämiseen lannoitteena. (Drosg ym., 2013, s. 69)

4.7.3 Sekoitus

Sekoituksella varmistetaan, että substraatit pääsevät kosketuksiin mikrobien kanssa, ja että ympäristön olosuhteet pysyvät homogeenisina, niin ravinteiden kuin muidenkin olosuhteiden, kuten lämpötilan osalta. Sekoituksella ehkäistään kerrostumien ja pintakuoren muodostumista sekä painavimpien partikkeleiden sedimentoitumista. Sekoitus pyritään suunnittelemaan siten, että nk. kuolleita kulmia, joihin sekoittajat eivät ylety, muodostuisi mahdollisimman vähän. Sekoituksella, erityisesti kuivamädätyksessä, on merkittävä rooli myös kaasun vapautumisessa massasta. Mikäli riittävää sekoitusta ei ole, kaasu ei pääse vapautumaan. (Karthikeyan ym., 2013, s. 272)

Sekoitus voi olla joko jatkuvaa tai jaksottaista. Märkämädätysreaktoreissa sekoitus on yleensä jatkuvaa, ja matalan kuiva-ainepitoisuuden massa sekoittuu helposti kauttaaltaan. Sen sijaan kuivamädätysreaktoreiden sekoitukseen tulee kiinnittää enemmän huomiota, ja onnistunut sekoitus onkin toimivan kuivamädätysprosessin yksi merkittävimmistä edellytyksistä. Sekoitus optimoidaan tapauskohtaisesti kullekin prosessille käyttäen joko jatkuvaa tai jaksottaista sekoitusta. Jaksottaisessa sekoituksessa prosessin ylösajovaiheessa sekoitusjaksojen tulee olla pidempiä ja niitä tulee olla tiheämmin, mutta sekoitusta voidaan vähentää, kun kerrostumien muodostumisen todetaan loppuneen. (Bachmann, 2013, s. 201)

Sekoitus voidaan toteuttaa kolmella erilaisella periaatteella: mekaanisesti, hydraulisesti tai pneumaattisesti, joista mekaaninen sekoittaminen on yleisintä. Mekaaninen sekoittaminen tapahtuu yleensä potkureilla, joita käytetään märkämädätysprosesseissa, tai erilaisilla melamaisilla sekoittimilla, joita käytetään kuivamädätysprosesseissa. Mekaanisten sekoittajien heikkoutena on esimerkiksi hiekkapitoisten syötteiden aiheuttama kuluminen. Sekoittimien korjaaminen on työlästä, koska reaktori voidaan joutua tyhjentämään korjauksen ajaksi. (Bachmann, 2013, s. 201)

Hydraulisessa sekoituksessa reaktorissa olevaa substraattia imetään tehokkaalla pumpulla ja palautetaan paineella suuttimien läpi reaktoriin. Hydraulisen sekoituksen etuna on, että laitteisto sijaitsee reaktorin ulkopuolella, jolloin huoltotoimet on vaivatonta suorittaa. Haittana sen sijaan on, että pumput saattavat tukkeutua liian paksuista tai säikeisistä syötteistä. Pneumaattisessa sekoituksessa syntyneitä biokaasua syötetään paineella reaktorin pohjalta, jolloin ylöspäin nousevat kaasukuplat sekoittavat massaa. Pneumaattista sekoitusta voidaan käyttää märkämädätysprosessien lisäksi korkean kuiva-ainepitoisuuden tulppavirtausreaktoreissa. (Bachmann, 2013, s. 201)

Sekoittaminen tulee olla riittävän tehokasta, mutta toisaalta sekoittaminen ei saa olla liian voimakasta. Mikrobit kasvavat usein tiiviinä rykelminä, mikä helpottaa niiden synergistä toimintaa. Liian voimakas sekoittaminen saattaa hajottaa näitä rykelmiä ja heikentää näin mikrobien

kasvuedellytyksiä ja kaasuntuottoa. (Schnürer ym., 2010, s. 41) Optimaalinen sekoitusnopeus ja frekvenssi on prosessikohtainen, eikä siihen voida antaa valmiita laskennallisia arvoja. Erityisesti korkean kuiva-ainepitoisuuden prosesseissa sekoituksella on todettu merkittävä vaikutus metaanintuottoon. Selvää eroa jatkuvan ja jaksottaisen sekoituksen hyödyistä tai haitoista ei ole voitu osoittaa. (Singh, Szamosi & Siménfalvi, 2019, ss. 930, 934)

4.7.4 Orgaaninen kuormitus

Orgaaninen kuormitus (OLR, Organic Loading Rate) kuvaa prosessiin aikayksikössä syötettävän orgaanisen aineen (VS) määrää tilavuusyksikköä kohden (Al Seadi ym., 2008, s. 28). Sopiva orgaaninen kuormitus on edellytys tasapainoiselle ja tehokkaasti toimivalle biokaasuprosessille. Suurella kuormituksella mikrobeille on riittävästi substraatteja, jolloin saavutetaan maksimaalinen metaanintuotto ja reaktoritilavuus on tehokkaammin käytössä. Kuitenkin liian suuri kuormitus saattaa johtaa prosessin epätasapainoon, koska anaerobisen mädätyksen eri vaiheet toimivat eri tahtiin ja ylikuormittaminen johtaa inhiboivien välituotteiden kertymiseen. Yleensä sopivan OLR:n määrittämiseksi tehdään etukäteen analyysyjä, mutta vasta käytännössä voidaan todeta, mikä on kullekin prosessille sopiva kuormitus. (Kymäläinen, 2015, s. 72) Liiallinen kuormitus on yksi merkittävimmistä prosessin epätasapainon aiheuttajista (Holm-Nielsen ym., 2013, s. 230).

Orgaanisen kuormituksen optimoinnissa on hyvä huomioida kuormituksen lisäämisen vaikutus mädätysjäännökseen. Metaanintuoton kannalta optimaalinen kuormitus voi johtaa hajoamattoman aineksen siirtymistä mädätysjäännökseen. (Comino ym., 2010, s. 3018)

Biokaasulaitoksen kuormitustasot vaihtelevat suuresti riippuen mm. käytetyistä syötteistä ja prosessiolosuhteista. Lantaa käsittelevien maatilamittakaavan laitosten OLR on tyypillisesti välillä 2–3 kgVS/(m³vrk), mutta lietteitä ja kasvibiomassaa käsittelevillä yhteiskäsittelylaitoksilla tyypillinen OLR on 4–5 kgVS/(m³vrk) (Kymäläinen, 2015, s. 73). Orgaaniseen kuormitukseen vaikuttaa merkittävästi substraattien lisäksi prosessityyppi. Kuivamädätysprosesseissa OLR vaihtelee välillä 5–12 kgVS/(m³vrk) ja märkämädätysprosesseissa 2–5 ksVS/(m³vrk) (Karthikeyan ym., 2013, s. 258).

OLR lasketaan kaavalla:

$$OLR = \frac{mVS\%}{V}$$

OLR = orgaaninen kuormitus aikayksikössä tilavuutta kohden [kg/(m³vrk)].

m = vuorokaudessa syötettävän syötteen tuorepaino [kg/vrk].

VS% = syötteen orgaanisen aineksen pitoisuus [%].

V = reaktorin tilavuus [m³].

(Al Seadi ym., 2008, s. 28)

Kun prosessi on käynnistysvaiheen jälkeen saavuttanut halutun kuormitus-tason, on tärkeää, että syöttöä jatketaan mahdollisimman tasaisesti. Or-gaanisen kuormituksen ei tulisi vaihdella viikoittain 10–15 %:a enempää. Myös syötekoostumus tulisi pitää tasaisena, koska mikrobisto adaptoituu käyttämään tiettyjä substraatteja. Mikäli syötekoostumusta on tarpeen muuttaa, tulisi se tehdä vähitellen lisäämällä prosessiin uutta syötettä pie-niä määriä kerrallaan. (Schnürer ym., 2010, s. 36)

4.7.5 Viipymäaika

Viipymäaika (HRT, Hydraulic Retention Time) kuvaa aikaa, jonka syöte kes-kimäärin viipyy reaktorissa. Yksinkertaisia, helposti hajoavia yhdisteitä si-sältävät syötteen vaativat lyhyemmän viipymäajan kuin sellaiset syötteen, jotka hajoavat hitaasti. (Khanal, 2008a, s. 11) Helposti hajoavalle ruokajät-teelle ja lannalle viipymäajaksi saattaa riittää 15–30 päivää, kun taas esi-merkiksi peltobiomassat vaativat 30–50 päivän, tai jopa yli 100 päivän vii-pymäajan. Myös muut tekijät vaikuttavat tarvittavaan viipymäaikaan, kut-en prosessilämpötila ja syötteille tehtävät esikäsitteilyt. (Korres ym., 2013, s. 212; Kymäläinen, 2015, s. 74)

Mesofiilisessä prosessissa viipymäajan tulee olla vähintään 15 päivää, mutta yleensä pidempi. Termofiilinen prosessi on nopeampi, ja 10 päivän viipymäaika saattaa olla riittävä. Usein kuitenkin käytetään pidempiä viipy-mäaikoja, koska pidemmällä viipymäajalla saavutetaan vakaampi prosessi. (Schnürer ym., 2010, s. 39) Kuvassa 17 on esitetty prosessilämpötilojen vai-kutusta vähimmäisviipymäaikoihin käsiteltäessä samaa syötettä.

Thermal stage	Process temperatures	Minimum retention time
psychophilic	< 20 °C	70 to 80 days
mesophilic	30 to 42 °C	30 to 40 days
thermophilic	43 to 55 °C	15 to 20 days

Kuva 17. Lämpötilan vaikutus viipymäaikoihin. (Al Seadi ym., 2008, s. 23)

Myös erityyppisten lantojen vaatimissa viipymäajoissa on eroja, koska lan-tojen koostumukset poikkeavat toisistaan. Sian lannalla on korkea rasvapi-toisuus, ja viipymäajaksi mesofiilisessä prosessissa riittää 10–15 päivää. Lehmänlanta sen sijaan sisältää suhteellisen paljon selluloosaa ja hemisel-luloosaa ja vaatii 18–36 päivän viipymäajan. (Kothari ym., 2014, s. 184)

Viipymäaika lasketaan kaavalla:

$$HRT = \frac{V \text{ reaktori}}{V \text{ syöttö}}$$

HRT = aika, jonka syöte viipyy reaktorissa [vrk].

V reaktori = reaktorin tilavuus [m³].

V syöttö = syötteen määrä kuutiometreinä vuorokaudessa [m³/vrk].

(Al Seadi ym., 2008, s. 28)

Optimaalisella viipymäajalla voidaan vaikuttaa prosessin taloudellisuuteen sekä metaanintuottoon. Viipymäaika vaikuttaa siihen, kuinka paljon orgaanisesta aineksestä ehtii muuttua kaasuksi mikrobitoiminnan tuloksena. Toisaalta pidempi viipymäaika vaatii suuremman reaktorin, mikä lisää kustannuksia. (Korres ym., 2013, s. 211) Viipymäaika ei käytännössä mitoiteta niin pitkäksi, että kaikki orgaaninen materiaali ehtii hajota. Hajoamisen loppuvaiheessa metaanintuotto laskee, mutta saattaa kestää pitkään, eikä tätä vaihetta ole taloudellisesti kannattavaa suorittaa lämmitettävissä reaktoreissa. (Cieslik ym., 2016, s. 1500) Sopivan viipymäajan määrittämisessä käytetään apuna VS-vähennemää, joka lantaa prosessoitaessa saattaa olla alle 40 %, mutta kasvibiomassoilla korkeampi, nurmella esimerkiksi noin 60 % (Kymäläinen ym., 2015, s. 24).

Jatkuvatoimisen märkämädätysprosessin, jossa ei ole mädätteen takaisin-syöttöä, viipymäaika määritettäessä tulee myös huomioida mikrobien poishuuhtoutumisriski. Erityisesti hitaasti kasvavat metanogeenit ovat liian lyhyillä viipymäajoilla vaarassa huuhtoutua pois prosessista. Korkeakuormitteisissa lyhyen viipymäajan prosesseissa huuhtoutumisriskiä hallitaan immobilisoinnilla, jossa mikrobit kiinnitetään kantaja-aineeseen. (Khanal, 2008a, s. 11)

Sopivalla viipymäajalla voidaan vaikuttaa myös prosessin metanogeenisukujen esiintymissuhteisiin. Astettautia hyödyntäviä sukuja on kaksi: lyhyemmän kahdentumisajan *Methanosarcina* ja pidemmän kahdentumisajan *Methanosaeta*, joista *Methanosarcinan* dominoinnin on osoitettu edesauttavan prosessin stabiiliutta. Sopivaksi mitoitetuilla, riittävän lyhyillä viipymäajoilla *Methanosaetaa* saadaan huuhdottua prosessista pois, jolloin *Methanosarcina* kehittyy dominoivaksi kannaksi. (Khanal, 2008b, ss. 36–37)

SRT (Solids Retention Time) on viipymäaika, joka kuvaa sitä aikaa, jonka mikrobisto ja muu kiintoaine viipyy reaktorissa. SRT voi olla HRT:tä pidempi, mikäli mikrobisto pidetään reaktorissa jollakin menetelmällä pidempään kuin syötemassa. Tällaisia menetelmiä ovat mikrobien

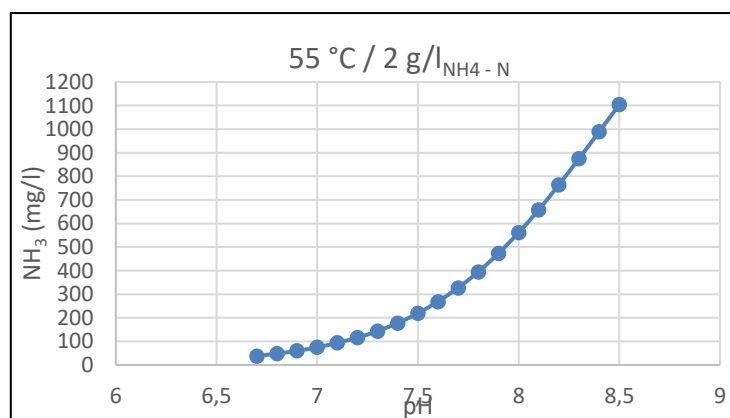
kiinnittäminen johonkin soveltuvaan kantaja-aineeseen, mikrobien foku-loituminen, jolloin ne eivät huuhtoudu muun aineksen mukana reaktori-
stä, mädätteen uudelleenkierrätys, jolloin mikrobit palautuvat reaktoriin
tai mikrobit voidaan kiinnittää membraaniin, jotta ne eivät siirry pois reaktori-
sta. (Khanal, 2008d, s. 94)

Viipymäaikaa määritettäessä tulee huomioida myös mahdollinen proses-
sin aikana suoritettava hygienisointikäsitteily. Mikäli hygienisointi toteute-
taan prosessin yhteydessä, tulee viipymäaika olla riittävä suhteessa pros-
essin lämpötilaan, jotta riittävä hygienisoituminen voidaan taata.

4.7.6 Ammoniakki-inhibition hallinta

Korkeatyyppisillä syötteillä ammoniakki-inhibitio on yleinen prosessihäiri-
öitä aiheuttava tekijä. Ammoniakki on ammoniumtyyppisen ionisoitumaton
muoto, jonka esiintyvyys prosessissa on vahvasti riippuvainen pH:sta sekä
lämpötilasta. Ammoniumtyyppiä joutuu prosessiin jonkin verran syöttei-
den mukana, mutta runsastyyppisillä syötteillä suuri osa ammoniumtyyppiä
muodostuu prosessin aikana proteiinien hajotessa.

Lämpötilan vaikutus vapaan ammoniakin osuuteen ammoniumtyyppiä on
lineaarinen, mutta pH:n noustessa prosessilämpötilasta riippuen yli 7,5–8,
alkaa vapaan ammoniakin osuus nousta jyrkästi (kuva 18) (Al Seadi ym.,
2008, s. 24). pH:n lasku on tehokas keino vähentää vapaan ammoniakin
määrää, sillä mesofiilisessä prosessissa pH:n lasku arvosta 8 arvoon 7 vä-
hentää vapaan ammoniakin määrää 10 %:sta 1 %:iin, mutta pitkällä aika-
välillä pH:n säätö kemikaaleilla lisää merkittävästi prosessin kustannuksia.
(Fuchs, Wang, Gabauer, Ortner & Li, 2018, s. 188). Lämpötilan laskussa sen
sijaan on ongelmana sen vaikutus mikrobien kasvuun. Jo muutaman as-
teen lämpötilan lasku termofiilisessä prosessissa heikentää mikrobien kas-
vua merkittävästi, ja saattaa johtaa jatkuvatoimisessa märkämädätyspro-
sessissa mikrobien poishuuhtoutumiseen. (Al Seadi ym., 2008, s. 24)



Kuva 18. pH nousun vaikutus vapaan ammoniakin määrään ammonium-
tyyppipitoisuudella 2 g/l lämpötilassa 55 °C.

Ammoniakki-inhibition hallintaan käytettävien keinojen tarve on lisääntynyt biokaasualalla tapahtuvan kehityksen vuoksi. Termofiilisten biokaasulaitosten yleistymisen, missä ammoniakki-inhibitio on todennäköisempi kuin mesofiilisessä, on lisännyt tarvetta kiinnittää huomiota ammoniakki-inhibitiioon. Lisäksi jatkuvatoimisten kuivamädätyslaitosten tulo perinteisten märkämädätyslaitosten rinnalle on luonut mahdollisuuden käsitellä laajemmin erilaisia syötejakeita, ja esimerkiksi broilerin käytön lisääntyminen maailmalla on lisännyt typpipitoisen broilerinlannan saatavuutta. Perinteisesti ammoniakki-inhibition riskiä on vähennetty laimentamalla syötettä tai prosessoimalla typpipitoisia syötteitä runsashiilisten syötteiden kanssa. Termofiilinen prosessi on erityisen herkkä ammoniakki-inhibitiolle, ja siksi prosessitasapainon kannalta mesofiilinen prosessi on parempi. (Fuchs ym., 2018, ss. 186, 188)

Käytännössä ammoniakki-inhibition vaaraa vältetään valitsemalla sopiva syötekoostumus tai vähentämällä kuormitusta. Suotoveden tai mädätysjäännöksen kierrättäminen sen sijaan nostaa ammoniumtyppipitoisuutta. (Karthikeyan ym., 2013, s. 276) Jos ammoniakkipitoisuus prosessissa nousee selvästi inhibitorajan yli, voidaan ammoniumtyyppiä poistaa prosessista strippaamalla tai saostamalla magnesiumilla ja/tai fosfaatilla (Cheng, 2010b, ss. 168–169).

Strippausta voidaan käyttää typen poistoon myös syötteestä, mikä vähentää prosessin ammoniumtyppipitoisuutta. Nykyisin laitosmittakaavassa käytössä olevan strippauksen lisäksi on tutkittu myös muita menetelmiä typen poistoon, kuten osmoosiin perustuvaa kalvomenetelmää, saostukseen perustuvia menetelmiä, ultrasonikaatiota ja mikroaaltomenetelmiä. Typen poistoa käytetään yksipuolisia syötteitä käsiteltäessä, mutta yleisimpänä keinona typpipitoisia syötteitä käsiteltäessä ammoniakki-inhibitoriskin vähentämiseksi käytetään edelleen syötteiden yhteiskäsittelyä. (Fuchs ym., 2018, ss. 190–192)

Ammoniakki-inhibitiota voidaan pyrkiä välttämään myös antamalla mikrobeille riittävästi aikaa adaptoitua. Mikrobien adaptoitumisella on suuri merkitys olosuhteiden muutoksiin, ja etenkin ammoniakkin sietokyvyn on osoitettu kasvavan huomattavasti adaptoitumisen seurauksena. Siksi ammoniakkipitoisuudelle on vaikea asettaa tiettyä viitearvoa. Adaptoituminen on kuitenkin hidasta, ja saattaa kestää pari kuukautta tai jopa pidempään. Adaptoitumiseen kuluvan ajan lyhentämiseksi ylösajovaiheessa voidaan käyttää korkeisiin typpipitoisuuksiin valmiiksi adaptoitunutta ympäristöä, tai prosessiin voidaan myös jälkikäteen lisätä adaptoitumista edistäviä mikrobeja. Mikrobien lisäystä on tutkittu paljon laboratoriomittakaavassa, mutta menetelmä ei ole yleistynyt laitosmittakaavakäytössä. (Fuchs ym., 2018, s. 190)

Prosessin ammoniakki-inhibition välttämiseksi on myös kokeiltu erilaisia li-säaineita, kuten hivenaineita tai adsorboivia aineita. (Fuchs ym., 2018, ss. 188, 190) Hivenaineista erityisesti seleenin on todettu olevan kriittinen

elementti prosessissa, jossa on havaittavissa ammoniakki-inhibitiota. Asetilaktiset metanogeenit ovat herkempiä ammoniakki-inhibitiolle, joten korkeissa ammoniakkipitoisuuksissa asetaatin hyödyntäminen vähenee ja sen pitoisuus nousee prosessissa. Asetaatin sijaan hydrogenotrofiset metanogeenit tuottavat metaania mm. propionaatista syntrofissa asetogeenien kanssa. Propionaatin hajoamistuotteena syntyy formiaattia (muura-haishapon ioni), jonka hapettuminen vaatii seleeniä. Jos seleeniä ei ole riittävästi saatavilla, kertyy formiaattia prosessiin, mikä laukaisee propionaatin hapettumisen takaisinkytkentäinhibition. Laboratoriomittakaavassa seleenilisäyksellä on saatu vähennettyä haihtuvien rasvahappojen kertymistä ja nostettua orgaanista kuormitusta korkean ammoniumtyyppipitoisuuden prosesseissa. Seleenilisäyksen jälkeen, kun tietyllä kuormitustasolla haihtuvien rasvahappojen kertyminen alkoi uudelleen, saatiin kobolttin lisäämisellä vähennettyä VFA-pitoisuutta ja palauttamaan tasapainoinen prosessi. (Banks ym., 2013, s. 150)

Adsorboivista aineista biohiilen hyötyjä tutkitaan tällä hetkellä aktiivisesti. Lisäaineiden käyttö lisää prosessin kustannuksia, ja koska toistaiseksi tulokset erilaisten lisäaineiden hyödyistä ovat olleet vaihtelevia, rajoittaa se lisäaineiden käytön yleistymistä. (Fuchs ym., ss. 188, 190)

Sekä laboratorio- että laitosmittakaavan prosesseissa on todettu, että tasapainoinen prosessi voi kestää 7,5 g/l ammoniumtyyppipitoisuutta, ja 800–900 mg/l vapaata ammoniakkaa. (Fuchs ym., 2018, s. 188)

4.7.7 Prosessin ylösajo

Biokaasuprosessin ylösajo- eli käynnistysvaihe on pitkäkestoinen ja saattaa olla ongelmallinen. Prosessin ylösajo tulee suunnitella huolella, jotta hitaasti kasvavat anaerobiset mikrobit, erityisesti metanogeenit, ehtivät sopeutua muuttuviin olosuhteisiin. Anaerobisen prosessin ylösajo kestää huomattavasti pidempään kuin aerobisten prosessien. Mesofiilisten prosessien tyypillinen ylösajoaika on 2–4 kk, mutta termofiilillä prosesseilla ylösajo saattaa kestää jopa vuoden. Ylösajoaika voidaan lyhentää sopivalla ympillä eli massalla, joka sisältää anaerobiseen mädätysprosessiin osallistuvia mikrobeja. Mitä enemmän ymppeä käytetään, sitä lyhyemmäksi ylösajoaika saadaan. (Khanal, 2008a, ss. 13, 22) Vakaat, todellista prosessia vastaavat olosuhteet katsotaan saavutetuksi vasta, kun reaktorin tilavuus on vaihtunut kolme kertaa (Drosg ym., 2013, s. 73).

Ymppinä voidaan käyttää jonkin toisen biokaasureaktorin mädätysjännöstä. Kuivamädätysprosesseissa tarvittava ympin määrä on melko suuri, ja etenkin jatkuvatoimisten reaktoreiden käynnistysvaiheessa ympin osuuden suositellaan olevan 50–70 %. Tarvittava ympin määrä riippuu kuitenkin prosessin olosuhteista sekä käytetyistä syötteistä, ja ympin määrä harkitaan tapauskohtaisesti. Panosprosessissa ymppinä käytetään yleensä edellisen panoksen mädätysjännöstä. (Karthikeyan ym., 2013, s. 273) Nopeamman ja vakaamman ylösajon saavuttamiseksi ymppinä on hyvä

suosia saman tyyppisestä prosessista peräisin olevaa mädätysjäännöstä, jonka mikrobit ovat valmiiksi adaptoituneet vallitseviin olosuhteisiin ja saatavilla olevien substraattien hyödyntämiseen (Schnürer ym., 2010, s. 26).

Ylösajovaiheessa kuormitus aloitetaan matalilla OLR-arvoilla, ja kuormitusta lisätään vähitellen. Kuormituksen lisäämiselle on toisistaan hieman poikkeavia ohjeita, mutta pääpiirteissään ne noudattelevat samaa kaavaa: kuormitusta lisätään asteittain, ja lisäysten välissä prosessin annetaan taantua.

Saksalaisessa VDI-standardissa 4630 kuvataan yksinkertaistettu suunnitelma ylösajolle. Prosessi aloitetaan OLR-arvolla 0,5 kg VS/(m³vrk). Kun kaasuntuotto pysyy muuttumattomana neljä päivää, syöttömäärää nostetaan 0,5 kg VS/(m³vrk). Tämän jälkeen syöttömäärää lisätään 0,5 kg VS/(m³vrk) aina 14 päivän välein, kunnes kaasuntuotto lähtee laskuun. Alussa OLR:ää voidaan usein nostaa tiheämmässä syklissä kuin lähestyttäessä maksimiarvoa. (Drosg ym., 2013, ss. 73–74)

Vaihtoehtoisesti kuormitusta voidaan nostaa suhteessa suunniteltuun OLR-arvoon. Syöttö voidaan aloittaa 20 %:lla suunnitellusta OLR:stä, ja jatkaa tällä syöttömäärällä 20 päivää. Sen jälkeen kuormitusta lisätään jaksoittain niin, että suunniteltu kuormitus saavutetaan 30–40 päivän kuluessa, jos on käytetty ymppeä tai ilman ymppeä 60–90 päivän kuluessa. (Khanal, 2008d, s. 95)

Riippumatta ylösajosuunnitelmasta, mikrobien adaptoitumista kuormituksen nostoon on syytä seurata analyysien avulla ja seuraamalla kaasuntuottoa. VFA-pitoisuuden, H₂-konsentraation ja propionaatin osuuden nousu suhteessa asetaattiin osoittavat epätasapainoa mikrobitoiminnassa, eikä kuormitusta silloin tule lisätä. Kuormitusta voidaan myös vähentää, mutta syötön lopettaminen kokonaan altistaa prosessiepätasapainolle. (Drosg ym., 2013, ss. 73–74)

4.7.8 Prosessista seurattavat parametrit

Yhdistettynä anaerobiseen hajoamiseen osallistuvien mikrobien hidas kasvu, niiden erityiset ravinne- ja hivenainevaatimukset sekä alttius ympäristön muutoksille, vaaditaan tasapainoisen prosessin varmistamiseksi huolellista prosessiseurantaa (Khanal, 2008b, s. 29). Koska prosessit ja niiden olosuhteet vaihtelevat merkittävästi, tulee prosessitasapainon varmistamiseksi seurattavat parametrit arvioida aina prosessikohtaisesti. Parametreille ei myöskään voida asettaa täsmällisiä raja-arvoja, koska myös ne ovat yksilöllisiä kullekin prosessille. (Li ym., 2014, s. 494)

Reaaliaikaisesti biokaasuprosesseista mitataan vain muutamia parametreja, kuten lämpötilaa, pH:ta ja biokaasun tuottoa, sen määrää ja koostumusta. Lisäksi tietyin väliajoin määritettäviin perusanalyysihin kuuluvat

esimerkiksi kuiva-aine (TS), orgaaninen aine (VS), ammoniumtyppi ja haihtuvat rasvahapot. (Holm-Nielsen ym., 2013, s. 230)

Biokaasun tuotosta ja sen metaanipitoisuudesta voidaan päätellä, toimiiko prosessi toivotulla tavalla. Mikäli prosessin kaasuntuotto heikkenee, on se osoitus prosessin epätasapainosta, mutta kaasuanalyysin avulla ei saada täsmällisempää tietoa mahdollisesta häiriön aiheuttajasta. (Holm-Nielsen ym., 2013, s. 232)

Sopiva ja vakaa pH on prosessin ehdoton toimintaedellytys, mutta prosessin seuranta-parametrinä se on huono indikaattori etenkin korkean puskurikykyyn syötteillä. Puskurikyky saattaa pitää pH:n vakaana, vaikka prosessiin olisi kertynyt jo huomattava määrä haihtuvia rasvahappoja. (Korres ym., 2013, s. 209) Sen sijaan heikosti puskuroiduissa prosesseissa pH on suhteellisen hyvä mittari osoittamaan prosessin epätasapainoa (Al Seadi ym., 2008, s. 26).

Kuiva-ainepitoisuus ja orgaaninen aines eivät sinällään ole prosessitasapainon indikaattoreita, mutta oleellisia parametrejä prosessihallinnan kannalta. Kuiva-ainepitoisuus on merkittävä syöteanalyysi, jotta voidaan varmistua syötteen soveltuvuudesta käytettävään prosessiin. Myös orgaaninen aines kuuluu syöteanalyysiin, mutta sen avulla voidaan arvioida myös viipymääjan sopivuutta määrittämällä orgaanisen aineksen vähenemä prosessin kuluessa.

Prosessitasapainoa indikoivista tutkimuksista VFA-määritys on todettu parhaaksi antamaan viitteitä prosessin epätasapainosta. VFA:n määrittäminen on hyvä indikaattori sekä hyvän että heikon puskurikykyyn prosesseissa. (Holm-Nielsen ym., 2013, s. 232)

Sen sijaan pH ja alkaliteetti sekä haihtuvien rasvahappojen ja alkaliteetin suhde sopivat paremmin heikon puskurikykyyn prosessien seurantaan, koska hyvän puskurikykyyn prosesseissa haihtuvat rasvahapot saattavat nousta korkealle, vaikka suhdeluku olisi vielä viiterajoissa, eikä pH vielä laske (Holm-Nielsen ym., 2013, s. 232). Korkean puskurikykyyn prosesseissa tutkimuksissa on havaittu metaanituoton laskeneen ammoniumtyppi-inhibition johdosta haihtuvien rasvahappojen ja alkaliteetin suhteen ollessa alle 0,2, vaikka tasapainoisen prosessin viiterajana pidetään suhdetta < 0,3. (Karthikeyan ym., 2013, s. 275)

Termofiilisessä prosessissa hydrolyysi on nopeampi kuin mesofiilisessä, mikä lisää haihtuvien rasvahappojen kertymisen riskiä prosessiin. Korkean ammoniakkipitoisuuden ja haihtuvien rasvahappojen pitoisuuden nousu on tyypillistä esiintyä yhdessä, jolloin pH:ssa ei tapahdu muutosta. Tutkimuksessa, jossa selvitettiin tyypikuormitusta, kokonaistypen noustessa pitoisuuteen 4 000–5 000 mg/l, VFA-pitoisuus nousi 4 000 mg:sta/l 20 000 mg:aan/l. Alkaliteetissa ja pH:ssa ei sen sijaan tapahtunut prosessin

epätasapainoa osoittavia muutoksia, mikä osoittaa alkaliteetin huonoa prosessitasapainon indikointia korkean puskurikyvyn syötteillä. (Niu ym., 2014, ss. 594–595)

Yksittäisistä haihtuvista rasvahapoista liiallisesta kuormituksesta johtuva vedyn osapaineen nousu näkyy herkimmin propionaattipitoisuudessa, koska vedyn osapaineen nousu inhiboi eniten propionaattia hajottavia asetogeeneja. Myös muiden yksittäisten rasvahappojen on todettu indikoivan prosessihäiriöistä. (Holm-Nielsen ym., 2013, s. 232)

Myös yksittäisten haihtuvien rasvahappojen suhteet voivat indikoida prosessihäiriöitä, kuten propionaatin ja asetaatin suhde. Suhteelle, kuten useille muillekaan anaerobisen mädätysprosessin parametreille, ei voida asettaa tiettyä raja-arvoa, vaan tasapainoisen prosessin pitoisuudet vaihtelevat riippuen syötteistä ja prosessiolosuhteista. Propionaatin ja asetaatin suhde tulisi joidenkin lähteiden mukaan pysyä pienempänä kuin 1,0, mutta toisissa lähteissä häiriöitä enteileväksi rajaksi on asetettu 1,4. Kaikki tutkijat eivät ole vakuuttuneita suhteen kyvystä ilmaista prosessin epätasapainoa. (Li ym., 2014, ss. 491–492)

Ammoniumtypen määrittäminen antaa tärkeää tietoa mahdollisesta inhibiovaarasta. Ammoniumtypen toksisemman muodon, vapaan ammoniakin määrä voidaan laskea ammoniumtyypipitoisuudesta, kun tiedetään prosessin pH ja lämpötila.

Myös mikrobiston koostumusta, erityisesti metanogeenien osuutta ja lajijakaumaa, voidaan tutkia, mutta mikrobiologiset tutkimukset eivät kuulu rutiinitutkimuksiin. (Holm-Nielsen ym., 2013, s. 231)

Pienet biokaasulaitokset voivat pärjätä yksinkertaisilla mittauksilla ja ajoittain tehtävillä muilla analyyseillä, mutta suurien, keskitettyjen, erityisesti termofiilisinä ajettavien yhteismädätyslaitosten prosessihallinta vaatii laajempia ja säännöllisempiä analyysejä. Syötekoostumusten vaihteluista johtuvat prosessimuutokset eivät välttämättä tule ilmi ajoittain tehtävillä perusanalyyseillä, ja etenkin termofiilisisä prosesseissa muutokset saattavat tapahtua nopeasti, joten näytteitä tulee ottaa riittävän usein. (Madsen ym., 2011, s. 3153)

Analyytit tulee valita huolella, koska ne aiheuttavat kustannuksia ja tulosten saannin hitaus saattaa heikentää niiden hyödyntämismahdollisuuksia. Nykyisin on kehitetty nopeampia menetelmiä esimerkiksi ammoniumtypen ja haihtuvien rasvahappojen analysoimiseksi, mutta silti mittaukset eivät välttämättä osoita riittävän nopeasti prosessin epävakausta. (Holm-Nielsen ym., 2013, s. 230)

Käytännössä biokaasulaitoksilla on hyvin vaihtelevia käytäntöjä prosessin seuraamisesta laboratorioanalyyseiden avulla. Kaikki isotkaan laitokset eivät välttämättä teetä säännöllisesti analyysejä tai niitä voidaan teettää

suhteellisen harvoin, esimerkiksi puolen vuoden välein. Prosessin toimivuutta tarkkaillaan näissä tapauksissa seuraamalla kaasuntuottoa ja kaasun metaanipitoisuutta.

4.7.9 Viitearvot

Kuten edellä on tullut ilmi, anaerobisen mädätysprosessin vaihtelevista syötteistä ja prosessiolosuhteista sekä prosessin laajakirjoisesta mikrobistosta johtuen useimmille seurattaville parametreille ei voida asettaa tiettyjä, yleisesti sovellettavia viitearvoja. Kirjallisuudessa esitetyt viitearvot ovat usein suuntaa antavia tai soveltuvat tietyn tyyppiseen prosessiin, ja lopulliset prosessitasapainoa osoittavat arvot määrittyvät kullekin prosessille tapauskohtaisesti. Viitearvojen asettamista ja tulkintaa vaikeuttavat myös eri parametrien sekä prosessiolosuhteiden vaikutus toisiinsa, jolloin tietty arvo voi olla hyväksyttävä tietyissä olosuhteissa, mutta olosuhteiden muuttuessa arvo osoittaakin tarvetta toimenpiteille. Usein täsmällisten viitearvojen määrittämistä tärkeämpää on seurata parametreissa tapahtuvia muutoksia, mutta silloinkin tulkinta vaatii hyvää ammattitaitoa, ja tulkinnaassa on ymmärrettävä parametrien muutoksiin vaikuttavia mekanismeja ja huomioitava prosessin tila kokonaisuudessaan. Toiset parametrit esimerkiksi muuttuvat hitaasti ja vähäininkin nouseva tai laskeva trendi voi ennakoida häiriötä ja edellyttää toimenpiteitä, kun taas toiset parametrit, kuten haihtuvat rasvahapot nousevat äkillisesti ja huomattavan suuriin pitoisuuksiin.

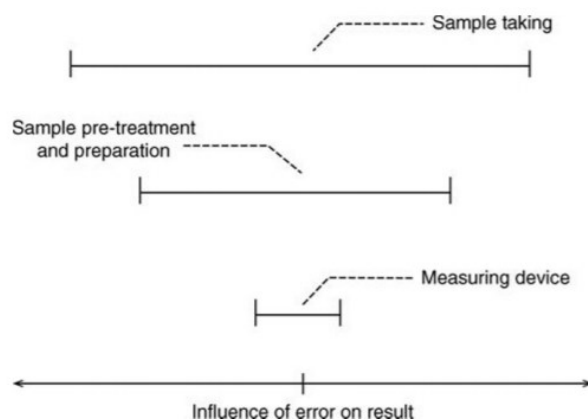
Edellä esitetyistä seikoista huolimatta kirjallisuudessa ja useissa eri tutkimuksissa on määritetty erilaisia viitearvoja tietyille prosessiolosuhteille ja erilaisille syötteille. Prosessiolosuhteet voidaan jakaa karkeasti märkä- ja kuivaprosesseihin joko termo- tai mesofiilisissä lämpötilaolosuhteissa, jatkuvatoimisena tai panosprosessina, mutta myös muissa prosessiolosuhteissa, kuten orgaanisessa kuormituksessa, sekoituksessa ja viipymääjassa esiintyy huomattavia vaihteluita. Yksi merkittävä tekijä on syötteen koostumus. Myös mikrobistot eroavat prosesseittain. Lisäksi prosessin käynnistysvaiheessa arvot poikkeavat vakaan prosessivaiheen arvoista.

Julkaisuissa esitettyjen viitearvojen taustalla olevat tutkimukset on pääasiassa suoritettu laboratoriomittakaavassa, eikä tulosten skaalautuvuudesta laitosmittakaavaan ole välttämättä näyttöä. Laboratoriokokeet suoritetaan vakioituissa tutkimusolosuhteissa, eikä vastaavia olosuhteita voida laitosmittakaavassa saavuttaa. Maailmalla tutkimusta on tehty paljon esimerkiksi käytettäessä syötteenä maissia, lantaa tai näiden yhdistelmiä, ja Suomessa on tutkittu laajemmin lantaa, nurmirehua ja olkea sekä näiden erilaisia seoksia, mutta syöteseoksen tai prosessiolosuhteiden poiketessa tutkimusolosuhteista, ei suoraan sovellettavia viitearvoja juuri ole. Tasa-painoisen prosessin olosuhteisiin vaikuttaa myös prosessin mikrobisto, joka ei yleensä ole vakioitu edes laboratoriomittakaavan kokeissa.

Asetettaessa uudelle prosessille alustavia viitearvoja, hyödynnetään aiempaa kokemusta ja saatavilla olevaa tutkimustietoa, mutta lopulliset viitearvot määrittyvät vasta prosessiseurannan myötä. Apua alustavien viitearvojen asettamiseen antavat myös syöteanalyysit, koska monet prosessiraja-arvot ovat riippuvaisia syötekoostumuksesta (Madsen ym., 2011, s. 3153).

4.7.10 Näytteenotto

Edustava näytteenotto on edellytys luotettavien analyysitulosten saamiseksi. Näytteenoton on arvioitu aiheuttavan suurimmat virheet tuloksiin, seuraavaksi suurin vaikutus virheisiin on näytteiden esikäsittelyllä ja valmistamisella, ja vähäisimmät virheet syntyvät itse analysointivaiheessa (kuva 19). Erityisesti otettaessa näytettä epähomogeenisesta massasta, tulee näytteenottajalla olla kokemusta ja tuntee prosessi, jotta näytteestä saadaan edustava. Epähomogeeninen materiaali vaatii useita näytteitä, ja näytteenotto tulee osata kohdistaa siten, että tulos edustaa koko massaa. Otettaessa näytettä kiinteästä aineksestä, näytteitä tulee ottaa massan eri kohdista. Nestemäinen materiaali sekoitetaan ennen näytteenottoa, ja mikäli näyte otetaan pullolla, se upotetaan materiaaliin, ja otettaessa näyte venttiilistä, tulee aluksi laskea nestettä hukkaan. Näytteenoton jälkeen näyte säilytetään ja kuljetetaan kylmässä. (Drosg ym., 2013, ss. 58–60)



Kuva 19. Näytteenoton, näytteen käsittelyn sekä mittauksen aiheuttamat virheet analyysitulokseen. (Drosg ym., 2013, s. 58)

Täyssekoitteisessa märkämädätysprosessissa mädätysjännös edustaa prosessinäytettä. Korkean kuiva-ainepitoisuuden tulppavirtausreaktorissa mädätysjännös antaa vain viitteellistä tietoa prosessin tilasta kokonaisuudessaan, koska anaerobinen hajoamisprosessi etenee eri vaiheissa reaktorin eri kohdissa. Tulppavirtausreaktorista voi mahdollisuuksien mukaan ottaa näytteitä prosessin eri vaiheista, mutta se korostaa prosessin ymmärtämisen merkitystä tulkittaessa analyysituloksia.

Kuivamädätyksessä edustavan näytteen ottaminen on haastavaa myös siksi, että massa on epähomogeenista. Märkämädätysprosessista edustavan näytteen ottaminen on helpompaa, koska reaktorissa olevan massan

voidaan olettaa olevan melko homogeenista. Sen sijaan korkean kuiva-ainepitoisuuden tulppavirtausreaktorissa edustavan näytteen saaminen edellyttää, että näytettä tulee otetuksi riittävän suuri määrä ja riittävän monesta kohdasta, jotta prosessin tilasta saadaan luotettava kokonaiskuva.

5 TERMOFIILINEN TULPPAVIRTAUSPROSESSI

5.1 Kuivamädätyksen kaupallisia reaktoriratkaisuja

Biokaasutuotannon yleistyessä on herännyt kiinnostus myös kuivamädätyslaitoksiin, koska kuivamädätysreaktoreissa voidaan käsitellä sellaisia syötteitä, jotka eivät sovellu märkämädätykseen. Kuivamädätysreaktorien tekniset ratkaisut poikkeavat huomattavasti perinteisen märkämädätyksen ratkaisuista. Kuivamädätyksessä erityisesti sekoitus ja lämmön tasainen jakaantuminen vaativat huolellisesti suunniteltua tekniikkaa. Näihin on eri valmistajilla hieman toisistaan poikkeavia ratkaisuja.

Kuivamädätyksessä sekoituksen tulee kattaa koko massa, koska virtauksen aikaansaamaa sekoitusta ei tapahdu, kuten märkämädätyksessä. Kuivaprosesseissa ongelmia tuottaa yleisesti sedimentoituminen, jossa painavat ainekset kuten hiekka ja kivet kertyvät reaktorin pohjalle pienentäen reaktorilavuutta ja rajoittaen lämmön siirtymistä. Lämmön tasainen siirtyminen ja lämpötilan pysyminen halutulla tasolla kuivamädätyksessä, erityisesti termofiilissä prosesseissa on havaittu ongelmalliseksi. Keski-Euroopan ilmasto-olosuhteisiin optimoidut ratkaisut saattavat vaatia lisäeristystä tai -lämmitystä Suomen olosuhteissa.

Jatkuvatoimisen tulppavirtausprosessin etu on, että syötteet saadaan viipymään reaktorissa halutun ajan. Ne eivät poistu reaktorista liian aikaisin, eivätkä toisaalta viivy tarpeettoman pitkään, kuten jatkuvatoimisessa märkämädätysprosessissa tapahtuu. (Karthikeyan ym., 2013, s. 266)

5.1.1 Thöni Industriebetriebe GmbH

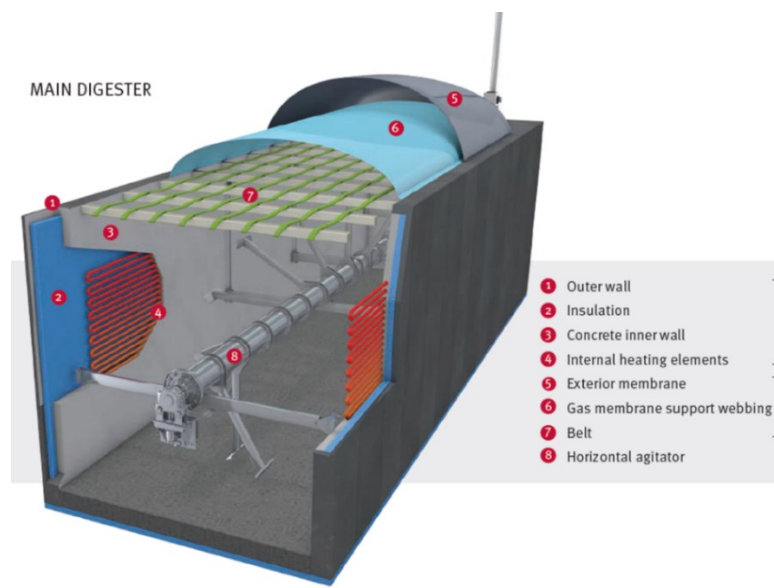
Thöni on itävaltalainen, vuodesta 1991 toiminut reaktoritoimittaja. Thönin reaktorissa (kuva 20) on yksi pitkittäisakselinen, patentoitu melasekoitin, joka pyörii hitaasti ilman taukoja. Lattia on muotoiltu kaarevaksi sedimentoitumisen ehkäisemiseksi. (Thöni Industriebetriebe GmbH, 2020) Kaareva lattiarakenne nostaa rakennuskustannuksia.



Kuva 20. Thöniin kuivamädätysreaktorin rakenne (Thöni Industriebetriebe GmbH, 2020).

5.1.2 Eisenmann

Eisenmann on saksalainen reaktoritoimittaja. Eisenmannin reaktori on suorakaiteen muotoinen, ja siinä on yksi pitkittäisakselinen sekoitin (kuva 21).

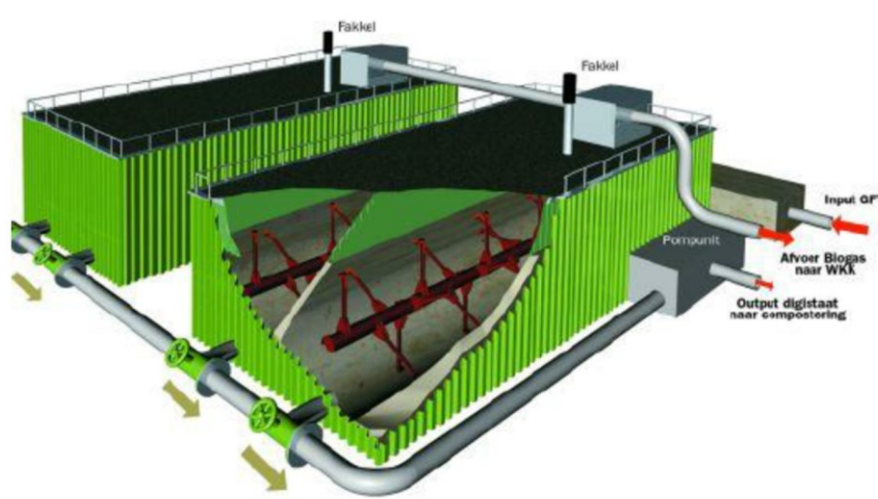


Kuva 21. Eisenmannin kuivamädätysreaktorin rakenne (Eisenmann Corporation, 2020).

Lahdessa sijaitseva Labio Oy:n biokaasulaitos on suurin Eisenmannin toimittama laitos Euroopassa. Laitos koostuu neljästä 900 m³ reaktorista ja käsittelykapasiteetti on 44 000 tonnia vuodessa. (Eisenmann Corporation, 2020)

5.1.3 Hitachi Zosen Inova AG

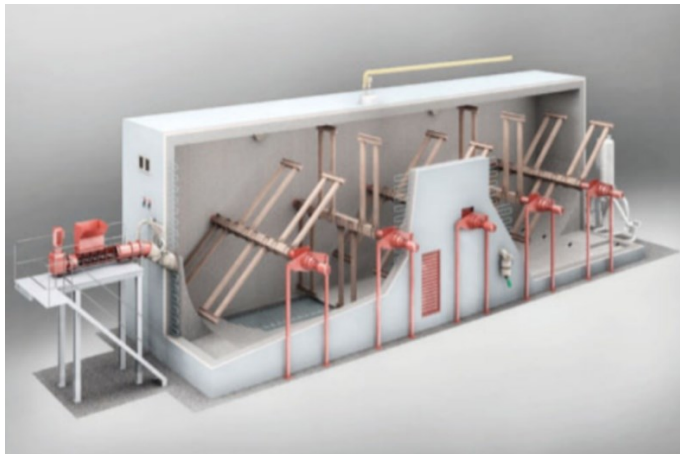
Sveitsiläisen Hitachi Zosen Inova AG:n markkinoimassa Kompogas® -reaktorissa on yksi pitkittäisakeli (kuva 22). Reaktori on saatavilla joko betonista tai teräksestä valmistettuna. Laitosta markkinoidaan termofiiliseen prosessiin. (Hitachi Zosen INOVA, 2019)



Kuva 22. Kompogas® -reaktorin rakenne (Quevedo de Lima & Martins, 2014).

5.1.4 STRABAG

STRABAG on saksalainen biokaasulaitosratkaisuja toimittava yritys. Se toimittaa sekä märkä- että kuivamädätyslaitosratkaisuja mesofiilisille ja termofiilisille prosesseille. Kuivamädätysprosessissa voidaan käsitellä syötteitä, joiden kuiva-ainepitoisuus on 15–50 %. STRABAG on toimittanut kuivamädätyslaitosratkaisuja vuodesta 1994 lähtien lähinnä Euroopan eri maihin. STRABAG:n reaktorissa on kuusi poikittaista sekoittajaa, ja lämmituselementit lattiassa ja seinissä (kuva 23). Syöttö tapahtuu jaksottaisesti, ja reaktori toimii tulppavirtausperiaatteella, mädätysjäännöksen poisto tapahtuu vakuumpumpun avulla. STRABAG:n reaktori voidaan rakentaa paikan päällä tai koota valmiista elementeistä. (STRABAG Umwelttechnik GmbH, 2018) STRABAG:n reaktorissa on sekoittajien välissä tasainen pohja, mikä saattaa johtaa sedimentoitumiseen sekoittajien väliin jääviin kuolleisiin kulmiin.

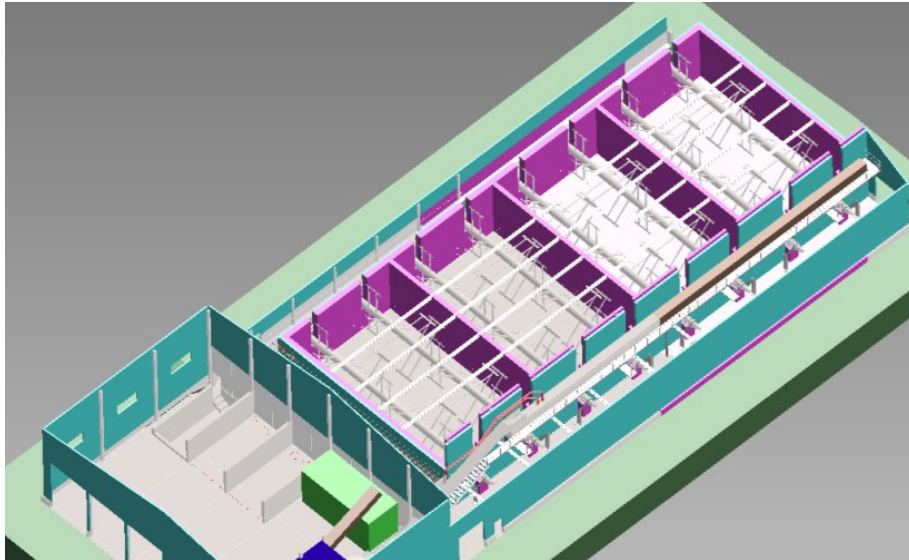


Kuva 23. Havainnekuva STRABAG:n kuivämädätysreaktorista (STRABAG Umwelttechnik GmbH, 2016).

Suomessa STRABAG:n kuivämädätyslaitos on Ämmäsuolla HSY:n ekoteollisuuskeskuksessa. Laitos on otettu käyttöön vuonna 2015, ja pääasiassa siellä käsitellään pääkaupunkiseudulta kerättyä yhdyskuntabiojätettä. Laitos on toimitettu valmiudella termofiiliseen prosessiin, mutta reaktoreita käytetään mesofiilisellä lämpötila-alueella. Syöttö ja sekoitus tapahtuvat kerran tunnissa, ja prosessin viipymäaika on 40 vrk. Syötteen kuiva-ainepitoisuus on noin 30 % ja poisteen 12–15 %, joten käytännössä prosessin epäillään toimivan täyssekoitteisena. Prosessin VS-vähennys on 65–70 %. Syöttö tapahtuu vain viikolla, mikä aiheuttaa vaihtelua kaasuntuottoon. Kahteen erilliseen reaktoriin syötetään päivittäin noin 36 tn biojätettä. Prosessitasapainoa tarkkaillaan on-line-mittauksilla, eikä säännöllisiä laboratorioanalyysyjä teetetä. (Gareis, haastattelu 22.11.2020; Kainulainen, haastattelu 22.1.2020)

5.1.5 Doranova

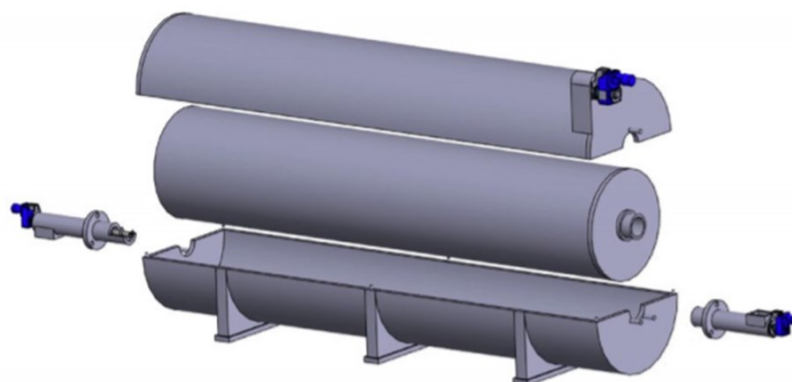
Suomalaisen Doranovan Hardferm -kuivämädätyslaitoksen reaktorissa on kaksi pitkittäisakselista sekoitinta, ja keskeytymätön sekoitus (kuva 24). Yhden reaktorin operointitilavuus on 1200 m³, ja niitä voidaan yhdistää useita rinnakkain. Reaktorit on suunniteltu termofiiliselle prosessille, ja lämpötilahallinnan parantamiseksi myös sekoittajissa on lämmitys. (Mylläinen, haastattelu 8.11.2019)



Kuva 24. Havainnekuva Doranovan Hardferm -reaktorista. Yhdessä reaktorissa on kaksi sekoittajaa (Myllärinen, n.d.).

5.1.6 Eneferm

Suomalainen Eneferm Oy on kehittänyt jatkuvatoimista kuivämädätysreaktoria, jossa on valmius termofiiliselälle prosessille. ENEFERM BIO 100 edustaa keskikokoa mallisarjasta, jossa on kokovaihtoehtoja maatilamittakaavasta teollisuusmittakaavaan. Reaktorit ovat modulaarisia ja sarjavalmistettavia. Reaktorissa on kaksi sisäkkäistä rumpua, joista sisemmässä on kiinteät sekoituslavat, ja sekoitus tapahtuu pyörittämällä koko rumpua, jolloin koko massa sekoittuu, eikä saostumia synny (kuva 25). (Eneferm Oy, 2020)



Kuva 25. Eneferm Oy:n kuivämädätysreaktori. Rummun sisällä on kiinteät laipat, jotka tehostavat sekoitusta. (Järvenpää, 2019)

5.2 Termofiilisen prosessin erityispiirteitä

Termofiilisen prosessin lämpötila pidetään suotuisana termofiilisten mikrobien kasvuille, prosessista riippuen lämpötila-alueella 50–65 °C:ssa. Termofiilisellä prosessilla päästään lyhyempään viipymäaikaan, jolloin pienemmässä reaktorissa saadaan käsiteltyä sama määrä syötettä kuin vastaavassa mesofiilisessä prosessissa. (Cheng, 2010b, s. 161) Nopeamman prosessin lisäksi termofiilisellä prosessilla saavutetaan parempi kaasuntuotto, minkä on arveltu johtuvan lingnoselluloosan hajoamisesta sellaiseen muotoon, että se on mikrobien käytettävissä, kemiallisten reaktioiden kiihtymisestä sekä vaihtoehtoista metaboliareiteistä. (Cieslik ym., 2016, ss. 1495, 1501)

Termofiilisessä prosessissa mikrobit ovat 25–50 % aktiivisempia kuin mesofiilisessä prosessissa. Korkeampi lämpötila saattaa nostaa joidenkin orgaanisten yhdisteiden saatavuutta, koska korkeampi lämpötila yleensä nostaa liukoisuutta. Lisäksi parempi liukoisuus saattaa pienentää viskositeettiä, mikä taas helpottaa sekoittumista. (Schnürer ym., 2010, s. 33)

Tasapainossa olevalla termofiilisellä prosessilla päästään korkeampiin OLR-arvoihin kuin mesofiilisellä prosessilla. Ylösajovaiheen jälkeen hyvin toimivan termofiilisen prosessin OLR voi olla 4–5 kg VS/(m³/vrk), kun mesofiilisellä prosessilla tyypillinen OLR on 2–3 kg VS/(m³/vrk). Kuivämädätyksessä kuormitusarvot ovat huomattavasti korkeampia. Laboratorioolosuhteissa termofiilisessä prosessissa on päästy jopa 24 kg VS/(m³/vrk) kuormitukseen, joka on korkeimpia raportoituja lukemia. Biojätettä on prosessoitu laboratoriossa termofiilisissä olosuhteissa onnistuneesti kuormitusarvolla 13,5 kg VS/(m³/vrk). (Schnürer ym., 2010, s. 36)

Termofiilinen prosessi aiheuttaa vähemmän hajuhaittoja kuin mesofiilinen prosessi. Termofiilisen prosessin rikkivetypitoisuus saattaa olla 30 % pienempi kuin mesofiilisen prosessin, ja termofiilisellä prosessilla tuotettu kaasu sisältää hajua tuottavista yhdisteistä vain kevyitä haihtuvia hiiliveityjä ja joitakin haihtuvia orgaanisia aineita, mutta ei merkittäviä määriä muita rikkijhdisteitä. Mesofiilisellä prosessilla tuotettu kaasu voi sisältää merkittäviä määriä useita pahan hajuisia rikkijhdisteitä. Myös vaahtoaamista tapahtuu termofiilisessä prosessissa mesofiilistä prosessia vähemmän, koska korkeampi lämpötila tuhoaa tehokkaammin rihmamaisia mikrobeja. (Cheng, 2010b, s. 162)

Eri kaasujen liukoisuudet eroavat toisistaan, ja esimerkiksi hiilidioksidin liukoisuus on paljon parempi kuin metaanin (taulukko 4), mutta myös lämpötilalla on suuri merkitys kaasujen liukoisuuteen. Monet biokaasuprosessin tasapainon kannalta merkittävät kaasut, kuten hiilidioksidi ja rikkivety liukenevat termofiilisissä olosuhteissa heikommin veteen kuin mesofiilisissä olosuhteissa. Esimerkiksi hiilidioksidin liukenevuus nousee 36 % siirryttäessä termofiilisestä lämpötilasta mesofiiliseen. (Al Seadi ym., 2008, s. 25)

Taulukko 4. Lämpötilamuutoksen vaikutus kaasujen liukoisuuteen (Al Seadi ym., 2008, s. 25).

Gas	Temperature (°C)	Solubility mmol/l water	Changed solubility 50°C-35°C
H ₂	35	0,749	3,3 %
	50	0,725	
CO ₂	35	26,6	36 %
	50	19,6	
H ₂ S	35	82,2	31 %
	50	62,8	
CH ₄	35	1,14	19 %
	50	0,962	

Hiilidioksidin liukoisuus vaikuttaa tuotetun biokaasun koostumukseen ja prosessin pH-arvoon. Termofiilisessä prosessissa liukenematon hiilidioksidi vapautuu muodostuvaan biokaasuun laskien kaasun metaanipitoisuutta. (Murphy ym., 2013, s. 114) Vastaavasti massa on liuenneena vähemmän hiilihappoa muodostavaa hiilidioksidia, joten pH on korkeampi kuin mesofiilisessä prosessissa, jossa liuenneet hiilidioksidi muodostaa suurempia määriä pH:ta laskevaa hiilihappoa (Kymäläinen, 2015, s. 65).

5.2.1 Termofiilisen prosessin mikrobisto

Termofiilisen prosessin mikrobisto on lajikirjoltaan suppeampi kuin mesofiilisen prosessin. Mikrobin laaja kirjo edesauttaa saavuttamaan tasapainoisen prosessin, koska eri lajeilla on erilaiset olosuhdeoptimat, ja ne sopeutuvat eri tavalla muuttuviin olosuhteisiin. Suppeampi lajikirjo on yksi tekijä, mikä heikentää termofiilisen prosessin adaptointikykyä verrattuna mesofiiliseen prosessiin. (Schnürer ym., 2010, s. 33)

Li, ym. (2015, ss. 973–974) totesivat verratessaan termofiilisen ja mesofiilisen kuivamädätysprosessin mikrobistoja, että mesofiilisen prosessin lajisto on rikkaampi kuin termofiilisen. Termofiilisessä prosessissa erityisesti metanogeenien lajimäärä on vähäisempi, ja hydrogenotrofeihin eli vetyä hyödyntäviin metanogeeneihin kuuluvan *Methanothermobacter* -suvun lajit dominoivat yli 90 % osuudella kaikista metanogeenistä. Syynä voi olla niiden parempi kyky sitoa vetyä tai niiden kyky kasvaa korkeammassa pH:ssa kuin asetilaktisilla eli asetaattia hyödyntävillä metanogeenilla. Asetilaktisten metanogeenien osuus oli termofiilisessä prosessissa hyvin vähäinen, ja mesofiilisessä prosessissa asetilaktisten metanogeenien määrä oli moninkertainen verrattuna termofiiliseen prosessiin. Termofiilisestä prosessista löytyi sen sijaan runsaasti homoasetogeenia, jotka syntrofissa hydrogenotrofisten metanogeenien kanssa hapettavat asetaattia hiilidioksidiksi ja vedyksi. Tutkimuksen mukaan myös bakteerien osalta lajien suhteellisten osuuksien jakaantuminen eri lämpötiloissa poikkeaa huomattavasti toisistaan. (Li ym., 2015, ss. 973–974)

Asetilaktiset metanogeenit ovat herkempiä ammoniakki-inhibitiolle, joten termofiilisessä prosessissa asetilaktiset metanogeenit saattavat korvautua hydrogenotrofisilla metanogeeneilla termofiiliselle prosessille tyypillisesti korkean ammoniakkipitoisuuden vuoksi. Asetilaktisten metanogeenien inhiboituminen johtaa prosessissa vaihtoehtoisen metaboliareitin muodostumiseen, jossa ei-metanogeeniset bakteerit muuttavat asetaatin vedyksi ja hiilidioksidiksi, ja tämän jälkeen hydrogenotrofiset metanogeenit muuttavat vedyn ja hiilidioksidin metaaniksi. Jotta asetaatin muuntaminen vedyksi ja hiilidioksidiksi on mahdollista, tulee vedyn osapaine pysyä riittävän matalana, eli metanogeenien tulee käyttää muodostuva vety metaanintuottoon. Tätä yhteistyötä kutsutaan syntrofiseksi asetaatin hapetukseksi (SAO, Syntrophic Acetate Oxidation). Metaanin muodostuminen asetaatista on hitaampaa hiilidioksidin ja vedyn muodostumisen kautta kuin suoraan asetaatista asetilaktisten metanogeenien muodostamana. (Schnürer ym., 2010, s. 21)

5.2.2 Termofiilisen prosessin inhibitio

Termofiiliset prosessit ovat yleisesti herkempiä häiriöille kuin mesofiiliset prosessit, mutta erityisesti jatkuvatoimiset termofiiliset kuivamädätysprosessit ovat häiriöherkkiä, ja ne palautuvat häiriöistä hitaasti (Karthikeyan ym., 2013, s. 266). Termofiiliset prosessit edellyttävät tasaista lämpötilaa, ja prosessi häiriintyy herkästi nopeista lämpötilavaihteluista (Holm-Nielsen ym., 2013, s. 231). Lisäksi termofiilinen prosessi on herkkä pH-vaihteluille, haihtuville rasvahapoille, ammoniakille sekä toksisille substraateille. (Niu ym., 2014, s. 588)

Termofiilisen prosessin häiriöherkkyyteen vaikuttaa termofiilisen prosessin mikrobiston suppea lajikirjo, mutta myös lämpötilan vaikutus prosessin kemiallisiin ominaisuuksiin. Kuten edellä on todettu, lämpötila vaikuttaa prosessin pH-arvoon kaasujen, erityisesti hiilidioksidin liukenevuuden kautta. Prosessin pH sen sijaan vaikuttaa yhdisteiden esiintymismuotoon prosessissa. Yhdisteiden ionisoitumattomat muodot ovat yleensä mikrobeille toksisempia kuin ionisoituneet muodot. Haihtuvat rasvahapot esiintyvät ionisoitumattomassa muodossa matalissa pH-arvoissa, joten termofiilisen prosessin korkeissa pH-arvoissa ne harvoin ovat toksisia. Sen sijaan ammoniumtyyppellä ionisoitumattoman muodon eli vapaan ammoniakkin osuus kasvaa selvästi pH:n noustessa yli 7,5:een, mikä on tyypillistä termofiiliselle prosessille. Ammoniakki-inhibitio onkin termofiilisen prosessin yleinen ongelma, erityisesti prosessoitaessa typpipitoisia syötettä.

Hiilidioksidin heikompi liukenevuus vaikuttaa myös termofiilisen prosessin puskurikykyyn, jolloin vaarana voi olla VFA-pitoisuuden noususta johtuva pH:n lasku, mikä on tyypillinen prosessihäiriön aiheuttaja etenkin nopeasti hajoavia, hiilihydraattipitoisia syötettä, kuten biojätettä käsiteltäessä.

Prosessin häiriöherkkyyden lisäksi termofiilisten prosessien ylösajo on tyypillisesti pitkäkestoinen ja toisinaan haastava (Cheng, 2010b, s. 161).

5.2.3 Hygienisointikäsitteily

Käsiteltäessä biokaasulaitoksessa eläinperäisiä sivutuotteita, kuten lantaa, ruokajätettä, teurastamojätteitä tai entisiä eläinperäisiä elintarvikkeita, käsitteilylaitokselta vaaditaan sivutuoteasetuksen mukainen hyväksyntä. (Sivutuoteasetus (EY) 1069/2009) Hyväksyntää haetaan Ruokavirastolta. Poikkeuksen muodostavat maatilojen tai yhteislantaloiden biokaasulaitokset, joista mädätysjäännöstä luovutetaan ainoastaan omalle tilalle tai yhteislantalalan tiloille, jolloin rekisteröintiä tai hyväksyntää ei edellytetä. (Ruokavirasto, 2019)

EU:n sivutuotelainsäädännössä on asetettu eläinperäisille sivutuotteille tiettyjä käsitteilyvaatimuksia, joiden tavoitteena on turvata eläimiä ja ihmisiä sivutuotteiden mahdollisesti sisältäviltä taudinaiheuttajilta. Sivutuoteasetuksen (EY) 1069/2009 täytäntöönpanoasetuksessa (Täytäntöönpanoasetus (EU) 142/2011, 2011) säädetään, että biokaasulaitoksessa käsiteltäville luokkaan 3 kuuluville eläinperäisille sivutuotteille tai niistä johdetuille tuotteille on tehtävä hygienisointikäsitteily. Hygienisointikäsitteilyssä partikkelikoko tulee olla enintään 12 mm, lämpötilan tulee olla kauttaaltaan +70 °C ja käsitteilyajan tulee olla vähintään 60 min.

Täytäntöönpanoasetuksen (EU) 142/2011 liitteen V mukaan toimivaltainen viranomainen, eli Ruokavirasto voi antaa kansallisia helpotuksia, ja hygienisointiin voidaan käyttää myös muita kuin edellä mainittuja parametrejä, edellyttäen, että käsitteilyllä voidaan taata riittävä taudinaiheuttajien väheneminen. Tällaisia helpotuksia voidaan antaa käsiteltäessä liitteen V luvun III jakson 2 alakohdassa 2 mainittuja sivutuotteita, joita ovat lanta, ruoansulatuskanavan sisältö, ruokajäte, tietyt maitopohjaiset materiaalit sekä kananmunajäte. Kuitenkin lannan ja ruokajätteen käsitteilylle Ruokavirasto on yleisesti soveltanut seuraavia lämpötila–aikayhdistelmiä: +55 °C/14 vrk, +60 °C/10 vrk tai +65 °C/7 vrk. Käytettävä menetelmä määritellään ja hyväksytään aina laitokohtaisesti laitoksen hyväksynnän yhteydessä. (Torniainen, 2020)

5.3 Kuivamädätysprosessin tyypillisiä ongelmia

Biokaasulaitosten toiminnassa voi esiintyä erilaisia ongelmia. Aiemmin tässä työssä on teoriatasolla käsitelty lähinnä prosessihallintaan liittyviä seikkoja, mutta erityisesti kuivamädätysprosesseissa esiintyy myös fyysisiä ongelmia, kuten syötteen siirtoon ja lämmitykseen liittyviä haasteita.

Kuivamädätysprosesseissa käsitellään laadultaan haastavampia materiaaleja, joiden epäpuhtaudet saattavat estää niiden käsitteilyn märkämädätysprosessissa. Epäorgaanista kiintoainesta saattaa kertyä reaktorin pohjalle ja kuolleisiin kulmiin, joihin sekoittajat eivät yllä. Kiintoaineksen kertyminen heikentää reaktorin lämmitystehoa ja pienentää reaktoritilavuutta. Ongelmaa voidaan ehkäistä sopivalla syötteen esikäsitteilyllä tai reaktorin muotoilulla. (Al Seadi ym., 2008, s. 79)

Tulppavirtausreaktoreissa optimaaliseksi kuiva-ainepitoisuudeksi on ehdotettu noin 23 %. Mikäli kuiva-ainepitoisuus on matalampi, painavat materiaalit, kuten hiekka ja lasi voivat kertyä pohjalle, ja korkeampi kuiva-ainepitoisuus voi heikentää materiaalin liikkumista. Kuiva-ainepitoisuuden ollessa yli 40 %, voi prosessi häiriintyä, koska korkeissa kuiva-ainepitoisuuksissa mikrobin kontakti substraatteihin heikkenee. (Kothari ym., 2014, ss. 178, 187)

Termofiilisen prosessin prosessihallinta on sen herkkyyden vuoksi haastavaa, kuten aiemmin on tullut esille, mutta myös massan lämmittäminen on aiheuttanut ongelmia. Kuivemmassa aineksessa lämpö siirtyy huonommin, joten massan lämpötila saattaa olla epätasainen tai sitä ei saada pysymään termofiilisellä lämpötila-alueella. Mikäli aineksen hygienisointi on suunniteltu toteutettavaksi prosessissa, ei riitä, että mikrobit sopeutuvat saavutettuun lämpötilaan, vaan myös hygienisoitumisen riittävydestä tulee varmistua.

Biojätteiden käsittelyssä biojätepusit saattavat häiritä prosessia. Pussien takertuminen kuljettimiin voi aiheuttaa ongelmia, ja prosessiin joutuneet pussit saattavat kertyä massan pinnalle. Lisäksi pussit eivät ehdi hajota biokaasuprosessissa, jolloin ne haittaavat mädätysjäännöksen käsittelyä.

Kuivamädätyksessä sekoittaminen on välttämätöntä muodostuvan kaasun vapautumiseksi, ja kaasun tuoton lasku saattaa johtua rikkoutuneesta sekoittajasta. Reaktorin korjaustoimien suorittamiseksi reaktori joudutaan tyhjentämään, ja reaktorin uudelleenkäynnistys vaatii pitkän ja haastavan ylösajovaiheen. Tämän vuoksi reaktoreille ei tehdä säännöllisiä huoltotoimia, vaan prosessi keskeytetään ainoastaan todetussa häiriötilanteessa.

Yhteiskäsittelyssä prosessihallintaa saattaa vaikeuttaa syötteiden epähomogeenisuus ja kausivaihtelut. Toisaalta myös tietyn syötteen ominaisuudet saattavat vaihdella siten, että se johtaa prosessin epätasapainoon. Yhdyskuntabiojätteitä käsittelevissä laitoksissa on todettu biojätteen vaihtelevasta koostumuksesta johtuvia prosessihäiriöitä.

Myös syötön epätasaisuus aiheuttaa vaihtelua prosessiolosuhteisiin. Käytännössä laitokset saattavat toimia siten, ettei syöttö ja poisto ole tasaista viikonloppuisin. Reaktoria saatetaan syöttää enemmän loppuviikkoa kohden, jotta substraatteja riittää viikonlopun yli. Syötön epätasaisuudet näkyvät biokaasutuoton vaihteluina. Viikonloppuvaihtelujen lisäksi laitokset, jotka ottavat syötteitä vastaan sopimusperusteisesti, joutuvat käsittelemään toimitettavat syötteet tilanteesta riippumatta.

6 JEPUAN BIOKAASULAITOS

6.1 Yleiskuvaus

Jepuan Biokaasu Oy sijaitsee Uudenkaarlepyyn kunnassa Pohjanmaalla. Yrityksellä on ollut toiminnassa oleva biokaasulaitos vuodesta 2013 lähtien. (Jepuan Biokaasu Oy, n.a.) Biokaasua hyödynnetään laitoksen omaan lämmöntuotantoon sekä läheisen tehtaan prosesseissa. Osa kaasusta puhdistetaan ja käytetään biometaanina läheisessä elintarviketuotantolaitoksessa sekä liikennepolttoaineena biokaasulaitoksen yhteydessä sijaitsevalla tankkausasemalla. Biometaania myös pullotetaan kuljetettavaksi muualle. Mädätysjäännös hyödynnetään lannoitevalmisteena ja maanparrannusaineena. (Länsi- ja Sisä-Suomen Aluehallintovirasto, 2018)

Aiemmin Jepuan Biokaasulla on ollut ympäristölupa 90 000 tonnin vuositaiselle syötteiden vastaanottomäärälle, mutta suunniteltaessa laitoksen laajentamista termofiilisinä toimivilla kuivamädätysreaktoreilla, ympäristölupaan haettiin vastaanottomäärän nostamista 150 000 tonniin vuodessa eli vuotuinen vastaanottomäärä voi nousta 60 000 tonnilla. Ympäristölupa myönnettiin 17.4.2018. Samalla suunnitelmissa oli hankkia kaasun nesteytyslaitteisto, jotta kaasun kuljetus helpottuisi, ja sitä voitaisiin hyödyntää myös raskaan kaluston polttoaineena. Uusien reaktoreiden käyttöönoton jälkeen vuotuisen metaanintuottopotentiaalin arvioidaan olevan lähes 4 600 000 Nm³. (Länsi- ja Sisä-Suomen Aluehallintovirasto, 2018)

6.2 Jatkuvatoinen termofiilinen kuivamädätyslaitos

Märkämädätyslaitoksen rinnalle haluttiin kuivamädätyslaitos, jotta seutukunnalla saatavilla olevia biomassoja saataisiin hyödynnettyä monipuolisemmin. Osa uuden laitoksen syötteistä, kuten ketun lanta tai kananmunamassa, eivät sovellu niiden sisältämien kuorien, kivien ja hiekan vuoksi lainkaan märkämädätykseen, ja joidenkin muiden syötteiden kuiva-ainepitoisuus on niin korkea, että syötteet vaatisivat runsasta laimentamista vedellä tai vesipitoisemmilla syötteillä. Prosessin toteuttaminen termofiilisenä tehostaa ja nopeuttaa prosessia, ja mahdollistaa näin pienemmän reaktoritilavuuden käsiteltävää syötemäärää kohden. Lisäksi termofiilisessä prosessissa hygienisointi saadaan toteutettua prosessin aikana, eikä erillistä hygienisointiyksikköä tarvita.

Jatkuvatoimiset kuivamädätyslaitokset ovat vasta yleistymässä Suomessa, eikä termofiilisenä toimivia kuivamädätyslaitoksia ole vielä lainkaan. Tietävästi joitakin epäonnistuneita yrityksiä vastaaville laitoksille on ollut, mutta prosesseja ei ole saatu toimimaan suunnitellulla tavalla. Jepuan laitos tulee olemaan Suomessa ensimmäinen termofiilinen, jatkuvatoimisenä kuivamädätyksenä toimiva prosessi, ja se tulee olemaan myös työn tilaajayrityksen, biokaasulaitosratkaisuja toimittavan Doranovan referenssilaitos. Koska aiempaa tietoa kyseisen tyyppisestä prosessista Suomen

olosuhteissa ei juuri ole, tulee prosessia, sen kulkua ja mahdollisia ongelmakohtia pyrkiä arvioimaan ja ennakoimaan mahdollisimman kattavasti. Kuivamädätys vaatii laitoksen mekaniikalta erityistä suunnittelua, kun taas termofiilisyyden vaikuttaa prosessin biokemiallisiin olosuhteisiin, ja tätä kautta prosessin mikrobistoon ja prosessitasapainoon.

Biokaasulaitoksen käyttöönotto vaatii yleensäkin syötteiden soveltuvuuden arviointia ja syötekoostumuksen optimointia, mutta yleisesti käsiteltyjen syötteiden, kuten jätevesilietteiden ominaisuuksista on paljon kokemusta ja kirjallisuustietoa. Sen sijaan Jepuan laitoksessa käsiteltävät biomassat koostuvat erilaisista materiaaleista ja niiden suhteet vaihtelevat, ja siksi syötesekoksen ja prosessin optimoinnissa on useita vaikeasti ennakoitavia seikkoja.

6.3 Kuivamädätysprosessin kuvaus

Jepuan kuivamädätyslaitos koostuu kahdesta nettotilavuudeltaan 1200 m³ suuruisesta, pitkittäissekoitteisesta reaktorista. Reaktoreissa on lämmitysseinien ja lattian lisäksi sekoittajien akseleissa, jotta lämpö jakaantuisi tasaisesti koko massaan. Tasaisen lämpötilan varmistamiseksi kuljetushihnalla on syötteen esilämmitys.

Nestemäisille ja kuiville syötejakeille on omat puskurivarastot. Esikäsitelyyksikkönä on murskain. Syöttöjärjestelmä on automatisoitu, ja syöttö toteutetaan jatkuvatoimisesti ilman taukoja. Syöttö pysyy tasaisena myös viikonloppuisin, mikä vähentää kuormitusvaihteluista johtuvaa metaanintuoton vaihtelua ja parantaa prosessin stabiiliutta. Jatkuvatoimisella syötöllä ehkäistään myös kuljettimien kuivumista, mikä on vaarana kuljettimella tapahtuvan esilämmityksen vuoksi. Reaktorin jatkuva syöttö vähentää myös lämmitykseen vaadittavan piikkitehon tarvetta.

Prosessi on jatkuvasekoitteinen suunnitellun sekoitusnopeuden ollessa 1–2 rpm. Jatkuvalle sekoitukselle ehkäistään jaksottaisuuden aiheuttamat energiakulutuspiikit sekoituksen käynnistyessä. Teknisesti sekoitus on mahdollista keskeyttää.

Mädätysjäännöksen poistolle on varattu yhteydet reaktorin alaosasta sekä mahdollisten tukosten varalta myös ylempää. Poisto tapahtuu mäntäpumppulla, ja jokaisessa reaktorissa on kaksi mäntäpumppua ongelmatilanteiden varalle. Reaktoreissa on mädätysjäännöksen uudelleenkierrätys lämpöhukan pienentämiseksi ja mikrobimassan säilyttämiseksi reaktorissa.

Laitoksessa ei ole erillistä hygienisointiyksikköä, vaan hygienisointi tapahtuu prosessin aikana reaktorissa. Hygienisointiaika on 21 vrk.

Prosessiseurantaan on reaaliaikaiset mittaukset lämpötilalle, pinnan korkeudelle, biokaasuntuotolle ja kaasun metaanipitoisuudelle. pH saadaan määritettyä paikan päällä, mutta ei reaaliaikaisesti. Reaktoreissa on

näytteenottomahdollisuus kolmesta eri kohdasta: prosessin alkupäästä, keskivaiheilta sekä prosessin loppuvaiheesta, noin 5 m:n välein sijoittuen tasaisesti 20 m pitkän reaktorin eri kohtiin.

Mädätysjäännös johdetaan kolmiruuviselelle separointiyksikölle, jossa neste- ja kiintojake erotetaan toisistaan. Nestejakeessa typpipitoisuus on suurempi ja kuivajake taas sisältää suurimman osan fosforista. Molemmat jakeet käytetään lannoitetuotteina lähialueen maanviljelyssä.

6.4 Kuivamädätysprosessin laskennallinen tarkastelu

6.4.1 Laskelmissa käytetyt oletusarvot

Ylösajon mallintamisessa sekä prosessiolosuhteiden arvioinnissa on käytetty tiettyjä, parhaaseen mahdolliseen arvioon perustuvia oletusarvoja. Osa arvoista perustuu kirjallisuuteen ja osa toimijan antamiin, prosessisuunnittelun lähtökohtana oleviin arvoihin. Oletusarvojen pohjalta tehtyjä mallilaskelmia on käytetty havainnollistamaan eri tekijöiden vaikutuksia prosessiolosuhteisiin ja prosessin kulkuun. Tämän opinnäytetyön tuotoksena laaditut excel-taulukot mahdollistavat todellisten arvojen käytön laskelmissa, kun arvot ovat käytettävissä.

Mallilaskelmissa on käytetty reaktorin tilavuutena niiden operointitilavuutta eli $2 \times 1200 \text{ m}^3$. Yhden reaktorin kokonaistilavuus on 1440 m^3 , mutta reaktoria ei voida täyttää aivan täyteen, vaan yläosaan täytyy jäädä tyhjää tilaa. Ylösajon mallintaminen on tehty yhden reaktorin tilavuudelle, koska ylösajo on suunniteltu toteutettavaksi yksi reaktori kerrallaan.

Lämpötilan oletetaan lähtökohtaisesti olevan vakio ($55 \text{ }^\circ\text{C}$), koska hygienisointikäsitteily perustuu prosessilämpötilaan. Biokaasuprosessin pH on tyyppillisesti välillä 7–8, ja termofiilisen prosessin pH on yleensä mesofiilistä prosessia korkeampi, joten pH:n ennakoidaan asettuvan noin 8:aan. Laskelmissa pH vaikuttaa ammoniakkipitoisuuteen. Ammoniakkipitoisuuslaskelmia on tehty erilaisilla pH- ja ammonifikaatio-oletuksilla.

Laskelmissa vuosittaiseksi käsittelemääräksi on oletettu työn toimeksiantajan ilmoittama $28\,000 \text{ tn/vuosi}$, ja syötekoostumukseksi luvun 6.4.3 taulukossa 5 esitetyt syötemäärät. Mikäli laskelmissa käytetään erilaista syötekoostumusta, mainitaan se erikseen.

Mädätysjäännöksen käsiteltävyyden vuoksi tavoitteellinen kuiva-ainepitoisuus on 15–20 %. Jos kuiva-ainepitoisuus on matalampi, reaktorin tulpavirtaus voi muuttua suoraksi virtaukseksi esimerkiksi reaktorin yläosassa. Kierrätystarpeen oletetaan olevan 10–30 %. Laskelmat on tehty 20 % kierrätysolettamalla.

Ammonifikaatioksi on laskelmissa oletettu 50 %, koska syöteseoksessa on sekä lantaa että kasvibiomassaa. Ammonifikoitumisaste vaikuttaa prosessin ammoniumtyypikuorman prosessin edetessä, mutta myös kierrätettävän mädätysjäännöksen kautta. Laskelmia mädätysjäännöksen ammoniumtyypipitoisuudesta on tehty myös muilla ammonifikoitumisolettamilla. Kierrätettävässä mädätysjäännöksessä mahdollisesti tapahtuvaa ammonifikaatiota ei ole huomioitu laskelmissa, koska sen määrää ei voida realistisesti ennakoita, mutta sen tiedetään olevan vähäisempää jo kertaalleen prosessoidussa mädätteessä. Kierrätettävä määrä on lisäksi vähäinen uuteen syötteeseen verrattuna, joten merkitys kokonaisuudessa on vähäinen. Myös ympäristö on huomioitu samalla periaatteella eli mahdollista ympäristössä vielä tapahtuvaa ammonifikaatiota ei ole huomioitu.

Mädätysjäännöksen TS- ja VS-vähenemät on arvioitu siten, että puolelle syötemäärästä on huomioitu säilörehulle esitetyt vähenemät (TS 49 %, VS 57 %) ja puolet syötteestä on laskettu lannalle annettujen vähenemien mukaisesti (TS 30 %, VS 38 %) (Kymäläinen ym., 2015, s. 24). Todellisuudessa lantaa on arvioitu prosessoitavan hieman vähemmän (n. 44 %), mutta huomioiden useat muuttujat ja epävarmuustekijät, oletetaan keskimääräisiä vähenemiä TS:lle 40 % ja VS:lle 47 %, pitää riittävän tarkkoina mallilaskelmiin.

Yleisesti laskelmissa käytetään massayksiköitä, mutta reaktoritilavuutta vaativissa laskelmissa, lähinnä HRT-laskuissa 1 m^3 käsiteltävää seosta oletetaan painavan 1 tn.

6.4.2 Syötteet

Prosessissa käsiteltävät syötteet ovat alueen elinkeinolle tyypillisiä ja peräisin lähiseudulta. Tarkkaa syötekoostumusta ei suunnitteluvaiheessa tiedetä, ja prosessissa saatetaan käsitellä jatkossa myös muita syötteitä niiden saatavuuden mukaan, mutta lähtökohtaisesti syöteseos tulee aina sisältämään sekä sianlietettä että nurmirehua. Lisäksi tavoitteena olisi käsitellä lähialueen turkistarkoilta saatavaa ketun lantaa. Lietteen ja lannan lisäksi syöteseos saattaa sisältää myös muita matalan C/N-suhteen syötteitä kuten kasvihuonejätettä ja viljarehua. Runsashiilisempiä syötteitä, joilla saadaan nostettua C/N-suhdetta, ovat nurmi, perunajäte, perunajauho ja sahanpuru. Purun hiilipitoisuus on korkea, mutta hiili on pääasiassa lignoselluloosana, ja tämän vuoksi heikosti mikrobien käytettävissä. Joitakin syötteitä saadaan satunnaisesti tai kausittain, mikä aiheuttaa epävarmuutta syötelaskelmiin.

Sianlietteen kuiva-ainepitoisuus on matala, ja siirtokustannusten alentamiseksi läheisiltä sikaloilta on rakennettu biokaasulaitokselle siirtoputki, jota myöten liete toimitetaan laitokselle käsiteltäväksi. Rinnalla menee toinen putki, jota pitkin mädätysjäännöstä siirretään tiloille lannoitekäyttöön. Lietettä käsitellään märkämädätyslaitoksessa, mutta sitä on käytettävissä tarpeen mukaan myös kuivämädätysreaktorissa. Sianlietteellä saadaan

laimennettua syöteseos sopivaan kuiva-ainepitoisuuteen sekä parannettua massan puskurikykyä.

Pääasiallisia syötteitä, sianlietettä, ketun lantaa sekä nurmea arvioidaan olevan saatavilla suhteellisen tasaisesti, mutta toisia syötteitä saadaan kausiluonteisesti, ja osa syötteistä on sellaisia, kuten perunajäte, joita saattaa tulla kerralla suurempi erä käsiteltäväksi. Perunasta ei tehty syöteanalyysyjä, joten sitä ei ole huomioitu laskelmissa, mutta kirjallisuustietojen mukaan perunan kuiva-aineesta suurin osa koostuu hiilihydraateista, joista suurin osa on tärkkelystä (Wang & Keshwani, 2010, s. 48). Peruna poikkeaa muiden syötteiden koostumuksesta helposti hajoavan hiilihydraattipitoisuutensa vuoksi. Syötettäessä prosessiin perunaa, C/N-suhde nousee ja hydrolyysivaihe nopeutuu, mikä saattaa johtaa haihtuvien rasvahappojen kertymiseen. Myös nurmen C/N-suhde saattaa olla suhteellisen korkea, mutta hiili on hitaammin hajoavassa muodossa.

Myös kasvihuonejätettä, kuten sianlietettä, käsitellään yrityksen märkämädätyslaitoksessa, ja sitä voidaan tarpeen mukaan käsitellä myös kuivämädätysprosessissa. Kasvihuonejätteen C/N-suhde on melko matala, joten sillä ei saada nostettua seoksen C/N-suhdetta. Kasvihuonejätteen kuivaainepitoisuus on myös melko alhainen. Kasvihuonejäte on materiaalina vaihtelevaa, eikä sen ominaisuuksien arvioinnissa voida luotettavasti hyödyntää kirjallisuudesta saatavia tietoja.

Ylijäämänurmea saadaan käsiteltäväksi rajattomasti. Nurmen kuivaainepitoisuus sekä C/N-suhde ovat suhteellisen korkeat, joten sillä saadaan tarvittaessa nostettua sekä kuivaainepitoisuutta että C/N-suhdetta. Nurmi on oleellinen hiilen lähde, koska muut syötteet ovat vähähiilisiä tai hiili ei ole mikrobien käytettävissä (sahanpuru). Kirjallisuudessa nurmesta löytyy runsaasti tutkimustietoa, mutta ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti riippuen useista eri tekijöistä. Syötteenä saatavan nurmen C/N-suhde oli tutkimustulosten perusteella nurmelle kirjallisuudessa esitetyn vaihteluvälin alarajalla.

Syötteenä saatava verinen sahanpuru on materiaalina oletettavasti melko epähomogeenista. Sahanpurua käytetään kuivikkeena turkisten käsittelyprosessissa, ja siihen on imeytynyt vaihteleva määrä verta ja mahdollisesti myös muuta kosteutta. Kuivalle sahanpurulle on saatavilla ominaisuustietoja kirjallisuudesta, mutta prosessoitava verinen sahanpuru poikkeaa puhtaasta purusta, eikä kirjallisuustietoa voida luotettavasti käyttää. Purun käyttäytymistä prosessissa on vaikea ennakoida.

Ketun lannalle on ominaista, että siihen on sekoittunut kiviä ja hiekkaa. Kuivikkeena käytetään pääasiassa olkea, mutta seassa saattaa olla myös kutterilastua. Kutterilastu on hiilipitoista, mutta se ei ole ligniinipitoisuuden vuoksi mikrobien käytettävissä. Myös oljen sisältämä hiili saattaa vaatia pidemmän hajoamisajan, mutta toisaalta, jos lanta ei tule käsiteltäväksi tuoreeltaan, saattaa oljen hajoaminen olla alkanut, ja hiili vapautuu

käytettäväksi prosessin aikana. Turkiseläinten rehu sisältää runsaasti fosforia, mikä johtaa myös lannan korkeaan fosforipitoisuuteen. Fosfori keryy mädätysjäännökseen, mutta fosfori ei tiettävästi lisää inhibitoriskiä prosessissa. Ketun lanta saattaa sisältää myös mikrobilääkejäämiä, koska muista tuotantoeläimistä poiketen turkiseläimille annetaan mikrobilääkehoidon usein rehuun sekoitettuna massalääkityksenä (Elintarviketurvallisuusvirasto & Helsingin yliopiston eläinlääketieteellinen tiedekunta, 2016, s. 46). Ammoniakki-inhibitoriskin vuoksi ketun lantaa voidaan syöttää vain rajallisesti, joten olettavasti mikrobilääkejäämät eivät muodostu ongelmaksi.

Perunajauhoa ja viljarehua saadaan syötteeksi sekoitettuna keskenään, koska perunajauho on yksinään vaikeasti käsiteltävää pölyävyytensä vuoksi. Komponenttien osuuksia seoksessa ei tiedetä, mutta matalasta C/N-suhteesta päätellen viljarehun osuus on ollut näytteeksi saadussa erässä merkittävä. Syötelaskelmia tehtäessä ei myöskään ollut tietoa, tuleeko seossuhde olemaan jatkossa sama, mutta kokonaismäärän oletetaan olevan niin vähäinen, että sillä ei ole suurta merkitystä syöteseoksen ominaisuuksiin.

Syötteeksi voidaan saada myös kananmunajätettä, mutta siitä ei tehty syöteanalyysyjä, joten se jätettiin pois laskelmista. Terveystietokeskuksen (2020) tietojen mukaan kananmunan syötävä osa koostuu pääasiassa rasvasta (9 %) ja proteiinista (13 %), hiilihydraattipitoisuuden ollessa merkityksetön (0,3 %), joten C/N-suhde on oletettavasti matala, eikä kananmuna tule nostamaan prosessin hiilipitoisuutta. Kananmunajätettä on arvioitu saatavan käsiteltäväksi 500 tn/vuosi eli käsiteltävä määrä suhteessa kokonaismassaan on melko pieni. Kerralla suurina määrinä lisättynä kananmunamassa saattaa aiheuttaa epätasapainoa prosessiin, koska se poikkeaa huomattavasti muusta käsiteltävästä materiaalista.

Syötteille on suhteellisen hyvät varastointimahdollisuudet. Märkiä syötteitä voidaan varastoida erillisissä varastosäiliöissä, ja kuivia syötteitä voidaan säilyttää varastohallissa jopa useita kuukausia. Tämä antaa mahdollisuuden syötekoostumuksen suunnitteluun. Hajuhaittojen ehkäisemiseksi syötteiden varastointitarvetta olisi kuitenkin hyvä välttää, vaikka hajukausuille onkin erillinen keräys- ja käsittelyjärjestelmä.

6.4.3 Syötemäärät ja ominaisuudet

Laitoksen vuotuisen käsittelykapasiteetin on arvioitu olevan 28 000 tn eli 14 000 tn/reaktori. Laskelmat on tehty työn tilaajan ilmoittamien suurimpien mahdollisten syötemäärien mukaisesti täydentäen syöteseos rajattomasti saatavilla olevalla nurmella ja sianlietteellä maksimaaliseen käsittelykapasiteettiin. Nurmen ja lietteen osuudet on laskettu siten, että syöteseoksen kuiva-ainepitoisuus asettuu noin 30 %:iin. Matalampi kuiva-ainepitoisuus johtaisi mädätysjäännöksen liian alhaiseen kuiva-ainepitoisuuteen. Korkeampi kuiva-ainepitoisuus saavutettaisiin nostamalla nurmen

tai ketunlannan osuutta. Prosessitasapainon kannalta nurmen osuutta voitaisiin turvallisesti nostaa.

Syöteanalyysit tehtiin kuudesta eri syötemateriaalista: ketun lannasta, kasvihuonejätteestä, verisestä sahanpurusta, perunajauhon ja viljarehun seoksesta, sianlietteestä ja nurmirehusta (taulukko 5). Näytteet toimitettiin Hämeen ammattikorkeakoulun (HAMK) laboratorioon analysoitavaksi 21.2.2020, ja näytteistä tutkittiin HAMK:ssa kokonaistyyppi (Kjeldahl), ammoniumtyppi, TS (total solids, kuiva-aine) ja VS (volatile solids, orgaaninen aines). Ulkopuoliseen laboratorioon lähetettiin määritettäväksi TOC (Total Organic Carbon), K, P, Mn, Mo, Ni, S, Se ja Zn. Tulokset ovat liitteenä (liite 1).

Näytteenoton menetelmästä ei ollut käytettävissä dokumentoitua tietoa, ja näytteenottoon saattaa liittyä tulosten luotettavuutta heikentäviä tekijöitä.

Taulukko 5. Arvioidut syötteiden vuosimäärät ja syöteseoslaskelmissa käytetyt analyysitulokset.

SYÖTTEET	t/vuosi	TS%	VS% (tuore- painosta)	C/N	C (kg/tn)	N (kg/tn)	NH ₄ -N (kg/tn)
Kasvihuonejäte	1 300	6,2	5,5	7	25	3,43	0,27
Verinen sahanpuru	1 300	28,1	25,7	22	118	5,35	0,24
Ketunlanta	5 000	38,5	23,6	2	81	38,99	4,44
Perunajauho+viljarehu	26–52, ka 39	43,4	42,8	11	174	15,62	0,31
Nurmi	rajattomasti/ 13 000	42,9	38,8	17	176	10,61	0,27
Sianliete	rajattomasti/ 7 361	4,1	2,9	3	16	5,38	3,07

Joidenkin syötteiden, etenkin nurmen ja sahanpurun, C/N-suhteiden ennakointiin olevan analyysituloksien osoittamia pitoisuuksia korkeampia. Nurmisäilörehun C/N-suhteen on kirjallisuudessa esitetty vaihtelevan välillä 10–25 ja sahanpurun C/N-suhteen olevan jopa yli 500 ja kuiva-ainepitoisuuden 80 % (Korres ym., 2013, s. 200). Nurmirehun koostumukseen vaikuttavat mm. korjuuaika, nurmilajit sekä maaperän ravinteet (McEniry ym., 2013, ss. 52, 55). Kirjallisuudessa sianlietteen C/N-suhteen on esitetty vaihtelevan välillä 3–10 (Al Seadi ym., 2008, s. 19), joten myös sen suhde on analyysitulosten perusteella vaihteluvälin alarajalla. Luken tutkimuksessa (Luostarinen ym., 2017, s. 25) ketunlannan kokonaistyyppipitoisuus vaihteli olosuhteista ja eläimestä riippuen välillä 15–19 kg/tn, ollen selvästi matalampi kuin näytteenä olleen ketunlannan pitoisuus. Koska syötteiden muodostumisolosuhteita ei tunneta tarkkaan, eikä erojen syitä kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin voida luotettavasti arvioida, on syötelaskelmissa käytetty analyysituloksia. Kasvihuonejätteen, perunajauho-viljarehuseoksen eikä ketunlannan koostumuksesta eikä

muodostumisolosuhteista ole täsmällistä tietoa, joten niiden analyysituloksia ei katsottu aiheelliseksi verrata kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin.

Selvästi korkeimmat, muihin syötteisiin verrattuna yli kymmenkertaiset, ammoniumtyppipitoisuudet tuoretonnia kohden ovat ketunlannalla ja si-anlietteellä. Kokonaistyyppipitoisuuksissa ei ole yhtä suuria eroja. Vain ketunlannalla pitoisuus (39 g/kg) on yli kaksi kertaa korkeampi kuin toiseksi korkeimman pitoisuuden perunajauho–viljarehu-seoksella (16 g/kg). Muiden syötteiden pitoisuudet vaihtelevat välillä 3–11 g/kg. Koska perunajauho–viljarehu-seoksen osuus on joka tapauksessa hyvin pieni, vain ketunlannalla on yksittäisenä syötteenä käytännössä merkitystä syöteseoksen kokonaistyyppipitoisuuteen. Nurmella on matala ammoniumtyppipitoisuus, mutta toisaalta melko korkea kokonaistyyppipitoisuus. Kasvipärisillä syötteillä ammonifikoitumisaste on korkeampi kuin lantapohjaisilla syötteillä, joten oletettavasti nurmen typpi nostaa ammoniumtyppipitoisuutta enemmän prosessin loppupäässä kuin lanta. Ainoastaan ketunlannalla sekä typpi- että ammoniumtyppipitoisuudet ovat korkeita, joten sen vähentäminen syöteseoksesta vähentää yksiselitteisesti prosessin ammoniumtyppikuormaa. Ja toisaalta kasvihuonejätteellä on matala typpi- ja ammoniumtyppipitoisuus, joten sen osuuden kasvattaminen vähentää laskennallista mädätteen ammoniumtyppipitoisuutta, mikäli ei huomioida syötteiden erilaisia ammonifikoitumisasteita. Kasvihuonejätteellä ammonifikaatio on oletusarvoisesti suurempaa kuin lannalla. Lisäksi kasvihuonejäte oletettavasti sisältää nopeasti hajoavaa orgaanista ainesta, ja poikkeaa siksi muista syötteistä. Vaikka ympäristö on adaptoitunut biojätteen käsittelyyn, aiheuttaisi kasvihuonejätteen osuuden kasvattaminen mikrobien uudelleenadaptoitumistarpeen mentäessä kohti lopullista syötekoostumusta. Kasvihuonejäte lisäisi myös VFA-pitoisuuden nousuriskiä. Laskelmissa syöteseokselle on oletettu 50 %:n ammonifikoitumisaste riippumatta syöteseoksen kasvi- tai lantapainotteisuudesta.

Verisen sahanpurun ominaisuuksien vaikutukset prosessin kulkuun tulee huomioida tietyllä varauksella, koska materiaalin voidaan olettaa olevan koostumukseltaan vaihtelevaa, ja suurin osa syötteen sisältämästä hiilestä voidaan olettaa olevan sitoutuneena ligniiniin, jolloin se ei ole mikrobien käytettävissä. Jos sahanpurun osuutta prosessissa nostetaan, se voi johtaa vääristävään C/N-suhteeseen.

6.4.4 Syöteseoksen koostumus

Syöteseoksen ominaisuudet laskettiin käyttäen Taulukossa 5 esitettyjä syötemääriä sekä syötteistä tehtyjä analyysituloksia. Syöteseoksen keskeisimmät ominaisuudet on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Syöteseoksen keskeisimmät ominaisuudet.

TS (%)	29,5
VS (%)	24,5
VS/TS	83
C/N	7,8
N-tot (kg/tnTS)	46,5
NH ₄ -N _(syöte) (g/kgFW ¹⁾)	1,7

¹⁾ FW = Fresh Weight = tuorepaino

Kuiva-ainepitoisuus on säädetty nurmen ja sian lietteen suhteella 30 %:iin. Kuiva-ainepitoisuus voisi olla korkeampikin, enimmillään noin 40 %, mutta käytännössä se tarkoittaisi hyvin suurta nurmen määrää. C/N-suhde jää melko matalaksi ollen 8, kun kirjallisuudessa esitetty suositeltava suhde on 20–30, ja pienimmilläänkin vähintään 10. Syöteseoksen ammoniumtyypipitoisuus on 1,7 g/l, kun tasapainoisessa prosessissa se on tyypillisesti välillä 3–5 g/l. Korkea kokonaistyyppipitoisuus nostaa kuitenkin ammoniumtyypipitoisuutta prosessin kuluessa, joten syötteen alkuperäisen ammoniumtyypipitoisuuden merkitys jää melko vähäiseksi. VS-pitoisuus ja VS/TS-suhde kertovat lähinnä syötteen metaanintuottopotentialista, mikä on oleellista tehtäessä prosessin kannattavuuslaskelmia, mutta prosessitasapainon arvioinnissa niiden merkitys on vähäinen. VS-pitoisuus vaikuttaa kuiva-ainepitoisuuden vähenemiseen, mutta se on huomioitu kirjallisuudessa keskimääräisiksi ilmoitettuna TS-vähenemänä.

Eri syötteistä kertyvät kuiva-aineen (TS), orgaanisen aineen (VS), hiilen ja typen sekä ammoniumtypen määrät on esitetty taulukossa 7. Ammoniumtyppi tulee syöteseokseen pääasiassa ketunlannasta ja sianlietteestä. Selvästi merkittävin hiilenlähde on nurmi ja suurin typpikuorman tuoja on ketunlanta, vaikka sen osuus on vain 18 % syöteseoksen kokonaismassasta. Muilla yksittäisillä syötteillä ei ole niiden vähäisyyden vuoksi oleellista merkitystä prosessin mallintamisen kannalta.

Taulukko 7. Eri syötteistä kertyvät TS-, VS-, hiili-, typpi- ja ammoniumtyppimäärät. Merkittävimmät hiilen ja typen lähteet on korostettu keltaisella. Tässä esitetty ammoniumtyppimäärä on syötteen sisältämä määrä, eikä tässä ole huomioitu prosessin kuluessa muodostuvaa ammoniumtyppiä.

SYÖTTEET	tn/vuosi	TS tn/vuosi	VS tn/vuosi	Hiili kg/vuosi	Typpi kg/vuosi	Ammonium- typpi kg/vuosi
Kasvihuonejäte	1 300	81	72	32 500	4 459	351
Verinen sahanpuru	1 300	365	334	153 400	6 955	312
Ketunlanta	5 000	1 925	1 180	405 000	194 950	22 200
Perunaj.+viljarehu	39	17	17	6 786	609	12
Nurmi	13 000	5 577	5 044	2 288 000	137 930	3 510
Sianliete	7 361	302	213	117 776	39 602	22 598
Yhteensä	28 000	8 267	6 860	3 003 462	384 505	48 983

Syöteseosten koostumuslaskelmissa on huomioitu ainoastaan ne syötteet, joista on käytettävissä analyysitulokset. Muut mahdolliset syötteet, kuten kananmunamassa, ja niiden määrät saattavat vaihdella, mutta kokonaisuudesta ne ovat oletettavasti joka tapauksessa vain pieni osa.

6.5 Prosessin kulun ennakointi ja arvioita muuttujien vaikutuksesta

Prosessin kulkua voidaan ennakoida tietyillä oletusarvoilla. Ennakoinnissa on pyritty tuomaan esille sellaisten muuttujien vaikutusta prosessiin, joihin voidaan vaikuttaa, kuten syötekoostumus ja orgaaninen kuormitus sekä korostamaan sellaisia tekijöitä, joilla on prosessitasapainon kannalta huomattava merkitys, kuten typen käyttäytyminen ja pH, jotta näihin osataan varautua. Laskelmat on tehty prosessin lähtöedellytysten mukaisten kuiva-ainepitoisuuksien ja lämpötilan pohjalta.

6.5.1 Syötekoostumuksen vaikutus prosessiin

Prosessin kulun ennakoinnissa tulee huomioida syöteseoksen koostumuksen lisäksi prosessin aikana massassa tapahtuvat muutokset. Prosessitasapainon ja prosessin tarkoituksenmukaisen etenemisen kannalta oleellisia muuttujia ovat kuiva-ainepitoisuus sekä typen ammonifikaation vaikutus ammoniumtyypin ja ammoniakkin määrään. Mädätysjäännöksen kierrätyksen vaikutusta käsitellään luvussa 6.5.4.

Syötekoostumuksen muutosten vaikutusten ennakoinnissa on käytetty aiemmin esitettyjä oletusarvoja lämpötilan, pH:n, ammonifikaation, TS-vähennyksen sekä vuosikäsittelymäärän osalta. Käytännössä ammonifikaatio ja TS-vähennys muuttuvat syötekoostumuksen muuttuessa, mutta muutoksen ennakointi on epävarmaa, eikä sitä sen vuoksi ole huomioitu laskelmissa.

Syöteseosvertailu tehtiin tavoiteseoksen (perusseos) sekä kolmen vaihtoehtoisen syöteseoksen kesken, millä verrattiin ketunlannan, nurmen ja sianlietteen osuuksien muutoksia syötekoostumukseen ja ennakoitiin syöteseoksessa tapahtuvia muutoksia prosessin aikana. Vertailun tulokset on kirjattu taulukkoon 8.

Perusseos

Perusseoksessa on huomattavan matala C/N-suhde (8). Korkea typpipitoisuus johtaa vallitsevissa prosessiolosuhteissa (t 55 °C, pH 8) korkeaan ammoniakkipitoisuuteen jo alkuvaiheessa (491 mg/l) ja kestäättömän korkeaan pitoisuuteen (2674 mg/l) prosessin lopussa. Adaptoitunut prosessin tiedetään kestävän 800–900 mg/l NH₃ pitoisuuksia.

Vaihtoehto 1

Nurmen määrää on nostettu seoksessa 71 %:iin sianlietteen osuutta vähentämällä. C/N-suhde on hieman korkeampi (10) kuin perusseoksessa, mutta ammoniakkipitoisuudet ovat edelleen korkeat sekä syötessä (294 mg/l) että prosessin lopussa mädätessä (2795 mg/l). Suurella nurmen määrällä seoksen kuiva-ainepitoisuus nousee lähelle maksimia, jonka katsotaan olevan noin 40 % mikrobien riittävän kontaktin turvaamiseksi substraatin kanssa.

Vaihtoehto 2

Ketunlannan määrä on pudotettu kymmenesosaan perusseoksesta korvaten vähennetty osuus sianlietteellä. Muutoksella ei ole juuri vaikutusta syötteen ammoniakkipitoisuuteen (429 mg/l), mutta matalamman kokonaistyppipitoisuuden vuoksi mädätteen ammoniakkipitoisuus (1721 mg/l) on edellisiä vaihtoehtoja selvästi matalampi, mutta pysyy edelleen huomattavasti yli tavoitearvon.

Vaihtoehto 3

Vähennetyn ketunlannan osuus sekä osa sianlietteestä on korvattu nurmella. Seoksessa C/N-suhde on edelleen matala (14), mutta korkein vertailuseoksista. Kokonaistyppipitoisuus on vertailuseoksista matalin, mikä vaikuttaa madaltavasti myös mädätteen ammoniumtyppi- sekä ammoniakkipitoisuuksiin (1794 mg/l). Ammoniakkipitoisuus jää edelleen selvästi yli adaptoitumisrajan.

Taulukko 8. Syöteseossuhteiden muutosten vaikutus syöteseoksen ominaisuuksiin. (TS-vähennys 40 %, ammonifikaatio 50 %, $t +55\text{ }^{\circ}\text{C}$, pH 8 ja käsittelymäärä 28 000 tn/vuosi) Taulukossa on korostettu keltaisella merkittävät syötteiden määrien muutokset, ja alemmassa taulukossa on korostettu viitearvojen ylitykset. Ammoniakkin kodalla vaalealla on korostettu adaptoituneen prosessin siedämät arvot ja tummalla arvot, jotka oletettavasti johtavat prosessin kaatumiseen.

	Perusseos		Vaihtoehto 1		Vaihtoehto 2		Vaihtoehto 3	
	tn	%	tn	%	tn	%	tn	%
Kasvihuonejäte	1 300	5	1 300	5	1 300	5	1 300	5
Verinen sahanpuru	1 300	5	1 300	5	1 300	5	1 300	5
Ketunlanta	5 000	18	5 000	18	500	2	500	2
Perunaj.+viljärehu	39	0	39	0	39	0	39	0
Nurmi	13 000	46	20 000	71	13 000	46	20 000	71
Sianliete	7 361	26	361	1	11 861	42	4 861	17
C/N	8		10		12		14	
TS syöte	30		39		24		34	
TS mädäte	20		28		16		23	
N-tot syöte (kg/tnTS)	47		38		35		29	
NH ₄ -N _{syöte} (g/kgFW)	1,7		1,0		1,5		0,8	
NH ₄ -N _{mädäte} (g/kgFW)	9,5		10,0		6,1		6,4	
NH ₃ _{syöte} (mg/l)	491		294		429		233	
NH ₃ _{mädäte} (mg/l)	2674		2795		1721		1794	

Vertailun perusteella voidaan todeta, että vertailussa mukana olevilla syötteillä on vaikeaa saavuttaa tavoitteellista C/N-suhdetta, jonka alaraja on lähteestä riippuen 10–20. Matala C/N-suhde on kääntäen verrannollinen typpipitoisuuteen, mikä taas johtaa vallitsevissa prosessiolosuhteissa huomattaviin ammoniakkipitoisuuksiin. Syötteen ammoniakkipitoisuudet ovat siedettäviä adaptoituneelle prosessille, mutta syötekoostumusta muuttamalla prosessin loppupään ammoniakki-inhibition riskiä ei saada hallintaan.

Nurmen osuutta voidaan nostaa, mutta silloin lannan osuus vähenee, ja massan puskurikyky laskee. Sianlietteen määrän lisääminen laskee kuiva-ainepitoisuutta, jolloin prosessi ei kulje tulppavirtausperiaatteella, ja ketunlannan sisältämä kivi- ja hiekka-aines saattaa kertyä reaktorin pohjalle. Nurmen määrän laskeminen alle 13 000 tn ei käytännössä vaikuttaisi olevan mahdollista, mikäli tulppavirtaus halutaan taata. Nurmen osuuden nostaminen rajattomasti ei todennäköisesti ole kannattavuuden kannalta tarkoituksenmukaista. Kuiva-ainepitoisuutta saataisiin nostettua myös ketunlannalla, mutta se lisää typpikuormaa, eikä näin ollen ole prosessitasapainon kannalta turvallinen vaihtoehto.

6.5.2 Ammonifikaation ja pH:n vaikutus ammoniakkipitoisuuteen

Prosessin kulkua on mallinnettu tietyillä oletusarvoilla tehdyillä laskelmilla, eivätkä todelliset prosessiolosuhteet todennäköisesti noudattele näitä täsmällisesti. Edellä on tehty vertailua eri syöteseoksilla, ja tässä luvussa esitetään muiden prosessiolosuhteiden vaikutusta ammoniakkipitoisuuteen, joka laskelmien perusteella tulee olemaan prosessin merkittävä inhibitoriski. Adaptoituneella prosessilla pitoisuus voi olla 800–900 mg/l ja adaptoitumattomalla enintään 100 mg/l. Taulukoissa on korostettu tummemmalla keltaisella adaptoituneen prosessin ylittävät pitoisuudet ja vaaleammalla keltaisella adaptoituneen ja adaptoitumattoman prosessin välille asetettavat pitoisuudet.

Taulukossa 9 on esitetty laskelma ammonifikoitumisasteilla 40 %, 50 % ja 60 % muilta osin aiemmin esitettyjen oletusarvojen mukaisesti. Sekä ammoniumtyppi- että ammoniakkipitoisuudet nousevat mädätteessä kaikilla ammonifikoitumisasteilla selvästi inhibitorajan yli.

Taulukko 9. Ammonifikoitumisasteen vaikutus mädätteen ammoniakkipitoisuuteen.

	Syöte	Mädäte, ammonifikaatio		
		40 %	50 %	60 %
Ammoniumtyppi (NH ₄ -N) g/l	1,7	8,0	9,5	11,1
Ammoniakki (NH ₃) mg/l	491	2237	2674	3110

pH ei vaikuta ammoniumtyppipitoisuuteen, mutta sillä on merkittävä vaikutus vapaan eli ionisoitumattoman muodon, ammoniakkin esiintymis- osuuteen. Taulukossa 10 on esitetty ammoniakkipitoisuudet pH-arvoille 8,0; 7,5 ja 7,0 muiden prosessiolosuhteiden pysyessä aiemmin esitettyjen oletusarvojen mukaisina. pH 8:ssa mädätteen ammoniakkipitoisuudet ovat selvästi yli inhibitorajojen, pH 7,5:ssä adaptoitunut prosessi saattaisi toimia ja pH:n laskiessa 7,0:ään, ammoniakkipitoisuudet laskevat prosessin kannalta turvalliselle tasolle.

Taulukko 10. pH:n vaikutus ammoniakkipitoisuuteen.

	pH 8,0	pH 7,5	pH 7,0
Ammoniakki, syöte (NH ₃) mg/l	491	192	66
Ammoniakki, mädäte (NH ₃) mg/l	2674	1046	358

Vertailusta voidaan todeta, että erilaisilla, käytännössä realistisilla ammonifikoitumisasteilla ei ole inhibitorajojen kannalta merkittävää eroa mädätteen ammoniakkipitoisuuksiin, vaan kaikilla ammonifikoitumisasteilla ammoniakkipitoisuudet nousevat kirjallisuudessa esitettyjen inhibitorajojen yli. Sen sijaan pH:n laskulla on suuri merkitys, ja neutraalissa pH:ssa adaptoituneen prosessin voidaan olettaa toimivan tasapainossa.

6.5.3 Orgaaninen kuormitus ja viipymäaika

Alkuvaiheessa viipymäajaksi (HRT) on suunniteltu 35 vuorokautta, mutta viipymäaika tavoitellaan lyhennettäväksi. Prosessin hygienisointikäsitteily vaatii vähintään 21 vrk:n viipymäajan, mutta se ei tulle rajoittamaan viipymäajan lyhentämistä, koska suuri osa syötteistä on hitaasti hajoavia, ja edellyttävät suhteellisen pitkää viipymäaika. Prosessin tulppavirtausperiaatteen vuoksi viipymäajalla ei myöskään ole merkitystä mikrobien poishuuhtoutumiseen.

Sopiva viipymäaika vaihtelee prosesseittain ja riippuu käsiteltävistä syötteistä. Kirjallisuudessa termofiiliselle prosessille on esitetty viipymäaikoja 10–15 päivän väliltä, mutta orgaaninen kuormitus (OLR) tulee rajoittamaan viipymäajan lyhentämistä, koska oletussyöteseoksella vielä kuormituksella 10 kgVS/(m³vrk) viipymäaika on 21 vrk (taulukko 11). Sopivaa viipymäaika arvioitaessa huomioidaan myös prosessin VS-vähenemä. Osa käsiteltävistä syötteistä, kuten nurmi, tulee todennäköisesti vaatimaan kirjallisuudessa edellä esitettyä aikaa pidemmän ajan. Ylösajovaiheessa viipymäaika on pidempi, kun kuormitusta ei ole nostettu tavoitetasolle, joten tältä ajalta saadaan dataa VS-vähenemästä pidemmällä viipymäajalla, ja viipymäajan lyhenemistä voidaan verrata VS-vähenemään.

Oletusarvoisilla syötemäärillä laskettaessa OLR-arvoksi saadaan noin 8 kgVS/(m³vrk), joka vastaa tuorepainona 77 tn vuorokaudessa 2 400 m³ reaktoritilavuuteen. Tätä voidaan pitää realistisena kuormitustavoitteena, kun kyseessä on termofiilinen kuivamädätys, eikä syötteinä ole nopeasti hajoavaa materiaalia, joka aiheuttaisi merkittävän riskin haihtuvien rasvahappojen kertymiselle. Kokonaiskäsittelemäärän lisäksi myös syötesuhteet vaikuttavat OLR-arvoon, koska laskennan perustana olevat syötteiden VS-pitoisuudet vaihtelevat 2,9 % ja 42,8 %:n välillä. Matalin VS-pitoisuus on sianlietteellä ja korkein perunajauhon ja viljarehun seoksella. Myös nurmella on korkea VS-pitoisuus, jolloin nurmen osuuden lisääminen nostaa myös kuormitusta.

Taulukko 11. Vuosittaisen käsittelymäärän vaikutus orgaaniseen kuormitukseen ja viipymäaikaan oletussyöteseoksella.

Käsittelymäärä (tn/vuosi)	20 000	28 000	35 000
Kierrätys (tn/vuosi)	3 500	4 900	6 200
Kokonaismäärä (tn/vuosi)	23 500	32 900	41 200
Syöttö (tn/vrk)	55	77	96
OLR (kgVS/(m ³ vrk))	6	8	10
HRT (vrk)	37	27	21

Laskelmissa on huomioitu kierrätyksen aiheuttaman tilavuuden muutos käsiteltävään määrään, mutta orgaaninen kuormitus on määritetty tuoreen syötteen VS:n mukaan. Mädätteen sisältämästä hajoamattomasta

orgaanisesta aineksesta todennäköisesti osa hajoaa edelleen kierrätyksessä, mutta hajoamismäärää on mahdoton arvioida, joten se jätetään laskelmissa huomiotta.

Jos vuosittain käsiteltävä syötemäärä nostetaan 28 000 tonnin oletuksesta 35 000 tonniin lisäämällä sianlietteen osuutta noin 7 000 tonnista 14 000 tonniin vuodessa, on OLR-arvo edelleen noin 8, mutta viipymäaika lyhenee 27 päivästä 21 päivään. Sen sijaan, jos lisätään nurmen osuutta 13 000 tonnista 20 000 tonniin kokonaiskäsitelymäärällä 35 000 tn/vuosi, nousee OLR lähelle 11:sta ja HRT on sama 21 päivää. Syöteseoksen koostumus siis vaikuttaa merkittävästi orgaaniseen kuormitukseen.

Lisäksi mädätysjäännöksen kierrätysosuus vaikuttaa viipymäaikaan. Aiemmin määritetyillä oletusarvoilla mädätysjäännöksen kierrätysasteen noustessa 10 %:sta 30 %:iin, viipymäaika lyhenee 29 päivästä 25 päivään.

6.5.4 Mädätysjäännöksen kierrätys

Prosessi toimii tulppavirtausperiaatteella, joten mädätysjäännöksen tai suotoveden kierrättäminen on välttämätöntä mikrobipopulaation säilyttämiseksi prosessissa.

Syöteseoksen typpipitoisuus on korkea, ja koska kyseessä on korkean typpipitoisuuden syötteen ja prosessiolosuhteet altistavat ammoniakki-inhibitiolle, tulee mädätysjäännöksen kierrättämisessä huomioida sen lisäämä typpikuorma prosessiin. Kierrätys myös vähentää reaktoriin syötettävän uuden syötteen määrää tai lyhentää viipymäaika. Mädätysjäännöksen kuiva-ainepitoisuus on alhaisempi, joten kierrätettävä mädäte laskee massan kuiva-ainepitoisuutta. Sianlietettä käytetään syöteseoksen laimentamiseksi, joten sen määrää tulee vähentää tarpeen mukaan, jotta kuiva-ainepitoisuus ei putoa liian matalaksi. Tarkkojen laskelmien laatiminen ei ole mahdollista, koska TS-vähenemä selviää vasta, kun saadaan analyysituloksia mädätysjäännöksestä. Ylösajovaiheessa ympäristönä käytetyn massan TS-pitoisuus on oletettavasti matalampi kuin syötteen, mikä vaikuttaa alussa myös mädätysjäännöksen kuiva-ainepitoisuuteen. Mädätysjäännöksen kierrättäminen tulee aloittaa viimeistään silloin, kun kuiva-ainepitoisuus on niin korkea (yli 20 %), että prosessi toimii tulppavirtausperiaatteella, eikä mikrobimassa sekoitu tasaisesti reaktorin sisällä.

Mädätysjäännöksen kierrätyksen vaikutus (taulukko 12) on tehty oletusarvoilla, että TS-vähenemä on 40 % ja kierrätysaste on 20 %. Tämä tarkoittaa käsiteltävän kokonaismassan lisääntymistä 17,6 %, ja mädätysjäännöksen osuus kokonaismassasta tulee olemaan noin 15 %.

Taulukko 12. Mädätysjäännöksen kierrätyksen vaikutus käsiteltävään massaan. Ammoniakin määrä on laskettu pH-arvoissa 7,5 ja 8,0.

	Syöte	Mädäte	Uusi massa	Oletus
TS (%)	29,5	20,1	27,8	vähemmän 40 %
VS (%)	24,5	14,7	22,8	vähemmän 47 %
VS/TS	83	73	82	
Käsiteltävä määrä (tn/vuosi)	28 000	4 900	32 900	kierrätys 20 %
NH ₄ –N (g/l)	1,7	9,5	2,9	ammonifikaatio 50 %
NH ₃ (mg/l) (pH 7,5)	192	1046	320	
NH ₃ (mg/l) (pH 8,0)	491	2674	818	

Käsiteltäessä oletussyöteseosta 28 000 tn vuodessa, syntyisi mädätysjäännöstä 24 700 tn vuodessa. Tästä kierrätettävä määrä olisi 4 900 tn. Mädätysjäännöksen kierrätys laskee hieman sekä TS- että VS-pitoisuuksia verrattuna pelkkään syöteseokseen, mutta kierrätyksen vaikutus ammoniumtyypipitoisuuteen on merkittävämpi, joka nousee oletetuilla arvoilla prosessin alkupäässä 1,7 g:sta/l 2,9 g:aan/l. pH-arvossa 7,5 tämä tarkoittaa ammoniakkipitoisuuden nousua 192 mg:sta/l 320 mg:aan/l, ja pH:ssa 8 nousu olisi 491 mg:sta/l 818 mg:aan/l.

7 PROSESSIN HALLINTA

Prosessin hallinnan työkaluksi laadittiin prosessin seurantasuunnitelma sekä erillinen ylösajosuunnitelma. Suunnitelmien lähtökohtana käytettiin työn tilaajan toimesta ennalta määriteltyä lähtötilannetta, johon kuuluvat laitoksen rakenteelliset ratkaisut sekä sellaiset prosessitekijät ja -olosuhteet, joihin ei voida jälkikäteen vaikuttaa. Lisäksi suunnitelmat laadittiin sellaisella lähtöolettamalla, että laitoksessa käsitellään ennalta ilmoitettuja syötteitä.

Seuranta- ja ylösajosuunnitelmien määrittämisessä koottiin yhteen teoriataustassa ja edellisen luvun (luku 6) mallilaskelmissa esille tulleet prosessin kulun ja prosessitasapainon kannalta merkittävimmät tekijät. Seuranta- ja ylösajosuunnitelmissa on pyritty kiinnittämään huomiota siihen, että ne nostaisivat esille sellaisia prosessin kulkuun ja prosessitasapainoon vaikuttavia tekijöitä, joihin voidaan vaikuttaa käyttäjän toimilla ja joita voidaan laskennallisesti kohtuudella ennakoita.

Seuranta- ja ylösajosuunnitelman laatimisessa sekä näiden pohjalta tuotetuissa suunnittelu- ja seurantatyökaluissa (luku 8) on myös huomioitu teoriataustassa ja prosessin mallinnuslaskelmissa esille tullut prosessin heikko ennakoitavuus sekä lukuisat muuttujat. Suunnitelmat on tehty siten, että

niitä voidaan hyödyntää erilaisille prosesseille ja käyttää joustavasti prosessin kulun mukaisesti.

Häiriötilanteiden varalle korjaaviksi toimenpiteiksi on poimittu sellaisia toimenpiteitä, jotka ovat kyseisen prosessin kohdalla mahdollisia. Kirjallisuudessa on esitetty monia toimenpiteitä esimerkiksi ammoniakki-inhibition hallitsemiseksi, mutta vain osaa voidaan hyödyntää käytännössä.

Prosessin hallintaa on käsitelty vain prosessitasapainon kannalta, eikä tarkastelussa ole huomioitu taloudellisia näkökulmia, metaanintuottopotentiaaleja eikä mädätysjäännöksen laatua ja hyödyntämismahdollisuuksia. Kestävyyskriteereitä ei ole käsitelty erikseen, mutta syötteet ovat laadultaan sellaisia, että kestävyyskriteerien täyttyminen ei ole kyseenalaista.

7.1 Prosessin seurantasuunnitelma

7.1.1 Parametrien valinta

Seurattavat prosessiparametrit pyritään valitsemaan siten, että niiden avulla voidaan mahdollisimman kustannustehokkaasti, luotettavasti ja ennakoiden arvioida prosessin tilaa. Prosessiautomaatio sisältää lämpötilan, biokaasun sekä kaasun metaanipitoisuuden on-line-mittaukset. Kaasuntuotto ja metaanipitoisuus ovat herkkiä prosessi-indikaattoreita, mutta eivät kerro mahdollisesta prosessihäiriön syystä. pH:ta ei mitata reaaliaikaisesti, mutta laitoksella on käytettävissä pH:n mittauslaitteisto.

pH on prosessiseurannan perusanalyysi, vaikka se ei ole yksinään hyvin puskuroidussa systeemissä herkkä prosessitasapainon indikaattori. pH asettuu yleensä tietylle, kullekin prosessille ominaiselle tasolle, mutta tulpavirtausprosessin pH-kehityksestä ei vastaavissa olosuhteissa ole saatavilla kirjallisuustietoa. pH:n ennakoidaan olevan melko korkea, etenkin prosessin loppupäässä, koska ammoniumtyypen määrä tulee nousemaan merkittävästi ja nostamaan myös pH:ta. pH:n seuranta on tärkeää erityisesti mahdollisen ammoniakki-inhibition arvioinnissa, koska pH vaikuttaa ammoniakkin osuuteen ammoniumtypestä. Mikäli pH laskee haihtuvien rasvahappojen kertymisen vuoksi, prosessi on todennäköisesti jo kaatunutta, koska korkean puskurikyvyn syötteillä VFA-pitoisuus on jo huomattavan korkea, ennen kuin nousu näkyy pH-arvossa.

Tavanomaisista prosessiparametreista tarkkaillaan puskurikykyä eli alkaliteettia ja haihtuvia rasvahappoja, sekä näiden suhdetta. Alkaliteetin ei kaikissa lähteissä ole esitetty olevan hyvä indikaattori prosessoitaessa hyvän puskurikyvyn syötteitä, mutta alkaliteetti tulee määritetyksi samalla, kun määritetään VFA-pitoisuus. Syötteissä ei ole merkittäviä määriä nopeasti hajoavia hiilihydraatteja, jotka tulisi nopeasti hajotettua hydrolyysivaiheessa, ja tämä altistaisi haihtuvien rasvahappojen kertymiseen. Toisaalta myös tiedetään, että termofiilisessä prosessissa hydrolyysi on nopeampi

kuin mesofiilisessä, joten haihtuvien rasvahappojen kertymistä nopean hydrolyysin vuoksi ei voida poissulkea.

VFA-pitoisuuden kohoaminen antaa viitteitä myös metanogeenin inhiboimisesta, jonka ennakoimaan olevan todennäköisempi prosessihäiriön syy kuin prosessin muuhun kulkuun suhteessa oleva liian nopea hydrolyysi.

Vaikka VFA:n kokonaispitoisuus osoittaa luotettavasti prosessissa tapahtuvia häiriöitä, on kokonais-VFA:n lisäksi hyödyllistä tarkkailla myös yksittäisiä rasvahappoja. Kyseisen prosessin erityispiirteen huomioiden haihtuvien rasvahappojen koostumuksen määrittämisellä saadaan lisäarvoa prosessihäiriön syyn selvittelyssä ja inhibition kohdentamisessa. Huomioiden syötteiden tyypipitoisuus, erityisesti asetaattipitoisuudella voidaan tarkkailla mahdollista ammoniakki-inhibitiota, koska asetaattia hyödyntävät metanogeenit ovat herkempiä ammoniakki-inhibitiolle kuin vetyä hyödyntävät metanogeenit. Asetilaktisten metanogeenien inhiboiminen johtaa asetaatin kertymiseen. Propionaatti sen sijaan nousee, jos vetyä hyödyntävien hydrogenotrofisten metanogeenien toiminta on häiriintynyt. Muiden yksittäisten rasvahappojen pitoisuuksien merkityksistä ei ole arviota, mutta heilahtelut suhteissa saattavat indikoida prosessihäiriöitä.

Huomioiden syöteseoksen matala C/N-suhde sekä prosessin termofiilisyyden, ammoniumtyypen määrän seuranta on oleellista mahdollisen ammoniakki-inhibition välttämiseksi. Termofiilisen prosessin pH on tyypillisesti korkeampi kuin mesofiilisen, ja korkea pH altistaa prosessia ammoniakki-inhibitiolle erityisesti korkeammassa lämpötilassa, koska yhdessä pH:n ja lämpötilan nousu siirtävät ammoniakkitasapainoa vähemmän toksiseen ionimuodosta toksiseen vapaaseen ammoniakkiin. Ammoniumtyypen pitoisuuden nousu on mekanismiltaan erilaista kuin haihtuvien rasvahappojen. Ammoniumtyypen nousu on ennakoitavaa, kun taas haihtuvien rasvahappojen pitoisuus saattaa nousta yllättäen ja hyvinkin nopeasti.

Viipymääjan optimoimiseksi mädätysjäännöksestä tulee seurata VS-vähenemää. Mädätysjäännöksestä tulee määrittää myös TS-pitoisuus sekä kokonaistyyppi ja ammoniumtyppi kierrätyksen aiheuttaman typpikuorman arvioimiseksi. Mädätysjäännöksen perusanalyysiin kuuluvat lisäksi pH ja alkaliteetti, mutta erityisesti alkaliteetin määrittämisen tarpeellisuus varmistuu, kun prosessin loppupäästä kertyy analyysidataa. Lähtökohtaisesti prosessin alkaliteetin oletetaan olevan hyvä, joten jos alkaliteettiarvot ovat säännöllisesti korkealla prosessin loppuvaiheessa, voidaan alkaliteettimääritystä harventaa.

Koska kyseessä on vähemmän tunnettu, ja syöteseokseltaan ainutlaatuinen prosessi, olisi myös prosessin mikrobistoa hyödyllistä tutkia. Eri mikrobikantojen osuuksia määrittämällä ja seuraamalla saataisiin käsitys tasapainoisen prosessin tilasta sekä tarkempaa tietoa prosessissa tapahtuvista muutoksista mahdollisessa inhiboimistilanteessa. Tieto esimerkiksi siitä, onko metaanintuotto madaltunut asetilaktisten vai hydrogenotrofisten

metanogeenien inhiboitumisen vuoksi, auttaisi jäljittämään ja ratkaisemaan mahdollisia ongelmakohtia.

Prosessiseurannan lisäksi myös syöteanalyysit ovat välttämättömiä, jotta voidaan arvioida, vastaako syöteseos ennakkolaskelmien perusteena käytettyjä syöteominaisuuksia. Laskelmien perustana käytettiin ennalta ilmoitettujen syötesuhteiden lisäksi yksittäisten syötteen TS- ja VS-pitoisuuksia, hiili- ja typpipitoisuuksia sekä ammoniumtyppipitoisuutta. Myös mädätysjäännöksestä tehtävät analyysit kertovat prosessin kulusta, mutta tulppavirtausreaktorissa mädätysjäännösanalyysit ovat käytettävissä liian myöhään, jos prosessihäiriö tapahtuu jo reaktorin alkupäässä.

7.1.2 Näytteenotto

Reaktorissa on näytteenottomahdollisuus kolmessa eri kohdassa: reaktorin alkupäässä, keskellä sekä loppupäässä. Näytteenottopisteet sijaitsevat tasaisin, noin 5 m:n välein 20 metriä pitkässä reaktorissa eli 1. näytteenottopiste on 5 m:n etäisyydellä syöttöpäästä, seuraava 10 m:n kohdalla ja viimeinen 15 m:n kohdalla.

Etukäteen, ennen analyysitulosten kertymistä, on vaikea arvioida, mistä näytteenottopisteistä saadaan parasta tietoa prosessin tilasta. Parhaiten prosessin kulkua saataisiin arvioitua, jos kaikista näytteenottopisteistä otettaisiin näytteet aina samanaikaisesti, mutta kustannukset rajoittavat näytteiden tutkimusmäärää. Näytteenottopisteet on pyritty valitsemaan ennakoimalla prosessin kulkua. Keskikohdalta otettavat näytteet saattavat edustaa jonkinlaista keskiarvoa, mutta prosessin edetessä tulppavirtausperiaatteella, kuormituksen nosto näkyy vasta viiveellä keskivaiheilta otetuissa näytteissä. Lisäksi prosessi etenee vielä loppua kohden, ja massan koostumus ja olosuhteet muuttuvat myös keskimmäisen näytteenottopisteen jälkeen. Toisaalta syöteseos ei sisällä merkittäviä määriä nopeasti hajoavaa materiaalia, joka antaisi erityistä aihetta tarkkailla prosessin alkupään VFA-pitoisuuksia. Todennäköisempänä ongelmana on ammoniumtyypen kertyminen, jota on perustellumpaa seurata prosessin myöhemmässä vaiheessa. Eri näytteenottopisteistä tutkittavia parametrejä valittaessa tulee huomioida prosessin muutokset sen etenemisen aikana.

Ennalta suunniteltuja näytteenottopisteitä tai -tiheyksiä muutetaan tarvittaessa, mikäli esimerkiksi havaitaan, että tietyn näytteenottokohdan tulokset korreloivat muita näytepisteitä paremmin metaanintuottoon, tietyissä näytteissä pitoisuudet ovat toistuvasti lähellä inhibitorajoja tai tulokset vaihtelevat poikkeuksellisen paljon, tai tiettyjen näytteiden tulokset osoittautuvat antavan jollakin muulla tapaa hyödyllistä, mutta ennakoimatonta tietoa prosessissa. Eri näytteenottopisteistä samanaikaisesti otettavia näytteitä voidaan myös jättää ottamatta, mikäli aiemmat tulokset osoittavat, etteivät ne anna lisäarvoa prosessiolosuhteiden arviointiin. Lisäksi esimerkiksi reaktorin loppupään näytteet voidaan korvata näytteillä

mädätysjäännöksestä, mikäli mittaustulokset näistä näytteenottopisteistä ovat toistuvasti verrannollisia toisiinsa.

Näytteenotossa tulee huomioida, että analysoitavaksi saadaan mahdollisimman edustava ja vertailukelpoinen näyte. Otettava näytemäärä tulee olla riittävän suuri ja se tulee koostua massan eri kohdista otetuista osanäytteistä, jotta näytteen voidaan olettaa edustavan massan keskimääräisiä ominaisuuksia.

7.1.3 Viitearvojen määrittäminen

Prosessille on pyritty määrittämään ohjeelliset viitearvot huomioiden merkittävimmät olosuhdetekijät. Viitearvot on esitetty taulukossa 13. Joidenkin arvojen kohdalla, kuten ammoniumtyypen, viitearvon määrittämiseen vaikuttaa prosessin termofiilisyyden, toisissa arvoissa merkitsee enemmän syötekoostumus, kuten VFA/alkaliteetti -suhteessa ja joihinkin vaikuttaa sekä lämpötila että syötekoostumus, kuten VFA-pitoisuuteen.

Taulukko 13. Typpipitoisia syötteitä sisältävän termofiilisen jatkuvatoimisen kuivamädätysprosessin ohjeelliset viitearvot.

	Tavoitearvo	Inhibitoraja	Alkuperäinen lähde luvussa:
Lämpötila (°C)	55 ± 0,5	≥ Δ2	4.6.1 Lämpötila
pH	6,8–7,4	< 6,6 tai > 8	4.6.3 pH ja alkaliteetti
VFA (mg/l)	1 000–4 000 (mesofiilinen), termofiilisessä prosessissa korkeammat pitoisuudet.	8 000	4.6.4 Haihtuvat rasvahapot
Asetaatti (mg/l)	< 2 400	> 5 000	4.6.4 Haihtuvat rasvahapot
Propionaatti (mg/l)		900–1 100	4.6.4 Haihtuvat rasvahapot
Propionaatti/asetaatti		< 1,0–1,4	7.1.3 Viitearvojen määrittäminen
Ammoniumtyppi NH ₄ -N (g/l)	< 1,5	3–5; 1,5–3 (pH > 7,4)	4.6.5 Ammoniumtyppi
Ammoniakki (NH ₃) (mg/l)	< 100	> 100, adaptoituneessa prosessissa 800–900	4.6.5 Ammoniumtyppi 4.7.6 Ammoniakki-inhibition hallinta
Alkaliteetti (mg(CaCO ₃)/l)	6 000–13 000		4.6.3 pH ja alkaliteetti
VFA/alkaliteetti	< 0,3	> 0,5	4.6.3 pH ja alkaliteetti
VS-vähennemä (%)	vähintään 45–55		4.7.2 Syöttestä tehtävät analyysit

Termofiiliset prosessit ovat mesofiilisiä prosesseja herkempiä lämpötilavaihteluille, ja tavoitteena on, että vaihtelu pysyisi $\pm 0,5$ °C:ssa. Termofiilisen prosessin metaanintuotto saattaa vähentyä merkittävästi ± 2 °C:n vaihtelusta, mutta prosessi adaptoituu hitaisiin lämpötilamuutoksiin. Lämpötilamuutoksissa tulee huomioida myös hygienisointikäsittelyn riittävyys.

pH:n voidaan ennakoida asettuvan lähelle 8:aa, koska kyseessä on tyypillisesti syötteitä sisältävä termofiilinen prosessi. Metanogeenit viihtyvät hieman emäksisessä ympäristössä, mutta ammoniakki-inhibitoriskin vuoksi pH:n olisi hyvä pysyä alle 7,5:ssä, koska pH:n noustessa tätä korkeammaksi, kasvaa toksisen ammoniakkin osuus merkittävästi suhteessa vähemmän toksiseen ionimuotoon. Tämän vuoksi pH:n noustessa yli 7,5:een, tulee tarkkailla ammoniumtyppi- ja ammoniakkipitoisuuksia. pH:n laskun sijaan on osoitus haihtuvien rasvahappojen kertymisestä prosessiin ja puskurikyvyn ylittymisestä. Koska syötteillä on hyvä puskurikyky, pH-muutokset eivät ole riittävän nopea mittari prosessiepätasapainon havaitsemiseksi.

Tasapainoisen mesofiilisen prosessin VFA-pitoisuudet ovat tyypillisesti välillä 1 000–4 000 mg/l, ja vaikutusta prosessin kulkuun on ylösajovaiheessa havaittu pitoisuudella 8 000 mg/l. Termofiilisen prosessin VFA-pitoisuuksien tiedetään olevan mesofiilistä prosessia korkeampia, mutta täsmällisiä viitearvoja ei voida asettaa. Haihtuvien rasvahappojen oletetaan olevan korkeimmillaan prosessin alussa, jolloin prosessissa vallitsevat hydrolyysi- ja asidogeneesivaiheet. Haihtuvien rasvahappojen muodostumiseen ja niiden edelleen kuluttamiseen vaikuttavat lukemattomat prosessissa vallitsevat tekijät, ja niiden määrää on vaikea ennakoida. Jos syöteteseoksessa ei ole nopeasti hajoavia hiilihydraatteja, mahdollinen syy VFA-pitoisuuksien nousuun voi olla metanogeneesin inhiboituminen, jolloin haihtuvien rasvahappojen edelleen metaboloituminen on hidastunut.

Verratessa prosessin VFA-pitoisuuksia kirjallisuudessa esitettyihin viitearvoihin, on huomioitavaa, että VFA-pitoisuuksien nousun haitat prosessitasapainolle johtuvat pääasiassa pH:n laskusta, joten hyvän puskurikyvyn prosessi sietää korkeampia VFA-pitoisuuksia. Kohonneet VFA-pitoisuudet voivat kuitenkin olla merkki inhibitiosta. Häiriötilanteessa haihtuvat rasvahapot saattavat nousta nopeasti muutamista sadoista (mg/l) tuhansiin, joten tasapainoa tarkkaillaan ensisijaisesti seuraamalla pitoisuuksissa tapahtuvia muutoksia.

Alkaliteetin alarajaksi on valittu kirjallisuudessa esitetystä arvoista korkeampi, koska lanta ja syötteiden typpipitoisuus nostavat alkaliteettiä, ja alkaliteetin laskiessa viiterajan alarajan tuntumaan, happojen määrä voi olla jo melko korkea. VFA/alkaliteetti -suhteelle on myös esitetty vaihtelevia arvoja. Prosessin puskurikyvyn oletetaan olevan hyvä, joten tasapainoisen prosessin VFA/alkaliteetti on matala. VFA-arvo voi nousta melko paljon, jotta suhde nousee, joten viiterajoiksi valitaan matalammat arvot, jotta VFA-pitoisuuksien nousuun vaikuttava prosessiepätasapainoon osataan

reagoida ajoissa. Syötekoostumus ennakoi hyvää alkaliteettia, mutta toisaalta prosessin termofiilisyyden vaikuttaa alkaliteettiin heikentävästi hiilidioksidin vähäisemmän liukenevuuden vuoksi. Tasapainoisen prosessin alkaliteettitaso määrittyy analyysitulosten perusteella.

Yksittäisten haihtuvien rasvahappojen pitoisuuksien ja suhteiden tiedetään vaihtelevan huomattavasti prosesseittain, eikä täsmällisiä viitearvoja voida kirjallisuuden perusteella asettaa. Toisaalta haihtuvien rasvahappojen pitoisuudet nousevat prosessihäiriötilanteessa nopeasti ja huomattavan korkeisiin pitoisuuksiin, joten muutos on helppo huomata, vaikka täsmällistä viiterajaa ei olisi asetettu. Suuruusluokan hahmottamiseksi kirjallisuudesta on poimittu asetaatille viitearvo $< 2\ 400$ mg/l, propionaatin inhibitorajaksi $900\text{--}1\ 100$ mg/l sekä näiden inhibitiota aiheuttavaksi suhteeksi $< 1,0\text{--}1,4$ (Wang ym., 2009, s. 848; Li ym., 2014, s. 491). Muille yksittäisille haihtuville rasvahapoille ei katsottu tarkoituksenmukaiseksi asettaa epävarmuustekijöiden vuoksi viitearvoja, mutta lähtökohtaisesti tiedetään, että asetaatin, propionaatin ja butyraatin pitoisuudet ovat korkeimmat. Jotta yksittäisten haihtuvien rasvahappojen pitoisuuksia ja niiden suhteellisia osuuksia osattaisiin tulkita oikein, on erittely syytä määrittää prosessista siten, että saadaan vertailuarvot oletetusta tasapainoisesta prosessista.

Syötteiden korkea typpipitoisuus saattaa osoittautua prosessille ongelmalliseksi. Ammoniumtyypin lähtötaso riippuu syöteseoksesta sekä ympin ammoniumtyppipitoisuudesta. Mikäli ympin ammoniumtyppipitoisuus on matala, tulee ammoniumtyypin tavoitetaso asettaa aluksi matalaksi, jotta mikrobit saavat aikaa adaptoitua. Myös pH vaikuttaa raja-arvoon. Mikäli prosessin pH on yli 7,4, tulisi ammoniumtyppipitoisuuden pysyä aluksi tasolla $1,5\text{--}3,0$ g/l. Jos pH on 7,4 tai alle, voidaan prosessin odottaa sietävän pitoisuuksia $3\text{--}5$ g/l. Ammoniakkipitoisuus tulisi olla alussa < 100 mg/l. Inhibitiota saattaa esiintyä jo matalammissa pitoisuuksissa kuin 100 mg/l, mutta koska termofiilisen prosessin on todettu sietävän mesofiilistä prosessia korkeampia ammoniakkipitoisuuksia, ja koska ympin on termofiilisestä prosessista, ei viitearvoa aseteta matalimmalle todetulle inhibitiotasolle.

Lisäksi prosessin eri kohdista on odotettavaa saada erilaisia tuloksia. Huomioiden anaerobisen hajoamisketjun kulku VFA-pitoisuus on prosessin alkuvaiheessa suurempi ja pienenee prosessin loppua kohden. Haihtuvat rasvahapot laskevat prosessin pH:ta alkuvaiheessa, ja prosessin edetessä VFA:t vähenevät ja pH nousee. Prosessin edetessä tapahtuu myös ammonifikaatiota, joka nostaa ammoniumtyypin määrää prosessin loppua kohden. Prosessin loppua kohden ammoniakin määrä nousee sekä ammoniumtyypimäärän lisääntyessä että oletettavasti nousevan pH:n vuoksi. Prosessin aikana ehtii mahdollisesti tapahtua mikrobin adaptoitumista, joten raja-arvojen ylittyminen ei välttämättä ole mikrobitoiminnalle yhtä toksista prosessin loppuvaiheessa.

Mahdollista ammoniakki-inhibitiota prosessin loppupäässä saattaa olla vaikea havaita, koska loppupäässä metaanintuotto on joka tapauksessa vähäisempää kuin prosessin aiemmissa vaiheissa, ja merkitys kokonaiskaasuntuottoon saattaa olla niin vähäinen, ettei sitä havaita merkitykselliseksi. Prosessin toimivuuden kannalta on kuitenkin tärkeää, että kierrätettävän mädätysjäännöksen mukana tulisi prosessin alkupäähän siirretyksi tasapainoinen ja monipuolinen mikrobisto. Mikäli normaalitilanteessa vallitsevat asetilaktiset metanogeenit, jotka ovat alttiimpia ammoniakki-inhibitiolle, korvautuvat hydrogenotrofisilla metanogeenillä, saattaa metaanintuoton metaboliareitti muuttua pysyvästi ja johtaa pysyvästi alentuneeseen metaanintuottoon.

Viitearvojen tulokinnassa tulee käyttää harkintaa, koska niiden vaihtelu on suurta eri prosessien välillä. Tulokinnassa kannattaa käyttää hyväksi biokaasutuottoja ja kaasun metaanipitoisuutta, jotka antavat kokonaiskuvan prosessin tilasta. Mikäli kaasutuotoissa havaitaan häiriöitä, voidaan häiriön syytä jäljittää analyysitulosten avulla.

7.1.4 Tulosten tallennus ja seuranta

Tulokset kirjataan siten, että niistä saadaan muodostettua erilaisia trendejä. Kuten edellä on käynyt ilmi, täsmällisiä viitearvoja ei voida asettaa, ja prosessitasapainon seurannan kannalta on oleellisempaa seurata tulostasojen kehitystä. Kyseisen prosessin kohdalla tuloseuranta on haastavaa, koska näytteitä otetaan useista eri näytteenottopisteistä. Perinteisessä jatkuvatoimisessa märkämädätysprosessissa näytteinä otetaan syötenäytteitä ja mädätysjäännösnäytteitä, joista viimeksi mainitut edustavat prosessin tilaa. Tulppavirtausprosessissa tulee seurata tulostasojen kehitystä prosessin eri vaiheissa, mutta myös eri parametrien muutokset prosessin edetessä voivat antaa tärkeää tietoa.

Eri näytteenottopisteistä otettujen näytteiden tuloksista muodostetaan kuvaajia, joiden todetaan parhaiten indikoivan prosessitasapainoa. Samassa kuvaajassa voi olla hyödyllistä esittää useampi kuin yksi parametri, esimerkiksi ammoniumtyppi ja ammoniakki tai pH ja VFA:t, jotka vaikuttavat toistensa pitoisuuksiin. Prosessin eri kohdista otettujen näytteiden tuloksia on syytä seurata omina graafeinaan, koska olosuhteet muuttuvat prosessin edetessä. Joissakin tilanteissa saattaa olla hyödyllistä seurata arvon kehitystä prosessin kuluessa, jotta ongelmia voidaan ennakoida, esimerkiksi ammoniumtyypin ja pH:n muutoksen seuraaminen ja ennakointi voisi olla hyödyllistä.

Koska prosessille ei voida asettaa etukäteen täsmällisiä viitearvoja, prosessitasapainoa seurataan aluksi lähinnä tulostasojen muutoksista. Myöhemmin, kun tasapainoinen prosessi on saavutettu ja tunnetaan sen tyypilliset olosuhteet, voidaan alustavia viitearvoja täsmentää. Näiden mukaisesti voidaan tuloseurantalomakkeille ja niistä piirtyviin kuvaajiin luoda

tulosdatan seurantaan helpottavia korostuksia tai muita määrittäviä, joilla parannetaan mahdollisten viitearvojen ylitysten havaitsemista.

Tulosdataan kirjataan varsinaisen näytteenottosuunnitelman mukaisten tulosten lisäksi prosessiolosuhteet näytteenottohetkellä, kuten pH, lämpötila, kaasuntuotto sekä kaasun metaanipitoisuus.

7.1.5 Toimenpiteet viitearvojen ylityksissä

Biokaasuprosessin tasapainon palauttamiseksi voidaan tehdä erilaisia toimenpiteitä, mutta häiriöiden ennakointi on oleellista, jotta pysyvää inhiboitumista ei ehdi tapahtua. Erityisesti tulppavirtausprosessissa prosessin loppupäässä ilmeneviä ongelmia on enää vaikea korjata, joten ongelmien kehittyminen pitäisi osata ennakoida jo prosessin alkupäässä, jotta esimerkiksi syötekoostumusta tai kuormitusta osattaisiin muuttaa ajoissa, ennen kuin ongelmat kertaantuvat prosessin edetessä.

Vakaa lämpötila pyritään varmistamaan jo suunnitteluvaiheessa erilaisilla teknisillä ratkaisuilla, mutta lämpötilaan voidaan vaikuttaa myös syötteillä ja prosessiparametreilla, kuten syötön ja kierrätyksen määrällä. Jos lämpötila alkaa laskea, ja vaarana on yli 0,5 °C:n muutos, voidaan reaktorin lämmitystehoa tai syötteiden esilämmitystä tehostaa. Muita keinoja ovat syötömäärän vähentäminen, paljon lämmitystehoa vaativien syötteiden välttäminen ja mädätysjäännöksen kierrätyksen lisääminen lämpöhukan välttämiseksi. Näissä keinoissa on kuitenkin huomioitava, että muutokset tehdään riittävän hitaasti, eikä prosessitasapainoa horjuteta. Syy lämpötilalaskuun voi olla myös tekninen vika tai sedimentoitumisen vuoksi heikentynyt lämmitysteho. Huomioiden prosessin luonne, lämpötilan nousua on helppo hallita lämmitystä vähentämällä. Mikäli lämpötilaa ei saada pidettyä termofiilisen prosessin edellyttämässä marginaalissa, tai lämpötilan pysyminen termofiilisellä alueella on ongelmallista, on prosessin muuttaminen mesofiiliseksi mahdollista laskemalla lämpötilaa hitaasti ja hallitusti, ja pidentämällä viipymäaika riittävän hajoamisen saavuttamiseksi.

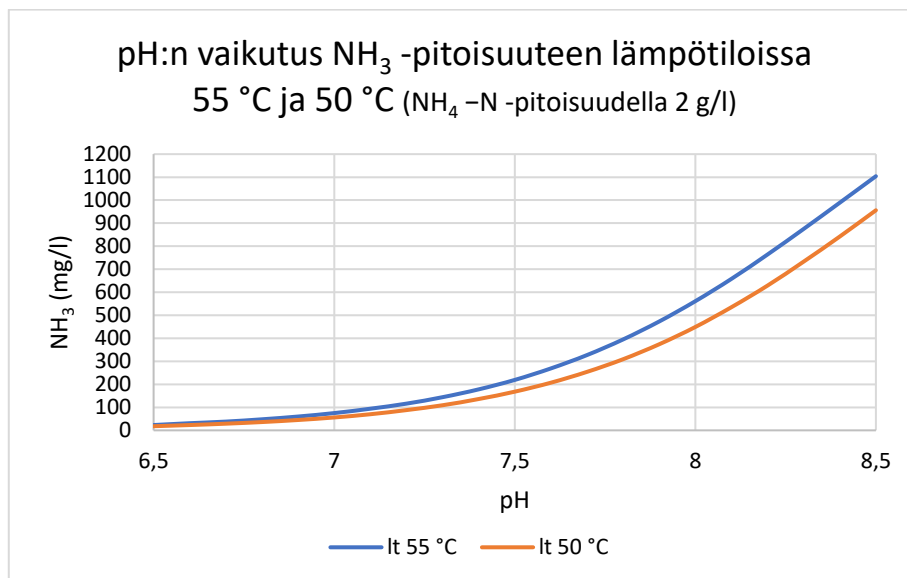
pH:n lasku on heikko indikaattori kyseisessä, hyvän puskurikyvyn prosessissa, ja muutos pH:ssa tarkoittaa todennäköisesti jo vakavaa prosessitasapainon häiriötä, joka on havaittavissa muista analyysistä jo aiemmin. Yleensä toimenpiteenä on syötön rajoittaminen. pH:n nousu ei varsinaisesti indikoi prosessihäiriöstä, mutta on tärkeä seurattava ammoniakki-inhibition ennakoimiseksi. pH:n noustessa > 7,4, varmistetaan prosessitasapainon säilyminen kaasuntuottoa, ammoniakkipitoisuutta ja haihtuvien rasvahappojen pitoisuutta seuraamalla, ja tehdään tarvittavat toimenpiteet. Mikäli pH-muutosta ei saada korjattua, ja se aiheuttaa prosessiin selvää inhiboitumista, voidaan pH:ta säätää kemikaaleilla, mikäli kemikaalit saadaan syötettyä oikeaan kohtaan prosessia.

Haihtuvien rasvahappojen pitoisuuden noustessa tavanomainen korjaava toimenpide on syötön rajoittaminen, jotta asetogeenit ja metanogeenit

ehtivät metaboloida kertyneet rasvahapot. Ylösajovaiheessa rasvahappoja alkaa kertyä, kun suurin mahdollinen kuormitustaso on ylitetty. VFA-pitoisuuden nousu voi myös johtua metanogeenien inhiboitumisesta, joka saattaa olla kyseisessä prosessissa todennäköisempi syy, koska syöte-seos sisältää vain vähän nopeasti hajoavia hiilihydraatteja sisältäviä syötteitä. Syy rasvahappojen kertymiselle selvitetään muiden analyysitulosten avulla, ja korjaavat toimenpiteet tehdään sen mukaisesti.

Ammoniumtyyppipitoisuuden noustessa tulee tarkkailla myös ammoniakkipitoisuutta, jonka nousu saattaa aiheuttaa metanogeenien pysyvän inhiboitumisen. Ammoniakkipitoisuuden laskemiseksi vähennetään tyypipitoisten syötteiden määrää. Suurin tyypikuorma kertyy ketunlannasta, joten sen vähentämisellä voidaan tehokkaimmin vähentää tyypipitoisuutta. Tyypipitoisia syötteitä olisi hyvä varautua korvaamaan hiilipitoisilla syötteillä C/N-suhteen nostamiseksi. Jos ammoniakkipitoisuutta ei saada syötekoostumusta muuttamalla riittävästi laskettua, voidaan ammoniumtyyppiä saostaa magnesiumilla tai fosfaatilla. Myös viipymäajan pidentämisellä ja mädätysjäännöksen kierrätystä vähentämällä voidaan koittaa laskea ammoniumtyppi- ja ammoniakkipitoisuutta.

Myös lämpötilan ja erityisesti pH:n laskulla saadaan vähennettyä ammoniakkipitoisuutta, mutta näiden keinojen käyttö ei välttämättä tule kyseeseen, koska lämpötilan lasku tuo ongelmia hygienisointikäsitteilyyn, ja pH:n lasku kemikaaleilla on kallista. Kuvassa 26 on esitetty pH:n vaikutus ammoniakkipitoisuuteen lämpötiloissa 55 °C ja 50 °C syötekoostumuksella, jonka kokonaisammoniumtyypipitoisuus on 2 g/l. Suunniteltu prosessilämpötila on 55 °C. Laskettaessa prosessin lämpötilaa 5 °C pH:ssa 8, laskee ammoniakkipitoisuus arvosta 561 mg/l arvoon 449 mg/l eli 20 %, jääden kuitenkin huomattavasti yli ohjeellisen viitearvon, joka on 100 mg/l. Sen sijaan laskemalla pH:ta arvosta 8 arvoon 7,5, laskee ammoniakkipitoisuus arvoon 219 mg/l eli 61 %. Raja-arvo saavutettaisiin 55 °C lämpötilassa pH:n laskeessa 7,1:een. Näin ollen pH:n lasku on tehokkaampi tapa hallita ammoniakkipitoisuutta kuin lämpötila. Lämpötilan nopea lasku voi lisäksi horjuttaa prosessitasapainoa ja laskee metaanintuottoa.



Kuva 26. Ammoniakkipitoisuus nousee pH:n noustessa. Mitä korkeampi pH sitä jyrkemmin ammoniakkipitoisuus kasvaa. Lämpötilamuutoksella ei ole yhtä suurta vaikutusta. Tässä $[\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3]$ -pitoisuus on 2 g/l.

Ammoniakki-inhibitiota voidaan hallita myös muutamilla muilla keinoilla, kuten strippauksella, hivenainelisäyksellä ja biohiilellä, mutta näitä keinoja käytetään yleensä vain erityistapauksissa.

Alkaliteetin väheneminen johtuu yleensä sen kulumisesta happojen neutralointiin, joten alkaliteettia voidaan korjata syöttöä rajoittamalla, jolloin happojen kertyminen vähenee. Syötekoostumuksen muuttaminen typpipitoisemmaksi ei ole kyseisellä, valmiiksi korkean typpipitoisuuden syötekoostumuksella vaihtoehto.

7.2 Prosessin ylösajo

7.2.1 Ylösajon eteneminen

Prosessin ylösajon alkaessa reaktori on täytetty puolilleen matalan kuiva-ainepitoisuuden ympillä. Ympiä käytetään ylösajovaiheen nopeuttamiseksi ja vakaamman ylösajon saavuttamiseksi. Aluksi uuden syöteseoksen osuus on vähäinen, ja syöteseos laimentuu ympiin. Ympi on kertaalleen läpikäynyt mädätysprosessin, joten siinä ei ole enää merkittäviä määriä jäljellä orgaanista ravintoa, ja mikrobit alkavat adaptoitua hyödyntämään uudesta syöteseoksesta saatavia substraatteja. Ympin osuus massasta vähenee vähitellen reaktorin täytyessä, ja ajan mittaan ympi korvautuu kokonaan uudella syötteellä. Prosessoitavan massan kuiva-ainepitoisuus nousee vähitellen, ja huomioimatta syöteseoksessa prosessin aikana tapahtuvaa kuiva-ainepitoisuuden laskua, reaktorin tultua täyteen, laskennallinen kuiva-ainepitoisuus on 17 %. Reaktorin täytyttyä aloitetaan mädätysjäännöksen poisto samassa suhteessa syötön kanssa, huomioiden

TS-vähennemä. Kuiva-ainepitoisuuden saavutettua 20 %, massa ei sekoitu enää kauttaaltaan ja prosessin eteneminen tulppavirtausperiaatteella oletetaan alkavan. Tässä vaiheessa aloitetaan mädätysjäännöksen kierrätys mikrobipopulaation säilyttämiseksi prosessissa. Kuormituksen nostoa jatketaan, kunnes maksimikuormitus todetaan saavutetuksi. Edellä kuvatut vaiheet voivat toteutua myös eri järjestyksessä, ja ylösajossa edetään vallitsevan tilanteen mukaisesti.

Ylösajovaiheessa tapahtuvia muutoksia ei voida varmuudella ennakoida, joten ylösajosuunnitelma perustuu suurelta osin ylösajon aikana saataviin analyysituloksiin, ja ylösajossa tulee edetä vallitsevan tilanteen mukaisesti. Ennalta ei esimerkiksi ole tietoa ympin mikrobiston adaptoitumiskyvystä uuteen syöteseokseen. Syöteseos on koostumukseltaan ainutkertainen, ja sen käyttäytymisen ennakointi sisältää merkittäviä epävarmuustekijöitä. On myös mahdollista, että syötekoostumusta ja orgaanista kuormitusta joudutaan muuttamaan alkuperäisestä suunnitelmasta, jolloin reaktori-massan koostumus muuttuu, eivätkä laskelmat enää pitäisi paikkaansa. Muuttuneiden olosuhteiden teoreettista kulkua ei olisi epävarmuustekijöiden vuoksi tarkoituksenmukaista laskea, koska prosessi etenee mikrobien toimesta omaa, ennakoimatonta vauhtia, olosuhteiden mukaan valikoituja metaboliareittejä pitkin. Lukuisten epävarmuustekijöiden vuoksi ylösajoon voidaan tehdä summittainen suunnitelma, jonka tukena on näytteenotto-suunnitelma. Ylösajoa viedään eteenpäin analyysitulosten perusteella ja prosessitasapainon häiriötilanteessa tehdään ennalta määritettyjä korjaavia toimenpiteitä.

Syöteseos tulisi pysyä alusta alkaen mahdollisimman vakiona, jotta mikrobit saavat aikaa adaptoitua tulevaan syötekoostumukseen ja mikrobiston lajikirjo muodostuu mahdollisimman laajaksi. Ennen lopullisen syötekoostumuksen valintaa tulisi varmistua, että syötettä on tasaisesti saatavilla, tai että syötettä voidaan tarvittaessa varastoida. Ympäri otetaan reaktori, jossa käsitellään biojätettä eli syötekoostumus on erilainen kuin prosessoitaessa lanta- ja nurmipainotteista syöteseosta, joten mikrobien adaptoitumiseen tulee varata riittävästi aikaa. Adaptoitumisajan odotetaan kestävän vähintään kaksi kuukautta, mutta todellinen adaptoitumisaika selviää vasta käytännössä. Biojätteen C/N-suhde on korkeampi kuin lannan, ja lisäksi biojäte sisältää runsaasti helposti biohajoavaa materiaalia. Suunnitellun syöteseoksen hiilen lähteenä on pääasiassa nurmi, jonka pitkäketjuisten hiilihydraattien hajoaminen kestää kauemmin kuin biojätteen.

Ammoniumtyypen määrän noususta voidaan tehdä melko yksinkertaisia, täsmällisiin lähtöarvoihin perustuvia laskelmia, missä arvioitavina muuttujina ovat ammonifikoitumisaste sekä TS-vähennemä. Mallinnus monimutkaistuu, jos otetaan huomioon myös mädätysjäännöksen kierrättäminen, mutta suurin epävarmuustekijä ylösajovaiheen ennakoinnissa on ympäri käytettävän mädätysjäännöksen ammoniumtyypipitoisuus. Uuden syötteen määrä on aluksi pieni, ja sen sisältämän ammoniumtyypen merkitys on

vähäinen. Lähtökohtaisesti ympin ammoniumtyppimäärän voidaan olettaa olevan syötesestä korkeampi, koska siinä ammonifikaatiota on jo tapahtunut. Ammonifikaatiota voi tapahtua ympissä edelleen, mutta oletettavasti se on vähäistä. Uuden syötteen osuuden lisääntyessä ja typen ammonifikoitumisen alkaessa ammoniumtypen määrä alkaa nousta. Myös mädätysjäännöksen kierrättämisen aloittaminen nostaa ammoniumtyppimäärään.

Näytetuloksia tulkittaessa tulee aina huomioida ylösajon vaihe, koska olosuhteet muuttuvat kasvavan kuormituksen lisäksi myös muilta osin. Tuloksiin saattavat vaikuttaa mm. ympin osuus reaktorissa, reaktorin täyttöaste, viipymäaika, massan sekoittuminen ja mädätysjäännöksen kierrätys.

7.2.2 Ymppi

Ymppinä käytetään termofiilisen märkäprosessin mädätysjäännöstä, jonka syöteinä käytetään biojätettä ja puhdistamolietteitä. Ympin kuljetusmatka on yli 70 km, mikä saattaa rajoittaa tavoiteltua 50 % ympin määrää, joka vastaa 600 m³ tilavuutta yhteen reaktoriin. Mikäli termofiilisen prosessin mädätysjäännöstä ei saada riittävästi, voidaan lisäksi käyttää Jepuan mesofiilisen märkämädätyslaitoksen mädätysjäännöstä. Oman laitoksen mädätysjäännös on hygienisoitua, joten osa sen mikrobistosta on tuhoutunut. Lisäksi ympin ottaminen mesofiilisestä prosessista termofiiliseen prosessiin pidentää mikrobien adaptoitumisaikaa. Toisaalta Jepuan omassa märkäprosessissa käsiteltävät syötteenä ovat osittain samoja, mikä on edullista ylösajon kannalta. Termofiilisessä prosessissa käsiteltävät syötteenä eroavat huomattavasti uusista syötteenä, joten mikrobien tulee adaptoitua erilaisten syötteenä hyödyntämiseen. Käsiteltävät syötteenä eivät sisällä anaerobisen mädätysprosessin mikrobiston kehittymiselle edullista lehmän lantaa, mikä lisää ympin merkitystä prosessin ylösajovaiheessa.

Työn toimeksiantajalta saatujen ympistä tehtyjen analyysitulosten mukaan käytettävän mädätysjäännöksen pH on ollut alkuvuoden 2020 kuluessa tasaisesti välillä 7,6–7,8. Laskelmissa on oletuksena käytetty pH-arvoa 8, joten se vastaa melko hyvin ympin pH-tasoa. Kuiva-ainepitoisuus sen sijaan on tutkimustulosten mukaan 4 %, joka on ylösajosuunnitelmassa ennakoitua selvästi matalampi. Ympin kuiva-ainepitoisuutta ei suoraan ole huomioitu laskelmissa, mutta näytteenottosuunnitelma laadittiin olettaen, että prosessi eteneminen tulppavirtausperiaatteella alkaa ennen reaktorin täyttymistä. Alkaliteetti on pääsääntöisesti ollut hieman yli 7 000 mg(CaCO₃)/l, eli viiterajoissa (6 000–13 000 mg(CaCO₃)/l), mutta lähempänä alarajaa. Myös yksittäisistä haihtuvista rasvahapoista oli tutkimustuloksia, mutta niiden pitoisuuksissa oli suuria vaihteluita, ja näytteitä oli otettu harvakseltaan, joten tulosten ei arvioitu olevan merkityksellisiä ylösajon suunnittelussa.

Ymppinä käytettävän mädätysjäännöksen tutkimustuloksia saatiin käytettäväksi sen verran myöhäisessä vaiheessa, että suurin osa ylösajon laskelmista sekä näytteenottosuunnitelma oli jo ehditty tehdä. Laskelmat ja näytteenottosuunnitelma oli pyritty laatimaan huomioiden ympin ominaisuuksien ennakoimattomuus, joten suunnitelmia ei katsottu tarpeelliseksi muuttaa.

Ymppi on läpikäynyt jo yhden mädätysprosessin, joten ympin ominaisuudet eivät prosessin aikana muutu samoin kuin käsittelemättömän syötteen. Esimerkiksi jonkinasteista ammonifikaatiota saattaa vielä tapahtua, mutta todennäköisesti se on vähäisempää kuin alkuperäisessä syötteessä. Myös kuiva-ainepitoisuuden muutokset ovat oletettavasti vähäisiä.

7.2.3 Kuormituksen nostaminen

Kirjallisuudessa esitetään kuormituksen lisäämistä ylösajon aikana $0,5 \text{ kgVS}/(\text{m}^3/\text{vrk})$ kahden viikon välein. Tavoitekuormituksen ollessa $8 \text{ kgVS}/(\text{m}^3/\text{vrk})$, ylösajo kestäisi edellä mainitulla kuormituksen nostolla 32 viikkoa eli noin seitsemän kuukautta. Vaihtoehtoiseksi kuormituksen nostamiseksi on esitetty 20 %:a suunnitellusta kuormituksesta 20 päivän ajan, ja tämän jälkeen asteittaista nostoa 30–40 päivään saakka, mikäli ylösajossa käytetään ymppiä.

Termofiilisen prosessin ylösajon on esitetty kestävän 60–250 päivää eli 2–8 kuukautta. Koska ylösajossa käytetään ymppiä, voidaan olettaa, että ylösajo ei kestä esitettyä maksimaalista aikaa, mutta toisaalta ymppi on adaptoitunut erilaisiin olosuhteisiin, joten todennäköisesti ei myöskään päästä lyhyimpään mahdolliseen ylösajoaikaan. Laskelmat ylösajosuunnitelmalle on tehty neljän kuukauden eli 16 viikon ylösajoajan mukaan.

Kuormituksen portaittaisella nostamisella voidaan saada analyysidataa, josta nähdään prosessin sopeutuminen kuormituksen nostoon. Kahden viikon välein nostettavalla kuormituksella, $8 \text{ kgVS}/(\text{m}^3/\text{vrk})$ tavoitteellisella kuormituksella ja 16 viikon ylösajoajalla kuormitusta tulisi lisätä kerrallaan $1 \text{ kgVS}/(\text{m}^3/\text{vrk})$. Tämä on 12,5 % tavoitteellisesta kuormituksesta, eli ei ylitä ohjeellista aloittamista 20 %:n kuormituksella.

Kyseessä on uusi laitosratkaisu, joten ylösajo tulee tehdä maltillisesti, koska aiempaa kokemusta kyseisen tyyppisestä ylösajosta ei ole. Prosessin kaatuminen ylösajon aikana aiheuttaisi huomattavaa viivästystä laitoksen tuotantoon saattamisessa sekä ylimääräisiä kustannuksia. Pahimmassa tapauksessa reaktori jouduttaisiin tyhjentämään.

1200 m^3 reaktori täytetään puolilleen ympillä ennen käynnistämistä. Näin reaktorista jää vajaaksi 600 m^3 . $1 \text{ kgVS}/(\text{m}^3/\text{vrk})$ kuormitus vastaa $4,90 \text{ tn syötettä}/\text{vrk}/1200 \text{ m}^3$ reaktori. Jotta kuormituksen nousu tapahtuisi tasaisesti suhteessa reaktoritilavuuteen, nostetaan kuormitusta suhteessa kasvavaan tilavuuteen, kuitenkin siten, että kuormitus pidetään kaksi viikkoa

tasaisena, vaikka massan määrä kasvaa. Taulukossa 14 ja kuvassa 27 on esitetty syöttömäärä ja reaktorin täyttymisen ajan funktiona. Reaktori tulee täyteen 10 viikon jälkeen käynnistyksestä, jolloin mädätysjäännöstä täytyy alkaa poistaa reaktorista. Reaktorin täyttymisen laskennassa ei ole huomioitu TS-vähenemää, koska sen arvioiminen prosessin ylösajovaiheessa on hyvin epävarmaa ympin suuren osuuden vuoksi. Mädätysjäännöksen kierrätys aloitetaan, kun massan TS-pitoisuus on yli 20 %, jolloin prosessin oletetaan toimivan tulppavirtausperiaatteella, eikä massa ja sen mikrobisto sekoitu enää kokonaan.

Taulukko 14. Massan tilavuuteen suhteutettu kuormituksen nostaminen. Syöttömäärä on laskettu yhdelle 1200 m³ reaktorille.

Vko	1–2	3–4	5–6	7–8	9–10	11–12	13–14	15–16
OLR (kgVS/(m ³ vrk))	1	2	3	4	5	6	7	8
Syöttö (tn/vrk)	2,4	5,2	8,7	13,5	20,8	29,4	34,3	39,2



Kuva 27. Kuvaaja reaktorin täyttymisestä, kun kuormitusta nostetaan 14 vrk välein 1 kgVS/(m³vrk).

Käytännössä kuormitusta nostetaan prosessiolosuhteiden perusteella, mm. metaanintuottoa seuraamalla. Kuormituksen lisäyksen jälkeen kaasuntuotto ensin nousee, jonka jälkeen tuotto tasaantuu. Mikäli analyysituloksissa ei havaita viitteitä prosessin epätasapainosta, voidaan kuormitusta nostaa kaasuntuoton tasaannuttua, vaikka suunniteltu 14 vrk:n aika ei olisi vielä kulunut.

Jos kuormituksen lisäys aiheuttaa poikkeuksellisen muutoksen prosessiolosuhteisiin, vähennetään kerralla nostettavan kuormituksen määrää. Ylösajossa on tyypillistä, että lähellä maksimikuormitusta kuormituksen nostovälit pidentyvät.

Tavoitteellinen $8 \text{ kgVS}/(\text{m}^3\text{vrk})$ kuormitustaso on laskettu oletetun syöteseoksen ja vuosittain käsiteltävän syötemassan mukaisesti. Kuormitus vastaa hyvin kirjallisuudessa esitettyjä kuivamädätyksen kuormitustasoja, mutta lopullinen kuormitustaso määräytyy prosessikohtaisesti. Jos kaasuntuotto kasvaa suhteessa kuormituksen lisäykseen, ja viipymäaika pysyy riittävän pitkänä, voidaan kuormitusta nostaa edelleen. Kuormituksen nostamisen aiheuttaman viipymäajan lyhenemisen vaikutusta seurataan analysoimalla mädätysjäännöksen VS-vähennemää. Tavoitteellinen VS-vähennemä on vähintään 45–55 %, joten jos vähennemä laskee tämän alle tai vähenneminen aiempaan on selvä, ei kuormitusta tule enää nostaa.

7.2.4 Ylösajon näytteenottosuunnitelma

Näytteenottosuunnitelma on laadittu teoriataustaan perustuvien oletelmien mukaan prosessin kulusta, sekä huomioiden prosessin todennäköisimmät riskit. Käytännössä näytteenottotarvetta tulee arvioida näytetulosten ja ylösajon käytännön toteutumisen mukaan. Näytteenottoa voidaan rytmittää myös kuormitusten lisäysten mukaisesti, mutta tulosten tulkinassa tulee huomioida tulppavirtausvaiheessa kuormituksen noston aiheuttamien muutosten viive eri näytteenottopisteissä.

Biokaasun ja metaanintuottoa seurataan päivittäin, ja tuotot dokumentoidaan vähintään kaksi kertaa viikossa tulosten seurantalomakkeelle. Kaasuntuoton vaihtelujen tulisi noudatella kuormituksen nostoa. Poikkeamat kaasuntuotossa osoittavat häiriötä ja vaativat tarkempaa tilanteen analysointia.

TS määritetään syöteseoksesta tarvittaessa, eli aluksi ja syöteseoksen muuttuessa. TS-määrittelyllä reaktorin ensimmäisestä näytteenottopisteestä tarkkaillaan prosessin muuttumista tulppavirtausprosessiksi. Kun TS nousee noin 20 %:iin, voidaan olettaa, ettei massa sekoitu enää kokonaan ja reaktoriolosuhteet alkavat poiketa toisistaan reaktorin eri osissa, joten näytteitä aletaan ottamaan reaktorin eri kohdista.

Ammoniumtyppi määritetään aluksi sekä syötteestä että reaktorimasasta. Ammoniumtyppipitoisuudesta lasketaan pH:sta ja lämpötilasta riippuvainen ammoniakkipitoisuus. Mikäli ammoniumtyppi ja ammoniakki ovat arvioitujen inhibitorajojen alapuolella, eikä lämpötila ja pH muutu, määritetään ammoniumtyppi kerran viikossa. Ammoniumtyppeä kertyy prosessiin vähitellen ammonifikaatiossa, ja mikäli prosessiolosuhteet pysyvät vakioina, ei ammonifikaation määrässä ole odotettavissa merkittäviä muutoksia. Alussa viipymäaika, OLR ja prosessoitavan massan koostumus muuttuvat, joten ammoniumtyypin määrää on syytä tarkkailla useammin kuin vakaassa prosessissa. Poiketen ammoniumtyppipitoisuudesta, voi ammoniakkipitoisuus nousta nopeasti pH:n muuttuessa. Ammoniumtyypin määrä lisääntyy prosessin edetessä, joten näytteenottoa painotetaan

prosessin loppupäähän. Mikäli pitoisuudet osoittautuvat korkeiksi jo prosessin alussa, tulee näytteitä ottaa useammin myös alkupäästä.

Ammoniumtyypin ja ammoniakkin nousu antavat viitteitä inhibitoriskistä, mutta nousu ei sinällään osoita inhibitiota. Sen sijaan VFA-pitoisuuden nousu yhdessä korkean ammoniumtyyppipitoisuuden kanssa antaa jo selvempiä merkkejä inhibitiosta. VFA-pitoisuus voi nousta myös muusta metanogeneesiä inhiboivasta syystä, tai nopeasta hydrolyysistä, mutta se ei ole merkittävä riski kyseisessä prosessissa.

Mädätteen VS-pitoisuutta seurataan sopivan viipymääjan arvioimiseksi. Viipymäaika on aluksi pitkä, koska mädätysjäännöstä aletaan poistaa vasta reaktorin täytyttyä. Myös täyttymisen jälkeen kuormitusta nostetaan, jolloin viipymäaika lyhenee.

Ylösajovaiheessa prosessi on jatkuvassa muutostilassa, ja jotta ylösajon aikana reaktorissa tapahtuvia muutoksia voitaisiin huomioida näytteenotossa mahdollisimman hyvin, on ylösajon ajaksi laadittu jokaiselle viikolle oma näytteenottosuunnitelma. Viikot on ryhmitelty tiettyjen reaktoriolosuhteiden mukaisesti neljään jaksoon. Ympistä saatujen näytetulosten mukaan ympin kuiva-ainepitoisuus on matalampi kuin näytteenottosuunnitelmaa tehtäessä oletettiin, joten jaksot II ja III saattavat vaihtaa paikkaa. Viimeisenä, viidentenä vaiheena on näytteenottosuunnitelma vakaan prosessin vaiheelle.

Jakso I

Ensimmäinen näytteenottojakso on laadittu ajalle, jolloin reaktorin sisältö on suurimmaksi osaksi ymppeä, kuiva-ainepitoisuus on < 20 % ja reaktori-massa sekoittuu täysin.

- Ensimmäisellä viikolla otetaan näyte syöteseoksesta, jotta tiedetään yksittäisten syöteanalyysien lisäksi syöteseoksen ominaisuudet ja prosessin lähtökohdat. Syötenäyte uusitaan aina, kun syöteseosta muutetaan.
- Näytteitä ei ole tarpeellista ottaa kaikista näytteenottopisteistä, koska massan oletetaan olevan tasalaatuista täydellisen sekoittumisen vuoksi.
- Prosessitasapainon kannalta merkittävimpiä analyysejä, VFA- ja ammoniumtyyppipitoisuusmääryksiä tehdään alusta asti säännöllisesti, jotta saadaan muodostettua käsitys prosessille tyypillisistä pitoisuustasoista ja käyttäytymisestä kuormituksen lisäystilanteessa.
- VFA- ja ammoniumtyypinäytteet otetaan reaktorin keskimmaisesta näytteenottopisteestä, koska myös jatkossa yksittäiset näytteet on suunniteltu otettavan siitä. Näytteiden ottamisella samasta kohdasta prosessia parannetaan tulosten vertailukelpoisuutta.
- Kuiva-ainepitoisuusmääryksillä arvioidaan, sekoittuuko massa täysin vai alkaako prosessi toimia tulppavirtausperiaatteella. Näyte otetaan

ensimmäisestä näytteenottopisteestä, koska lähellä syöttöä kuiva-ainepitoisuuden oletetaan alkavan nousta ensimmäisenä.

- pH-määritykset voidaan suorittaa paikan päällä, joten niiden avulla seurataan, muuttuvatko olosuhteet reaktorin eri osissa. Jos eri näytteenottopisteistä saadaan erilaisia pH-lukemia, ei massa ole tasaista, vaikka TS olisi vielä alle 20 %, joten siirrytään noudattamaan seuraavan jakson suunnitelmaa.

Jakso II

Toinen näytteenottojakso on suunniteltu tilanteelle, jossa kuiva-ainepitoisuus on > 20 % ja prosessin oletetaan etenevän tulppavirtausperiaatteella. Mädätysjäännöksen kierrätys aloitetaan. Reaktori on jakson lopulla täynnä.

- Prosessi alkaa vähitellen edetä tulppavirtausperiaatteella, mutta reaktorin ollessa vajaa, ei massa etene samoin kuin täydessä reaktorissa. Myös kuiva-ainepitoisuus on vielä matalampi.
- Massa koostuu jakson lopulla puoliksi ympistä ja puoliksi uudesta syötteestä.
- Näytteet otetaan kerran viikossa kaikista näytteenottopisteistä, jotta saadaan käsitys prosessiolosuhteista ja kuormituksen noston vaikutuksista tulppavirtauksena etenevän prosessin eri vaiheista.
- Ammoniumtyyppipitoisuutta seurataan, jotta osataan ennakoida mahdollinen ammoniakki-inhibitio, mutta myös mikrobien adaptoitumisen seuraamiseksi. Mikäli ammoniumtyypikuorma kasvaa tasaisesti ja maltillisesti, mikrobit saavat aikaa adaptoitua. Myös mädätysjäännöksen kierrätyksen aloittaminen saattaa vaikuttaa ammoniumtyyppipitoisuuksiin.
- pH määritetään edelleen kaksi kertaa viikossa jokaisesta näytteenottopisteestä. pH:n muutos prosessin edetessä saattaa antaa viitteitä prosessin etenemisestä tulppavirtauksena.
- TS- ja VS-pitoisuuksien muutosta prosessin alussa ja lopussa seurataan yleisten reaktoriolosuhteiden kartoittamiseksi. Vähennemä ei vastaa lopullista vähennemää, koska ympin osuus on vielä merkittävä, eivätkä HRT ja OLR vastaa lopullista tilannetta.

Jakso III

Jakson III on määritetty alkavan siitä, kun reaktori on täynnä, ja mädätysjäännöksen poisto reaktorista aloitetaan. Reaktorissa on jakson alussa puolet ympiä, ja kuormituksen nostoa jatketaan, kunnes saavutetaan lopullinen kuormitus.

- Reaktori on täynnä ja etenee tulppavirtausperiaatteella, ja jakson kuluessa ympin oletetaan korvautuvan mädätysjäännöksen kierrätystä huomioimatta uudella syötemassalla.

- Mädätysjäännöksen korvautuminen uudella syötteellä oletettavasti tulee lisäämään ammonifikaatiota, mikä vähitellen johtaa ammoniumtyypen nousuun reaktorin loppupäässä.
- Näytteenotto mädätysjäännöksestä aloitetaan. Samalla määritetään syötteen TS- ja VS-pitoisuus vähenemien laskemiseksi ja vähitellen sopivan viipymääajan määrittämiseksi. Koska reaktori on täynnä, viipymäaika lyhenee kuormituksen nostosta aiempaa nopeammin.
- Suunnitelluilla kuormituksen nostoilla jakson aikana kuormitus nousee arvosta 6 kgVS/(m³vrk) arvoon 8 kgVS/(m³vrk), ja HRT laskee 34 päivästä 27 päivään.
- VFA-erittely määritetään jakson alussa ainakin kaksi kertaa kahden viikon välein, jotta saadaan käsitys yksittäisten rasvahappojen suhteellisista osuuksista. Erittely tehdään kaikista näytteenottopisteistä prosessin etenemisen vaikutusten arvioimiseksi haihtuvien rasvahappojen pitoisuuksiin.
- Jos jakson kuluessa todetaan, että näytteenottopisteen 3 tulokset eivät anna lisäarvoa suhteessa mädätysjäännösnäytteisiin, voidaan näytteenottopisteen 3 näytteistä luopua.
- Kuormitusta nostetaan niin kauan kuin parametrit noudattelevat prosessin ylösajolle tyypillistä linjaa tai tasoa, ja kaasuntuotto nousee suhteessa kuormituksen nostoon.

Jakso IV

Lopullinen kuormitus on saavutettu edellisen jakson lopussa. Jakson suunnitelmaa noudatetaan, kunnes prosessin todetaan toimivan tasapainossa.

- Jakson alusta viipymääajan mittaisen ajan kuluttua lopullista kuormitusta vastaava massa poistuu reaktorista mädätysjäännökseenä, ja VS-vähennemästä voidaan arvioida viipymääajan riittävyttä ja kuormituksen sopivuutta.
- VFA-erittely määritetään jakson neljännellä tai viidennellä viikolla, jolloin lopullisen kuormitustason massa on edennyt riittävän pitkälle, ja vaikutukset näkyvät kaikissa näytteenottopisteissä. Jos suhteellisissa osuuksissa on suuria poikkeamia edellisiin näytteisiin, toistetaan näytteet.
- Vaikka joidenkin näytteiden osalta olisi luovuttu näytteenottopisteen 3 näytteistä, VFA-erittely määritetään myös reaktorin loppupäästä. Ammoniakki-inhibitoriski nousee prosessin loppua kohden, ja VFA-erittelyllä voidaan selvittää mahdollista inhibitiota, joten riskialtteimasta näytteenottopisteestä on hyvä saada vertailutulokset.
- Tehostettua näytteenottoa jatketaan, jos syöteseoksen koostumusta muutetaan.

Näytteenottotiheydet on esitetty tarkemmin seurantatyökalujen (luku 8) näytteenottosuunnitelmassa, ja on suunniteltu siten, että näytetulosten voidaan olettaa osoittavan ylösajon etenevän tasapainossa. Mikäli viitearvot ylittyvät tai näytetulokset antavat muutoin viitteitä siitä, että

prosessissa on tapahtumassa epäsuotuisia muutoksia, esimerkiksi tietty parametri osoittaa jatkuvaa nousevaa trendiä, otetaan lisänäytteitä aina tapauskohtaisen harkinnan mukaisesti. Lisänäytteet voivat olla uusinäytteitä saman parametrin määrittämiseksi samasta näytteenottopisteestä tai eri näytteenottopisteistä. Lisänäytteinä voidaan määrittää myös muita prosessin tilaa kuvaavia parametrejä tai kyseistä parametria tarkentavia mittauksia kuten kokonais-VFA:n lisänäytteenä voidaan määrittää VFA-erittely.

Prosessissa voi tapahtua merkittäviä muutoksia jo muutamissa päivissä, ja termofiilinen prosessi on erityisen altis nopeille muutoksille, joten ylösajovaiheessa tutkimuksia on syytä tehdä muutaman päivän välein. Aluksi näytteet tulisi ottaa ainakin kaksi kertaa viikossa, ja useammin, jos tulokset osoittavat viitteitä prosessin epätasapainosta. Kerran viikossa otetaan näytteet jokaisesta näytteenottopisteestä ja joka toisella kerralla otetaan näyte prosessin keskivaiheilta, tai tulosdatasta ilmenneiden seikkojen perusteella muusta näytteenottopisteestä. Ylösajo voi edetä myös niin, että näytteenottosuunnitelman jaksojen järjestystä joudutaan muuttamaan. Näytteenottosuunnitelman noudattamisessa tulee käyttää tapauskohtaista harkintaa.

7.2.5 Vakaan operointivaiheen saavuttaminen

Ylösajovaiheen voidaan katsoa päättyneeksi, kun tavoitteellinen kuormitus on saavutettu, prosessi toimii tasapainossa ja massa on vaihtunut reaktorissa lopullisella kuormituksella vähintään kolme kertaa eli noin kolmen kuukauden kuluessa. Tasapainoisen prosessin säilyttämiseksi prosessiolosuhteet pyritään pitämään mahdollisimman vakaina. Orgaanisen kuormituksen ei tulisi vaihdella viikoittain 10–15 %:a enempää.

Ylösajovaiheen jälkeen näytteitä otetaan harvemmin. Vakaan operoinnin vaiheelle on laadittu oma näytteenottosuunnitelmansa. Mikäli syötekoostumusta on tarpeen muuttaa, joko muuttamalla laskelmissa käytettyjen syötteiden suhteita tai ottamalla käsittelyyn uusia syötteitä, tehdään tarvittaessa uusia syöteanalyysyjä, arvioidaan muutoksen vaikutus prosessin kulkuun ja otetaan harkinnan mukaan lisänäytteitä prosessitasapainon säilymistä varmistamiseksi. Muutos pyritään toteuttamaan vähitellen, jotta mikrobeilla on aikaa adaptoitua uuteen syöteseokseen. Adaptoituminen on tärkeää sekä metaanintuoton että prosessitasapainon kannalta.

8 PROSESSIN SUUNNITTELU- JA SEURANTATYÖKALUT

Prosessin suunnittelu- ja seurantatyökaluiksi laadittiin excel-laskentataulukot, joiden avulla voidaan mallintaa ja seurata prosessin kulkua huomioiden tässä työssä aiemmin esitettyjä prosessitasapainon kannalta merkittäviä olosuhteita ja muita tekijöitä. Saatavilla olevan kirjallisuustiedon, tutkimustulosten ja laitoksen edustajien kanssa käytyjen keskustelujen pohjalta laaditut excel-työkalut koostuvat syötteiden ominaisuuksiin perustuvasta prosessin mallinnuslaskelmista (liite 2), yksinkertaistetusta OLR:n ja viipymääjän laskentataulukosta (liite 3), ylösajon kuormitus- ja syöttölaskentataulukosta (liite 4), näytteenottosuunnitelmasta (liite 5), analyysien viivertarvoista ja korjaavista toimenpiteistä (liite 6), sekä tulosten kirjaustaulukosta ja esimerkkikuvaajista (liite 7). Työkalut ja laskentakaaviot on luotu siten, että kaikki lähtöarvot ovat helposti muutettavissa, jotta työkalut ovat käytettävissä myös muihin prosesseihin ja oletetuista lähtöarvoista poikkeaviin tilanteisiin.

Syötetaulukkoon on valmiiksi kirjattu syötteet, joista oli tätä opinnäytetyötä laadittaessa saatavilla analyysitulokset, mutta tarpeen mukaan taulukkoon voi lisätä tai siitä voi poistaa syötteitä. Työkaluun voi vaihtaa vuosittaisen kokonaiskäsittelymäärän sekä muiden paitsi sian lietteen käsittelymäärän. Sian lietteen määrä määrittyy siten, että muiden syötteiden määrä täydentyy lietteellä haluttuun vuosikäsittelymäärään. Työkalu laskee syöteseoksen TS- ja VS-pitoisuudet sekä näiden suhteen, OLR:n, HRT:n, vuorokautisen syöttömäärän tonneissa ja C/N-suhteen. Työkalu laskee typpi- ja ammoniumtyppipitoisuudet sekä ammoniakkin osuuden asetuksessa lämpötilassa ja pH:ssa syötteestä, mädätteestä sekä mädätteen kierrätyksen vaikutuksen näihin. Työkalussa voi asettaa prosessille erilaisia TS- ja VS-vähenemä, valita halutun mädätysjäynnöksen kierrätysasteen sekä vaihtaa ammonifikoitumisastetta. Työkalu laskee vuorokaudessa kierrätettävän massan määrän tonneissa annetuilla arvoilla. Solut, joihin arvot voidaan muuttaa, on korostettu värikoodein.

OLR- ja HRT-välilehdellä on yksinkertaistettu työkalu, jossa voidaan kokeilla reaktiivilavuuden, vuosittaisen käsittelymäärän, TS- ja VS-pitoisuuksien ja TS-vähenemän ja mädätteen kierrätyksen vaikutusta viipymäaikoihin, orgaaniseen kuormitukseen ja päivittäin syötettävään syöttömäärään sekä mädätteen kierrätysmäärään. Arvot voi laskea useammalle reaktorille valitulla reaktiivilavuudella.

Kuormituksen nosto -välilehdellä saadaan mallinnettua erilaisia syöteseoksia valituilla, vuorokaudessa syötettäville syötemäärillä (tn/vrk). Työkalu laskee syöteseoksen ominaisuudet (TS%, VS%, C/N-suhde, N-tot, NH₄ -N, OLR, syöttö/vrk) ensimmäiseen työkaluun syötetyistä syötteiden ominaisuuksista. Työkalulla voidaan myös mallintaa ylösajoa valitsemalla syöteseokselle haluttu kuormituksen lisäys ja lisäysväli (syöttöjakso), reaktiivilavuus, ympin määrä sekä arvoitu TS-vähenemä. Työkalu laskee OLR-

arvon kullekin syöttöjaksolle, massan tilavuuden kunkin syöttöjakson alussa, päivittäin syötettävän kokonaissyötemäärän (tnFW/vrk) sekä poistettavan mädätysjäännöksen määrän huomioiden valittu TS-vähennelmä. OLR-arvon laskennassa on huomioitu kasvava reaktoritilavuus. Taulukkoon syötetyistä arvoista piirtyy kuvaaja, missä mallinnetaan kullakin syöttöjaksolla syötettävä massan määrä sekä reaktorin täyttyminen. Taulukkoon olisi voinut lisätä myös laskelmia kuiva-ainepitoisuudesta, mutta merkittävien epävarmuustekijöiden vuoksi kuiva-ainepitoisuuden arviointi jätettiin pois, ja ylösajovaiheessa seuranta tehdään analyyseillä.

Näytteenotto -välilehdellä on esitetty otettavat näytteet viikoittain ja näytteenottopisteittäin. Näytteenottosuunnitelmassa syötenäyte on nimetty tunnuksella S, reaktorinäytteet näytteenottopisteen mukaan tunnuksella 1, 2 ja 3 ja mädätysjäännös tunnuksella P. Näytteenottosuunnitelma on jaettu prosessiolosuhteiden mukaisesti jaksoihin luvussa 7.3.4. kuvatus mukaisesti. Taulukko toimii myös toteutuneiden näytteiden seurantataulukkona. Taulukko on laadittu siten, että rivejä voidaan avata ja piilottaa tarpeen mukaan eli sen mukaisesti, kuinka kauan kukin näytteenottojakso käytännössä tulee kestämään.

Viitearvot -välilehdelle on kerätty kirjallisuudesta kyseiselle prosessille sovellettavia alustavia viitearvoja sekä tunnettuja inhibitorajoja. Taulukkoon on koottu mahdollisia syitä viitearvojen ylityksille, korjaavia toimenpiteitä ylitystilanteisiin sekä muita analyyseihin ja viitearvoihin liittyviä huomioita. Taulukossa on myös viittaukset teoriaosaan, mistä löytyy tarkempaa tietoa aiheesta sekä alkuperäiset tekstiviitteet.

Tulokset -tauluktoon saadaan syötettyä kaikki prosessiseurannan analyysitulokset. Taulukko laskee päivämäärän mukaan päivän järjestysnumeron, jotta ylösajon vaihe on helpompi suhteuttaa ylösajosuunnitelmaan ja näytteenottosuunnitelmaan. Ammoniakkipitoisuudet ovat laskennallisia arvoja, mutta muut arvot syötetään saatujen tulosten perusteella. Taulukkoon ei ole tehty korostuksia viitearvojen ylityksille, koska rajat täsmentyvät prosessin kuluessa. Taulukkoon voi myöhemmin tehdä erilaisia sääntöjä esimerkiksi korostamalla tietyn rajan ylittävät tai alittavat lukemat, tai kun arvo muuttuu tietyn määrän keskiarvosta.

Tuloksista on laadittu joitakin esimerkkikuvaajia välilehdelle "Kuvaajat", mutta koska tuloksia kertyy suuria määriä usean eri näytteenottopisteen vuoksi, kaavioita on tehty vain malliksi, ja niitä voi muodostaa halutuista analyyseistä ja analyysiyhdistelmistä, kun dataa kertyy riittävästi, ja osataan arvioida, minkälaiset kuvaajat tuottavat oleellisinta tietoa, ja ovat havainnollisimpia prosessitasapainon seurannassa.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkimuskysymyksiin vastaamalla luoda työn toimeksiantajalle seuranta- ja hallintatyökalut jatkuvatoimisen termofiilisen kuivamädätyslaitoksen ylösajoon sekä jatkuvan toiminnan vaiheeseen. Tutkimuskysymyksiin haettiin vastauksia kirjallisuudesta, ja kirjallisuustiedon pohjalta kartoitettiin prosessin kulkuun merkittävimmin vaikuttavia tekijöitä ja oleellisimpia seurattavia parametrejä. Prosessia mallinnettiin kehitettyjen seuranta- ja hallintatyökalujen avulla tietyillä lähtöasetelmilla ja oletusarvoilla. Seuranta- ja hallintatyökalujen avulla voidaan ennakoida prosessin kulkua ja siinä mahdollisesti esiintyviä ongelmia, sekä kartoittaa tasapainon palauttamiseksi tehtäviä korjaavia toimenpiteitä.

Suunnitellulla syöteseoksella todennäköisimmäksi ongelmaksi nousee ammoniakki-inhibitio. Laskelmia tehtiin erilaisilla syötekoostumuksilla, mutta mikäli kaikkia tämän työn laskelmissa mukana olleita syötteitä hyödynnetäisiin prosessissa kohtuullisessa määrin, syöteseoksen typpipitoisuus muodostuu korkeaksi, eikä ammoniakkipitoisuuksia saada oletetuissa prosessiolosuhteissa turvalliselle tasolle. Yksi tapa vaikuttaa ammoniakkipitoisuuteen on säätää pH:ta, mutta käytännön keinot pH:n säätöön ovat rajalliset, ja jatkuva säätäminen kemikaaleilla heikentää prosessin kannattavuutta.

Laskelmat perustuivat syötteistä tehtyihin analyysituloksiin, jotka poikkesivat paikoin selvästi kirjallisuudessa esitetyistä arvoista, ja säännönmukaisesti niin, että typpipitoisuudet olivat kirjallisuudessa esitetyjä korkeammat. Tulosten poikkeavuuteen ei löytynyt yksiselitteistä syytä, mutta tuloksiin voi vaikuttaa mm. se, kuinka edustava näyte on saatu tutkittavaksi. Tutkitut syötteiden ominaisuudet saattavat vaihdella merkittävästi eri kohdissa materiaalmassaa, ja on mahdollista, että näytteeksi ei ole saatu täysin edustavaa otosta. Näytteenoton tiedetään olevan suurin ja todennäköisin syy virheellisiin tuloksiin. Lisäksi tutkittujen syötemateriaalien ominaisuuksien vaihteluille on myös muita merkittäviä tekijöitä. Syöteanalyysijä tulisivat tehdä useampia pidemmällä ajanjaksolla syötteiden laatu- vaihteluiden ja tulosten luotettavuuden arvioimiseksi.

Laskelmissa käytettiin tiettyjä syötteitä ja syötekoostumusta, mutta myös erilaisia syötteitä voi olla saatavilla. Tavoitteena kuitenkin on, että ketunlantaa saataisiin hyödynnettyä prosessissa, joten typpikuormaa tulisi vähentää korvaamalla muita typpipitoisia syötteitä vähätyppisemmällä syötteillä. Erityisesti olkea, jolla on korkea C/N-suhde (60–200) ja hyvä metaanintuottopotentiaali, olisi todennäköisesti saatavilla myös Jepuan prosessiin (Engineering ToolBox, 2010). Laskelmia voisi tehdä esimerkiksi korvaamalla osa nurmesta oljella. Oljella on jonkin verran pidempi käsittelyaika, mutta toisaalta mahdollisen edullisen vaikutuksen vuoksi prosessitasapainoon, saattaisi olki vaikuttaa lisäävästi kokonaiskaasuntuottoon. Oljella

arvioidaan olevan suuret määrät hyödyntämätöntä potentiaalia, joten oljen prosessointi voisi edesauttaa oljen hyödyntämisen positiivista kehitystä.

Syöteseos koostuu useista eri syötteistä, ja koostumuksen pitäminen tasaisena saattaa olla haastavaa. Prosessitasapainon kannalta olisi kuitenkin tärkeää, että syöteseoksen muutokset tapahtuisivat vähitellen. Laskelmista kävi havainnollisesti ilmi, että ketunlanta, jossa on tyypeä huomattavia määriä, nostaa syötteen tyypipitoisuutta merkittävästi pieninäkin osuuksina. Erityisesti tällaiset syötteet, jotka poikkeavat koostumuksestaan muista syötteistä, syöttö tulisi pitää tasaisena, koska niiden määrissä tapahtuvat pienetkin muutokset vaikuttavat herkästi koko syötemassan ominaisuuksia. Tällaisia syötteitä tulisi olla tasaisesti saatavilla tai niitä tulisi voida varastoida.

Laskelmissa ei huomioitu erilaisten syötemateriaalien suhteiden vaikutusta ammonifikoitumisasteeseen, vaan oletuksena käytettiin 50 %:n ammonifikoitumisastetta, joka vastaa keskiarvoa lannassa ja kasviperäisessä syötteessä tapahtuvasta ammonifikoitumisesta. Kasviperäisillä syötteillä tiedetään olevan korkeampi ammonifikoitumisaste kuin lannoilla, joten korvattaessa lantaa nurmella, prosessin ammonifikoitumisaste oletettavasti nousee, ja mädätteen ammoniumtyypipitoisuus saattaa olla laskelmia hieman korkeampi. Vertailtaessa eri ammonifikoitumisasteiden vaikutusta mädätteen ammoniakkipitoisuuksiin, merkitys oli kuitenkin melko vähäinen.

Laskelmissa käytettiin pH-arvoa 8, koska termofiilisen prosessin pH on tyyppillisesti korkeampi kuin mesofiilisen. Ennakolta prosessin pH-tasoa ei voida varmaksi tietää, ja se saattaa olla erityisesti prosessin alkuvaiheessa matalampi, mutta nousee prosessin loppua kohden. pH:n nousu altistaa prosessia ammoniakki-inhibitiolle. Prosessin mikrobiston säilyttämiseksi kierrätettävä materiaali on nimenomaan mädätysjäännöstä, joten jatkuvuuden kannalta on tärkeää, että mädätysjäännöksen mikrobisto ei ole prosessiolosuhteiden vaikutuksesta inhiboitunut. Erityisesti ammoniakki-inhibitio saattaa olla pysyvä, ja siksi prosessin loppupään olosuhteet tulee pyrkiä ennakoimaan varautuen mahdollisiin ongelmiin. Mikäli pH asettuisi lähelle arvoa 7,5, saattaisi ammoniakkipitoisuus pysyä inhibitorajan tuntumassa nousematta prosessin sietokyvyn ylittäviin pitoisuuksiin.

Lämpötila pidettiin yleensä laskelmissa vakiona, koska tavoiteltu prosessi on termofiilinen, ja hygienisointikäsitteily vaatii tietyn lämpötilan. Ennalta on tiedetty, että termofiilinen prosessi on herkempi inhibitiolle, erityisesti prosessoitaessa tyypipitoisia syötteitä, jolloin lämpötila nostaa ammoniakki-inhibition riskiä. Lämpötila vaikuttaa suoraan ammoniakkipitoisuuteen, mutta termofiilisyyden lisäksi myös tyyppillisesti korkeamman pH:n vuoksi. Taulukossa 15 on vertailtu lämpötilan vaikutusta ammoniakkipitoisuuteen termofiilisellä ja mesofiilisellä lämpötila-alueella oletetulla syöteseoksella ja prosessiolosuhteilla (luvut 6.4.1 ja 6.4.3). Mikäli pH olisi 8

mesofiilisessä prosessissa, ammoniakkipitoisuudet pysyisivät inhibitiopitoisuuksien tuntumassa, mutta jos lämpötilalasku saisi aikaan myös pH-laskun 7,5:een, adaptoitunut prosessi pysyisi turvallisissa ammoniakkipitoisuuksissa. Termofiilisessä prosessissa inhibitorajat ylittyvät molemmissa pH-arvoissa.

Taulukko 15. Ammoniakkipitoisuuden vertailua tässä työssä tarkastellulla syöteseoksella termofiilisellä ja mesofiilisellä lämpötila-alueella pH:ssa 8,0 ja 7,5. Vaalean keltaisella on korostettu arvot, joihin prosessi voi adaptoitua ja tumman keltaisella adaptoitumiskyvyn ylittävät arvot.

	pH 8,0		pH 7,5	
	55 °C	37 °C	55 °C	37 °C
Ammoniakki, syöte (NH ₃) mg/l	491	199	192	68
Ammoniakki, mädäte (NH ₃) mg/l	2674	1083	1046	371

Vertailusta voidaan huomata, että mesofiilinen prosessi on selvästi turvallisempi korkean typpipitoisuuden syötteille.

Alustava ylösajo- ja näytteenotto-suunnitelma laadittiin pyrkien parhaaseen mahdolliseen ennakkointiin, mutta laatimalla suunnitelmat joustavasti tilanteeseen mukautuviksi. Täsmällisten suunnitelmien laatiminen ei ollut realistista prosessin ennakoimattomuuden ja saatavilla olevan tiedon rajallisuuden vuoksi, ja oleellisempaa oli huomioida mahdolliset muuttujat, jotta suunnitelmia ja seurantatyökaluja voitaisiin käyttää mahdollisimman joustavasti erilaisissa tilanteissa. Ylösajossa kuormitusta ja kuormituksen lisäysjaksoja, näytteenottoa, kuten myös tulosten viitearvoja tulee ylösajon edetessä mahdollisesti muokata tilanteen mukaan, mutta suunnitelma antaa tietyt raamit, jonka puitteissa lähtökohtaisesti voidaan toimia. Suunnitelma auttaa ehkä myös ennakoimaan muuttuvia tilanteita, vaikka ne eivät toteutuisi aivan suunnitelman mukaisesti. Otettaessa näytteitä reaktorin eri kohdista, voidaan prosessihäiriötä saada ennakoitua niin, että tarpeelliset toimenpiteet saadaan tehtyä ajoissa, prosessihäiriö rajoittuu määrättyyn kohtaan prosessia, eikä aiheuta koko prosessin kaatumista. Jos näyte otettaisiin vasta mädätysjännöksestä, saattaisi koko prosessi kaatua ennen kuin häiriö saataisiin jäljitettyä.

Huomioitavaa on, että laskelmat perustuvat kirjallisuustiedon perusteella tehtyihin oletuksiin, ja on tärkeää, että tulokset päästään verifioimaan käytännön prosessissa. Myös kirjallisuudessa esitetyt viitearvot vaihtelevat prosesseittain huomattavasti, ja mikrobeilla on hyvä adaptoitumiskyky, joten laskennalliset, asetettujen viitearvojen ylitykset eivät yksiselitteisesti osoita prosessihäiriötä. Laskelmien perusteella voidaan kuitenkin ennakoita mahdollisia ongelmakohtia ja varautua korjaaviin toimenpiteisiin.

10 POHDINTA

Anaerobisella mädätysprosessilla on laitosmittakaavassa tuotettu biokaasua jo vuosikymmeniä ja alan yleistä tutkimustietoa on saatavilla lukemattomissa tutkimusjulkaisuissa, artikkeleissa ja kirjoissa. Työn edetessä kävi kuitenkin yhä selvemmin ilmi, että laitosmittakaavaan sovellettua tietoa on saatavilla hyvin rajallisesti, mukaan lukien operointiparametrit, ja kaikista vähiten tietoa löytyi todellisista, käytössä olevista laitosmittakaavan prosesseista.

Maatilamittakaavan biokaasutuotannosta löytyy kattavia julkaisuja, mutta prosessihallinta on vain rajallisesti sovellettavissa laitosmittakaavan jatkuvatoimisiin yhteiskäsittelylaitoksiin. Erityisen haasteen toi viitearvojen sovellettavuus, koska kirjallisuudesta ei löytynyt tietoa tulppavirtausprosessin eri kohdista otetuista arvoista ja arvojen muutoksesta prosessin kuluessa. Mädätysjäännöksen ominaisuuksien tarkkailu ei tuo riittävää informaatiota prosessitasapainosta tulppavirtausprosessista, jotta häiriöihin voitaisiin reagoida ajoissa.

Tutkimusjulkaisuissa prosessiolosuhteet ovat hyvin vakioidut, eivätkä sellaisenaan vastaa todellisia laitosmittakaavan prosessiolosuhteita. Tutkimustiedon soveltamisessa tuli myös arvioitavaksi, onko tutkimustieto lähtökohtaisesti hyödynnettävissä tämän opinnäytetyön tutkimuskysymysten ratkaisemiseksi. Missä määrin märkämädätysprosessin olosuhteita ja viitearvoja voidaan soveltaa kuivaprosessiin, ja missä tapauksissa mesofiilissä ympäristössä tuotettu tutkimustieto on relevanttia termofiilisen prosessin tasapainon osoittamiseksi? Myös syötekirjo on mittava, ja yhteiskäsittelylaitoksissa syötekoostumus on käytännössä aina ainutkertainen. Syötekoostumuksella tiedetään olevan oleellisia vaikutuksia prosessin kulkuun, joten täytyy osata arvioida, minkälaisilla syötteillä tehdyt koejärjestelyt voivat antaa hyödynnettävää tietoa juuri tähän tutkimukseen. Viitearvot saattavat poiketa huomattavasti toisistaan riippuen mm. edellä mainituista seikoista, ja vaikka tutkimuksissa yleensä olosuhteet on kuvattu yksityiskohtaisesti, ei aina kaikkea tarpeellista tietoa ole esitetty.

Saatavilla olevan tiedon soveltamista vaikeutti myös se, että eri maissa biokaasutuotannolla on erilaiset lähtökohdat. Esimerkiksi Saksassa, joka on biokaasutuotannon edelläkävijä, käytetään syötteenä pääasiassa energia- maissia, joka ei tule Suomessa kyseeseen. Lisäksi biokaasutuotannon lähtökohtiin vaikuttavat mm. syötteiden ja mädätysjäännöksen logistiset näkökulmat, biokaasutuotannon tukijärjestelmät ja muut poliittiset ohjauskeinot sekä myös eri maiden erilaiset ilmasto-olosuhteet.

Tässä työssä tehdyissä laskelmissa, lähtöarvoissa ja saatujen tulosten tulokinnassa tuli hyvin usein eteen tilanne, jossa piti käyttää teoriapohjaan perustuvaa parasta mahdollista arviota. Esimerkein koetettiin tuoda esille todennäköisimmät ja oleellisimmat muuttujat, joilla on suurimmat

vaikutukset prosessiin, ja toisaalta, joiden ennakointi sisältää merkittäviä epävarmuustekijöitä. Laskentataulukoissa muuttuvia seikkoja pyrittiin huomioimaan mahdollisimman kattavasti, mutta erityisesti ylösajovaiheessa arvioitavien muuttujien määrä nousi niin suureksi, että osa muuttujista päätettiin jättää huomioimatta. Yksinkertaistamalla laskelmia pyrittiin rajoittamaan epävarmuustekijöitä ja tuomaan esille prosessin kulun kannalta oleelliset seikat, jotta ylösajosuunnitelmaa on helpompi hallita ja muuttaa tilanteen mukaan. Esimerkki tällaisesta yksinkertaistamisesta on ylösajovaiheen reaktorimassan TS-pitoisuus, joka laskettiin ympin ja syötteen kuiva-ainepitoisuuksien mukaan huomioimatta prosessin aikana tapahtuvaa TS-vähenemää. TS-vähenemä huomioitiin kuitenkin mädätysjäännökseen liittyvissä laskelmissa, koska siinä vaiheessa voitiin oletuksena käyttää teoretietoon perustuvaa arvoa. Myös syöteseoksen käyttäytymistä arvioitiin keskimääräisillä olettamilla TS- ja VS-vähenemien sekä ammonifikaation osalta. Vaikka tiedossa on, että eri materiaalit käyttäytyvät eri tavalla, on vaihteluväli kuitenkin olosuhteista riippuen myös samalla materiaalilla niin suurta, että eri syötemateriaaleille huomioitavat erilaiset lukemat eivät olisi lisänneet prosessin ennakkoinnin luotettavuutta.

Ylösajovaiheen ennakointi osoittautui erityisen haastavaksi, koska ympin ominaisuuksista oli vain summittaista tietoa ylösajosuunnitelmaa laadittaessa. Ympin kuiva-ainepitoisuus osoittautui analyysitulosten perusteella yllättävän matalaksi, ja tulppavirtauksen alkaminen oletettiin mallinnuksissa alkavan aiemmin kuin se todellisuudessa tulee alkamaan. Lisäksi kuiva-ainepitoisuus vähenee prosessin kuluessa, mikä tekee kuiva-ainepitoisuuden arvioinnista ylösajovaiheessa erittäin haastavaa. Kuiva-ainepitoisuuden kehitystä olisi voitu mallintaa matemaattisesti, mutta toisaalta prosessin luonteen vuoksi prosessia tulee kuitenkin seurata analyysitulosten avulla, ja ylösajo tulee suunnitella toteutettavaksi reaaliaikaisen tiedon ja tilanteen mukaisesti.

Huomioiden kaikki edellä esitetyt prosessin luonteesta johtuvat epävarmuustekijät, seurantatyökalut pyrittiin luomaan sellaisiksi, että niitä voidaan hyödyntää joustavasti muuttuvissa tilanteissa. Käytännön kokemus biokaasuprosesseista olisi voinut antaa erilaisia näkökulmia kirjallisuustiedon soveltamisessa laitosmittakaavan prosessiin. Työ antaa kuitenkin hyvän raamin, jonka puitteissa prosessin ylösajoa ja hallintaa voi lähteä toteuttamaan. Käytännön työ, laitosmittakaavan kokemukset ja laitosnäytteistä kertyvät analyysitulokset tulevat jatkossa täydentämään tämän työn tuloksesta arvokkaan prosessihallinnan työkalun.

LÄHTEET

- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. & Janssen, R. (2008). *Biogas Handbook*. University of Southern Denmark. Haettu 19.11.2019 osoitteesta <https://lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>
- Al Seadi, T., Rutz, D. & Janssen, R. (2013). Biomass resources for biogas production. Teoksessa A. Wellinger, J. Murphy & D. Baxter (toim.) *The biogas handbook: Science, production and applications* (ss. 19–51). Woodhead Publishing Limited.
- Argyropoulos, D., Varzakas, T. & Benzie, J. (2013). Microbial communities and their dynamics in biomethane production. Teoksessa N. Korres, P. O'Kiely, J. Benzie & J. West (toim.) *Bioenergy Production by Anaerobic Digestion: Using agricultural biomass and organic wastes* (ss. 261–289). Routledge Taylor & Francis Group.
- Bachmann, N. (2013). Design and engineering of biogas plants. Teoksessa A. Wellinger, J. Murphy & D. Baxter (toim.) *The biogas handbook: Science, production and applications* (ss. 191–211). Woodhead Publishing Limited.
- Banks, C. & Heaven, S. (2013). Optimisation of biogas yields from anaerobic digestion by feedstock type. Teoksessa A. Wellinger, J. Murphy & D. Baxter (toim.) *The biogas handbook: Science, production and applications* (ss. 131–165). Woodhead Publishing Limited.
- Bioenergy International. (8.3.2017). Biogas. JR East to produce biogas from food waste. Haettu 22.5.2020 osoitteesta <https://bioenergyinternational.com/biogas/jr-east-produce-biogas-food-waste>
- Bochmann, G. & Montgomery, L. (2013). Storage and pre-treatment of substrates for biogas production. Teoksessa A. Wellinger, J. Murphy & D. Baxter (toim.) *The biogas handbook. Science, production and applications* (ss. 85–103). Woodhead Publishing Limited.
- Cheng, J. (2010a). Kinetics and Microbiology of Biological Processes. Teoksessa J. Cheng (toim.) *Biomass to Renewable Energy Processes* (ss. 135–150). Taylor & Francis Group.
- Cheng, J. (2010b). Anaerobic Digestion for Biogas Production. Teoksessa J. Cheng (toim.) *Biomass to Renewable Energy Processes* (ss. 151–208). Taylor & Francis Group.
- Cieslik, M., Dach, J., Lewicki, A., Smurzynska, A., Janczak, D., Pawlicka-Kaczorowska, J., ...Jóźwiakowski, K. (2016). Methane fermentation of the

maize straw silage under meso- and thermophilic conditions. *Energy*, 115, (ss. 1495–1502). <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.070>

Comino, E., Rosso, M. & Riggio, V. (2010). Investigation of increasing organic loading rate in the co-digestion of energy crops and cow manure mix. *Bioresource Technology*, 101, (ss. 3013–3019). Haettu 27.12.2019 osoitteesta <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.025>

Coyne, J., Wilson, C., Scarborough, M. & Umble, A. (2017). Anaerobic Digestion Fundamentals – Water Environment Federation. Haettu 1.11.2020 osoitteesta <https://www.wef.org/globalassets/assets-wef/direct-download-library/public/03---resources/wsec-2017-fs-002-mrrdc-anaerobic-digestion-fundamentals-fact-sheet.pdf>

Da Costa Gomez, C. (2013). Biogas as an energy option: an overview. Teoksessa A. Wellinger, J. Murphy & D. Baxter (toim.) *The biogas handbook: Science, production and applications* (ss. 1-16). Woodhead Publishing.

Drosg, B., Braun, R. & Bochmann, G. (2013). Analysis and characterisation of biogas feedstocks. Teoksessa A. Wellinger, J. Murphy & D. Baxter (toim.) *The biogas handbook: Science, production and applications* (ss. 52–84). Woodhead Publishing Limited.

Eduskunta. (30.6.2020). Lakihaankkeiden tietopaketti – LATI. EU:n jätesäädöspaketin täytäntöönpano. Haettu 24.8.2020 osoitteesta https://www.eduskunta.fi/FI/naineduskuntatoimii/kirjasto/aineistot/kotimainen_oikeus/LATI/Sivut/EUn-jatesaadospaketin-taytantonpano.aspx

Eisenmann Corporation. (2020). Products & service. Anaerobic Digestion & Biogas. Haettu 6.4.2020 osoitteesta <https://www.eisenmann.us.com/biogas-and-anaerobic-digestion/anaerobic-digestion-and-biogas>

Elintarviketurvallisuusvirasto & Helsingin yliopiston eläinlääketieteellinen tiedekunta. (2016). *Mikrobilääkkeiden käyttösuositukset eläinten tärkeimpiin tulehdus- ja tartuntatauteihin*. Evira. Haettu 7.1.2020 osoitteesta https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/tietoa-meista/asiointi/oppaat-ja-lomakkeet/viljelijat/elainten-pito/elainten-laakitseminen/mikrobilääkkeiden_kayttosuositukset_fi_2.pdf

Eneferm Oy. (2020). Ratkaisu. Kokonaisuuden ymmärtäminen. Haettu 8.4.2020 osoitteesta <https://eneferm.fi/programs/>

Engineering ToolBox. (2010). Biogas - Carbon Nitrogen Ratios. Haettu 10.9.2020 osoitteesta https://www.engineeringtoolbox.com/biogas-carbon-nitrogen-ratios-d_1608.html

Fuchs, W., Wang, X., Gabauer, W., Ortner, M. & Li, Z. (2018). Tackling ammonia inhibition for efficient biogas production from chicken. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, (ss. 186–199). Haettu 9.4.2020 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.038>

Gasum. (2018). Ajassa. Puhdas liikenne. Haettu 26.10.2019 osoitteesta <https://www.gasum.com/ajassa/puhdas-liikenne/2018/eu-patistaa-suomea-kasvattamaan-kaasutankkausasemien-maaraa/>

Gómez, D., Ramos-Suárez, J. L., Fernández, B., Muñoz, E., Tey, L., Romero-Güiza, M. & Hansen, F. (2019). Development of a Modified Plug-Flow Anaerobic Digester for Biogas Production from Animal Manures. *Energies*, 12(13), 2628. Haettu 2.11.2020 osoitteesta <https://doi.org/10.3390/en12132628>

Hitachi Zosen INOVA. (2019). Energy from Waste. Biological EfW Process. Haettu 8.9.2020 osoitteesta https://www.hz-inova.com/cms/en/home?page_id=964

Holm-Nielsen, J. & Oleskowicz-Popiel, P. (2013). Process control in biogas plants. Teoksessa A. Wellinger, J. Murphy & D. Baxter (toim.) *The biogas handbook: Science, production and applications* (ss. 228–247). Woodhead Publishing Limited.

Huttunen, M., Kuittinen, V. & Lampinen, A. (2018). *SUOMEN BIOKAASULAITOSREKISTERI N:O 21: Tiedot vuodelta 2017*. Publications of the University of Eastern Finland: Reports and studies in forestry and natural sciences N:o 33. Itä-Suomen yliopisto. Haettu 28.1.2020 osoitteesta https://erepo.uef.fi/bitstream/handle/123456789/20186/urn_isbn_978-952-61-2856-6.pdf

Jeppo Biogas Ab. Jepuan Biokaasu Oy. (n.d.). Yrityksestä. Haettu 14.4.2020 osoitteesta <https://jeppobiogas.fi/yritys/tietoa-yrityksesta/>

Järvenpää, J. (2019). Biokaasua ja biolannoitteita paikallisesti. Eneferm Oy. *Industry Summit 2019*. Haettu 8.4.2020 osoitteesta https://industrysummit.fi/wp-content/uploads/2019/05/I_Jussi-J%C3%A4rvenp%C3%A4%C3%A4_16_10_Eneferm_esitys.pdf

Karthikeyan, O. P., & Visvanathan, C. (2013). Bio-energy recovery from high-solid organic substrates by dry anaerobic bio-conversion processes: a review. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 12, (ss. 257–284). Haettu 14.11.2019 osoitteesta <https://doi.org/10.1007/s11157-012-9304-9>

Kauppila, J. (2020). Jätesäädöspaketin pääsisältö: Jätelainsäädännön uudistusehdotus lausunnoilla – esittely- ja keskustelutilaisuus 13.5.2020. Ympäristöministeriö. Haettu 10.7.2020 osoitteesta

https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Uudistusehdotuksen-keskeinen-sisalto-D4ECD64A_B5F3_4E93_9BA3_5AC7A33057BC-158429.pdf/7ab19b57-259a-f9a4-cd3b-0cffc3f2ef40/Uudistusehdotuksen-keskeinen-sisalto-D4ECD64A_B5F3_4E93_9BA3_5AC7A33057BC-158429.pdf?t=1603261190198

Kestävä Energiatalous. (2018). Kestävä Energiatalous. Kustannus Oy Lampila. Haettu 26.10.2019 osoitteesta <http://www.energiatalous.fi/>

Khanal, S. (2008a). Overview of Anaerobic Biotechnology. Teoksessa S. Khanal (toim.) *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production* (ss. 1–27). A John Wiley & Sons, Ltd.

Khanal, S. (2008b). Microbiology and Biochemistry of Anaerobic Biotechnology. Teoksessa S. Khanal (toim.) *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production* (ss. 29–41). A John Wiley & Sons, Ltd.

Khanal, S. (2008c). Environmental Factors. Teoksessa S. Khanal (toim.) *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production* (ss. 43–63). A John Wiley & Sons, Ltd.

Khanal, S. (2008d). Anaerobic Reactor Configurations for Bioenergy Production: Principles and Applications. Teoksessa S. Khanal (toim.) *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production* (ss. 93–114). A John Wiley & Sons, Ltd.

Kinnunen, V. & Rintala, J. (2015). Biokaasualan monet mahdollisuudet. Teoksessa M. Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.) *BIOKAASUTEKNOLOGIA Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 7–20). HAMK:n julkaisuja 17/2015. Hämeen ammattikorkeakoulu.

Korres, N. & Nizami, A. (2013). Variation in anaerobic digestion. Teoksessa N. Korres, P. O'Kiely, J. Benzie & J. West (toim.) *Bioenergy Production by Anaerobic Digestion: Using agricultural biomass and organic wastes* (ss. 194–230). Taylor & Francis Group.

Kothari, R., Pandey, A. K., Kumar, S., Tyagi, V. V., & Tyagi, S. K. (2014). Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, (ss. 174–195). Haettu 27.2.2020 osoitteesta <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.011>

Kymäläinen, M. (2015). Anaerobinen hajoaminen ja sen hallinta biokaasureaktorissa. Teoksessa M. Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.) *BIOKAASUTEKNOLOGIA Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 59–81). HAMKin julkaisuja 17/2015. Hämeen ammattikorkeakoulu.

- Kymäläinen, M. & Luostarinen, S. (2015). Biokaasutuotannon raaka-aineet. Teoksessa M. Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.) *BIOKAASUTEKNOLOGIA Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteen hyödyntäminen* (ss. 21–47). HAMKin julkaisuja 17/2015. Hämeen ammattikorkeakoulu.
- Laaksonen, J., Salmenperä, H., Stén, S. Dahlbo, H. Merilehto, K. & Sahimaa, O. (2018). *Kierrätyksestä kiertotalouteen: Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2023*. Ympäristöministeriö. Suomen ympäristö 01/2018. Haettu 7.9.2020 osoitteesta <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4774-6>
- Laitinen, J., Alhola, K. Manninen, K. & Säylä, J. (2014). *Puhdistamolietteen ja biojätteen käsittely ravinteita kierrättäen*. Hankeraportti. Suomen ympäristökeskus SYKE. Haettu 7.9.2020 osoitteesta <https://www.syke.fi/download/noname/%7B75C943EE-6205-42AA-B130-1105133D5FFF%7D/105713>
- Lampinen, A. (2015a). Biokaasun käsittely ja hyödyntäminen. Teoksessa M. Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.) *BIOKAASUTEKNOLOGIA Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 124–172). HAMKin julkaisuja 17/2015. Hämeen ammattikorkeakoulu.
- Lampinen, A. (2015b). Biokaasualan historia ja tulevaisuus. Teoksessa M. Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.), *BIOKAASUTEKNOLOGIA Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 190–198). HAMKin julkaisuja 17/2015. Hämeen ammattikorkeakoulu.
- Li, L., He, Q., Wei, Y., He, Q. & Peng, X. (2014). Early warning indicators for monitoring the process failure of anaerobic digestion system of food waste. *Bioresource Technology*, 171, (ss. 491–494). Haettu 19.3.2020 osoitteesta <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.089>
- Li, Y.-F., Nelson, M. C., Chen, P.-H., Graf, J., Li, Y. & Yu, Z. (2015). Comparison of the microbial communities in solid-state anaerobic digestion (SS-AD) reactors operated at mesophilic and thermophilic temperatures. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99, (ss. 969–980). Haettu 21.10.2019 osoitteesta <http://dx.doi.org/10.1007/s00253-014-6036-5>
- Liikenne- ja viestintäministeriö. (2017). *Liikenteen vaihtoehtoisten käyttövoimien jakeluverkko: Suomen kansallinen ohjelma*. Raportit ja selvitykset 4/2017. Haettu 8.8.2020 osoitteesta <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-501-9>
- Logan, M. & Visvanathan, C. (2019). Management strategies for anaerobic digestate of organic fraction of municipal solid waste: Current status and future prospects. *Waste Management & Research*, 37, (ss. 29–

39). Haettu 13.9.2020 osoitteesta

<http://dx.doi.org/10.1177/0734242X18816793>

Luonnonvarakeskus. (n.d. a). Biomassa-atlas. Biomassat. Haettu

14.12.2019 osoitteesta <https://www.luke.fi/biomassa-atlas/biomassojen-kuvaukset/pelto/>

Luonnonvarakeskus. (n.d. b). Mikrobilääkkeiden kulutus tuotantoeläimillä. Haettu 8.1.2020 osoitteesta

<https://www.luke.fi/ruokafakta/yleista-tietoa/antibiottien-kaytto/>

Luostarinen, S. & Pyykkönen, V. (2013). Biokaasuteknologian perusteet. Teoksessa S. Luostarinen (toim.) Biokaasuteknologiaa maataloilla I. Biokaasulaitoksen hankinta, käyttöönotto ja operointi - käytännön kokemuksia MTT:n maatilakohtaiselta laitokselta (s. 10–20). MTT raportti 113. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus, MTT Jokioinen. Haettu 7.4.2020 osoitteesta <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/481263>

Luostarinen, S. (2015). Biokaasuprosessit ja laitostaseet. Teoksessa M. Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.) *BIOKAASUTEKNOLOGIA Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 82–93). HAMKin julkaisuja 17/2015. Hämeen ammattikorkeakoulu.

Luostarinen, S. & Jaakkola, U. (2015). Biokaasutuotannon raaka-aineiden esikäsittely. Teoksessa M. Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.) *BIOKAASUTEKNOLOGIA Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 48–58). HAMKin julkaisuja 17/2015. Hämeen ammattikorkeakoulu.

Luostarinen, S., Perttilä, S., Nousiainen, J., Hellstedt, M., Joki-Tokola, E. & Grönroos, J. (2017). *Turkiseläinten lannan määrä ja ominaisuudet: Tilaseurannan ja lantalaskelman tulokset*. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 46/2017. Luonnonvarakeskus. Haettu 7.1.2020 osoitteesta https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/540236/luke-luobio_46_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Länsi- ja Sisä-Suomen Aluehallintovirasto. (2018). *Päätös 40/2018/1: Jeppo Biogas Ab:n biokaasulaitoksen ympäristöluvan muuttaminen, Uusikaarlepyy*. Haettu 14.4.2020 osoitteesta https://tietopalvelu.ahtp.fi/Lupa/Avaaliite.aspx?Liite_ID=4319636

Madigan, M., Martinko, J., Stahl, D. & Clark, D. (2012). *Brock Biology of Microorganisms*. Thirteenth Edition. Pearson Education.

Madsen, M., Holm-Nielsen, J. B. & Esbensen, K. H. (2011). Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, (ss. 3141–3155). Haettu 19.3.2020 osoitteesta <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.026>

Marttinen, S., Luostarinen, S. Winquist, E. & Timonen, K. (2015). Rural biogas: feasibility and role in Finnish energy system. Research report no 1.1.3-4. Cleen Oy. Haettu 11.7.2020 osoitteesta

<http://jukuri.luke.fi/handle/10024/543444>

Marttinen, S., Suominen, K., Lehto, M., Jalava, T. & Tampio, E. (2014). Haitallisten orgaanisten yhdisteiden ja lääkeaineiden esiintyminen biokaasulaitosten käsittelyjäännöksissä sekä niiden elintarvikeketjuun aiheuttaman vaaran arviointi. MTT Raportti 135. BIOSAFE-hankkeen loppuraportti. MTT Jokioinen. Haettu 10.4.2020 osoitteesta

<http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti135.pdf>

McEniry, J., Korres, N. & O'Kiely, P. (2013). Grass and grass silage. Teoksessa N. Korres, P. O'Kiely, J. Benzie & J. West (toim.) *Bioenergy Production by Anaerobic Digestion: Using agricultural biomass and organic wastes* (ss. 49–65). Taylor & Francis Group.

Motiva Oy. (2013). *Biokaasun tuotanto maatilalla*. Haettu 17.8.2020 osoitteesta

https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf

Murphy, J. & Thamsiroj, T. (2013). Fundamental science and engineering of the anaerobic digestion process for biogas production. Teoksessa A. Wellinger, J. Murphy & D. Baxter (toim.) *The biogas handbook: Science, production and applications* (ss. 104–130). Woodhead Publishing Limited.

Myllärinen, A. (n.d.). Ratkaisu orgaanisen jätteen muodostamiin ongelmiin. Yrityksen esittelydiat. Doranova Oy. Tampere 21.10.2019.

Neureiter, M. (2013). Maize and maize silage for biomethane production. Teoksessa N. Korres, P. O'Kiely, J. Benzie & J. West (toim.) *Bioenergy Production by Anaerobic Digestion: Using agricultural biomass and organic wastes* (ss. 66–81). Taylor & Francis Group.

Nguyen, D., Chang, S., Cha, J., Jeong, S., Yoon, Y., Lee, S., ...Nho, H. (2017). Dry semi-continuous anaerobic digestion of food waste in the mesophilic and thermophilic modes: New aspects of sustainable management and energy recovery in South Korea. *Energy Conversion and Management*, 135, (ss. 445 – 452). Haettu 31.10.2019 osoitteesta

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.030>

Niu, Q., Hojo, T., Qiao, W., Qiang, H. & Li, Y.-Y. (2014). Characterization of methanogenesis, acidogenesis and hydrolysis in thermophilic methane fermentation of chicken manure. *Chemical Engineering Journal*, 244, (ss. 587–596). Haettu 31.10.2019 osoitteesta

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2013.11.074>

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). HAMKin julkaisuja 17/2015. Hämeen ammattikorkeakoulu.

ProAgria. (n.d.). *Maatalouden biomassat biokaasulaitoksessa: Opas biomassojen ominaisuuksista syötteenä ja lannoitteena*. ProAgrian hankejulkaisut 6. Haettu 15.12.2019 osoitteesta https://www.proagria.fi/sites/default/files/attachment/maatalouden_biomassat_biokaasulaitoksessa_opas_s.pdf

Quevedo de Lima, H. & Martins, G. (2014). *Anaerobic digestion (AD) of municipal solid waste in Santo André - SP: Review*. ResearchGate. Haettu 8.9.2020 osoitteesta https://www.researchgate.net/figure/Schematic-model-of-the-anaerobic-reactor-with-Kompogas-technology-Reference_fig3_291334691

Rasi, S., Timonen, K., Joensuu, K., Regina, K., Virkajärvi, P., Pulkkinen, H., Tampio, E., Pyykkönen, V. & Luostarinen, S. (2019). *Nurmi biokaasun raaka-aineena - RED II direktiivin mukainen kasvihuonekaasupäästöjen laskenta*. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 46/2019. Luonnonvarakeskus. Haettu 9.12.2019 osoitteesta <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-789-3>

Ruokavirasto. (2019). Rehu- ja lannoitealat. Lannoitevalmisteet ja lannoitealan toiminta. Lannan käyttö ja käsittely. Haettu 17.9.2020 osoitteesta <https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/rehu-ja-lannoiteala/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/kierratsravinteet/lannan-kaytto-ja-kasittely/>

Scherer, P. (2007). Operating Analytics of Biogas Plants to Improve Efficiency and to Ensure Process Stability. *Progress in Biogas*, (ss. 77–84). Hamburg University of Applied Sciences. Haettu 11.12.2019 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/277313159_Operating_Analytics_of_Biogas_Plants_to_Improve_Efficiency_and_to_Ensure_Process_Stability/link/58e00c0ea6fdcc41bf922b06/download

Schnürer, A. & Jarvis, Å. (2010). *Microbiological Handbook for Biogas Plants*. Swedish Gas Centre Report 207. Haettu 2.12.2019 osoitteesta http://www.emrg.it/Lezioni_Energia_Rinnovabile/Microbiological_handbook_for_biogas.pdf

Seppälä, A., Kässi, P., Lehtonen, H., Aro-Heinilä, E., Niemeläinen, O., Lehtonen, E., Höhn, J., Salo, T., Keskitalo, M., Nysand, M., Winqvist, E., Luostarinen, S. & Paavola, T. (2014). *Nurmesta biokaasua liikennepolttoaineeksi*, MTT Raportti 151. Maa- ja elintarviketalouden

tutkimuskeskus, MTT Jokioinen. Haettu 15.12.2019 osoitteesta
<http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti151.pdf>

Sevda, S., Pant, D. & Singh, A. (2013). Biomethane production with reference to land-use change. Teoksessa N. Korres, P. O'Kiely, J. Benzie & J. West (toim.) *Bioenergy Production by Anaerobic Digestion: Using agricultural biomass and organic wastes* (ss. 30–45). Taylor & Francis Group.

Singh, B., Szamosi, Z. & Siménfalvi, Z. (2019). State of the art on mixing in an anaerobic digester: A review. *Renewable Energy*, 141, (ss. 922–936).
 Haettu 14.11.2019 osoitteesta
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.072>

Sivutuoteasetus (EY) N:o 1069/2009 - EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EY) N:o 1069/2009, annettu 21 päivänä lokakuuta 2009, muiden kuin ihmisravinnoksi tarkoitettujen eläimistä saatavien sivutuotteiden ja niistä johdettujen tuotteiden terveyssäännöistä sekä asetuksen (EY) N:o 1774/2002 kumoamisesta. Haettu 7.1.2020 osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R1069&from=FI>

STRABAG Umwelttechnik GmbH. (2016). *Biogas Plants*. Haettu 3.4.2020 osoitteesta [http://www.strabag-umwelttechnik.com/databases/internet/_public/files.nsf/SearchView/2DE1B183F101C395C1257FB70030CCBC/\\$File/ATTKE6I3.pdf](http://www.strabag-umwelttechnik.com/databases/internet/_public/files.nsf/SearchView/2DE1B183F101C395C1257FB70030CCBC/$File/ATTKE6I3.pdf)

STRABAG Umwelttechnik GmbH. (2018). CORE COMPETENCES. Dry digestion in the LARAN® plug-flow digester. Haettu 3.4.2020 osoitteesta: http://www.strabag-umwelttechnik.com/databases/internet/_public/content.nsf/web/EN-STRABAGUMWELTTECHNIK.COMN-anlagenbau_trockenvergaerung.html?men1=2&men2=undefined&sid=220&h=undefined

SUOMEN ILMASTOPANEELI The Finnish Climate Change Panel. (n.d.). Kysymykset ja vastaukset autokalkulaattorista. Haettu 14.9.2020 osoitteesta https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2020/01/Ilmastopaneeli_autokalkulaattori-UKK.pdf

Suomen Kiertovoima ry. (n.d.). Ymmärrämme. Koostumustietopankki. Haettu 9.7.2020 osoitteesta https://kivo.fi/yymmarramme/koostumustietopankki/kotitalousjätteen_koostumus_yhteenveto/

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos THL. (2020). Fineli. Elintarvikkeet. Haettu 1.11.2020 osoitteesta <https://fineli.fi/fineli/fi/elintarvikkeet/858>

Thöni Industriebetriebe GmbH. (2020). Environmental Energy Engineering. Haettu 5.4.2020 osoitteesta <https://www.thoeni.com/en/energy-engineering/#tho-ttv-thoeni-high-solids-anaerobic-dry-digestion-1>

Torniainen, M. (2020) Sivutuoteasetuksen mukainen laitoshyväksyntä ja hygienisointikäsitely. Ruokavirasto. Sähköpostiviesti tekijälle 31.3.2020.

Työ- ja elinkeinoministeriö. (2017). *Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030*. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 4/2017. Haettu 15.8.2020 osoitteesta <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-190-6>

Työ- ja elinkeinoministeriö. (2020). *Biokaasuohjelmaa valmisteleavan työryhmän loppuraportti*. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2020:3. Haettu 8.4.2020 osoitteesta <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-482-2>

Täytöntöönpanoasetus (EU) N:o 142/2011. KOMISSION ASETUS (EU) N:o 142/2011, annettu 25 päivänä helmikuuta 2011, muiden kuin ihmisravinnoksi tarkoitettujen eläimistä saatavien sivutuotteiden ja niistä johdettujen tuotteiden terveysäännöistä sekä asetuksen (EY) N:o 1774/2002 kumoamisesta annetun Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EY) N:o 1069/2009 täytäntöönpanosta sekä neuvoston direktiivin 97/78/EY täytäntöönpanosta tietyjen näytteiden ja tuotteiden osalta, jotka vapautetaan kyseisen direktiivin mukaisista eläinlääkärintarkastuksista rajatarkastusasemilla. Haettu 6.1.2020 osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:054:0001:0254:FI:PDF>

Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013. Haettu 18.9.2020 osoitteesta <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130331>

Vega De Lille, M. (2015). *Modeling, Simulation and Control of Biotechnological Processes in Decentralized Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater*. Doktorin der Ingenieurwissenschaften. Der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Haettu 31.1.2020 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/296077054_Modeling_Simulation_and_Control_of_Biotechnological_Processes_in_Decentralized_Anaerobic_Treatment_of_Domestic_Wastewater

Vieno, N., Sarvi, M., Salo, T., Rämö, S., Ylivainio, K., Pitkänen, T. & Kusnetsov, J. (2018). *Puhdistamolietteiden sisältämien haitta-aineiden aiheuttamat riskit lannoitekäytössä*. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 58/2018. Luonnonvarakeskus. Haettu 27.10.2020 osoitteesta <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-661-2>

Virolainen-Hynnä, A. (2020). *Biokaasun tuotanto ja käyttö Suomessa 2030*. Suomen Biokierto ja Biokaasu ry. Haettu 11.7.2020 osoitteesta https://biokierto.fi/wp-content/uploads/2020/06/Biokaasu2030_raportti_17062020.pdf

Wang, Y., Zhang, Y., Wang, J. & Meng, L. (2009). Effects of volatile fatty acid concentrations on methane yield and methanogenic bacteria. *Biomass and Bioenergy*, 33, (ss. 848–853). Haettu 19.3.2020 osoitteesta <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.01.007>

Wang, Z. & Keshwani, D. (2010). Biomass Resources. Teoksessa J. Cheng (toim.) *Biomass to Renewable Energy Processes* (ss. 41–70). Taylor & Francis Group.

Winquist, E., Rikkonen, P. & Varho, V. (2018). *Suomen biokaasualan haasteet ja mahdollisuudet*. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 47/2018. Luonnonvarakeskus. Haettu 1.12.2019 osoitteesta <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-630-8>

Ympäristöministeriö. (2018). Kansainväliset ilmastoneuvottelut. Pariisin ilmastopöytäkirja. Haettu 13.9. 2020 osoitteesta https://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastomuutoksen_hillitseminen/Kansainvaliset_ilmastoneuvottelut/Pariisin_ilmastosopimus

HAASTATTELUT

Gareis, C. (2020). Toimintovastaava biojätteen käsittely. HSY Jätehuolto. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY. 22.1.2020.

Kainulainen, A. (2020). Portfolio Manager. Waste Management R&D. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY. 22.1.2020.

Myllärinen, A. (2019). Toimitusjohtaja. Doranova Oy. 8.11.2019.

SYÖTENÄYTTEIDEN ANALYYSITULOKSET

Tulokset

ANALYYSITULOKSET

	Sallad	Gött Och Blandent	Kettu	Spån	Sianliete	Nurmi
Kuiva-aine (TS) %	6,2	43,4	38,5	28,1	4,1	42,9
Orgaaninen aines (VS) %	5,5	42,8	23,8	25,7	2,9	38,8
VS/TS	0,89	0,99	0,61	0,92	0,72	0,90
Tilavuuspaino kg/m ³	930	680	720	590	950	230
Hili, kokonais % TS	41	40	21	42	39	41
kg/tn	25	174	81	118	16	176
kg/tn TS	410	400	210	420	390	410
kg/m ³	24	118	58	70	15	40
Typpi, kokonais % TS	5,54	3,80	10,13	1,90	13,18	2,47
kg/tn	3,43	15,82	38,99	5,35	5,38	10,61
kg/tn TS	56	36	101	19	132	25
kg/m ³	3,19	10,62	28,07	3,16	5,11	2,44
Ammoniumtyppi % TS	0,44	0,07	1,15	0,08	7,53	0,08
kg/tn	0,27	0,31	4,44	0,24	3,07	0,27
kg/tn TS	4,44	0,71	11,53	0,85	75,25	0,64
kg/m ³	0,26	0,21	3,20	0,14	2,92	0,08
Fosfori, kokonais % TS	0,61	0,96	4,60	0,15	2,90	0,28
kg/tn	0,38	3,73	17,71	0,42	1,18	1,12
kg/tn TS	6,10	8,60	46,00	1,50	29,00	2,60
kg/m ³	0,35	2,54	12,75	0,25	1,12	0,28
Fosfori, vesiliukoinen % TS	0,41	0,28	0,15	0,08	0,58	0,10
kg/tn	0,25	1,20	0,56	0,22	0,24	0,41
kg/tn TS	4,10	2,80	1,50	0,80	5,80	0,96
kg/m ³	0,24	0,82	0,41	0,13	0,23	< 0,1
Mangaani, kokonais mg/kg TS	54	98	97	88	400	150
Molybdeeni, kokonais mg/kg TS	< 0,5	0,91	0,63	< 0,5	3,80	1,40
Rikki, kokonais mg/kg TS	2,80	5,20	6,30	0,89	8,10	3,40
Seleen, kokonais mg/kg TS	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Nikkeli, kokonais mg/kg TS	1,60	7,20	2,70	2,90	2,00	0,99
Sinkki, kokonais mg/kg TS	46	77	460	130	500	34

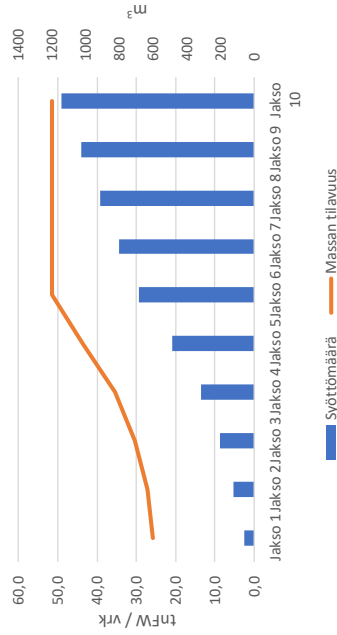
YKSINKERTAISTETTU OLR:N JA VIIPYMÄAJAN LASKELMATAULUKKO

Reaktoreita (kpl)	1	2
Reaktoritilavuus (m ³)	1200	2400
Käsiteltävä syötemäärä (tn/vuosi)	14000	28000
TS syöte (%)	30,0	30,0
VS syöte (%)	25,0	25,0
TS-vähennelmä (%)	40	40
Mädätteen kierrätys (%)	20	20
TS mädäte (%)	20	20
Syöttö (uusi syöte) tn/vrk	38	77
Mädätteen kierrätys (tn/vrk)	7	14
OLR (kgVS/(m³vrk))	8	8
HRT (vrk)	27	27
SRT (ilman kierrätystä) (vrk)	31	31

YLÖSAJON KUORMITUS- JA SYÖTTÖLASKENTATAULUKKO

SYÖTTEET	tn/vuosi	tn/vrk	Seossuhde (%)	TS%	VS%	Hilii kg/tn	Ammoni um-typpi kg/tn	Ammoni um-typpi kg/tmFW	Ammoni um-typpi kg/vuosi	C/N	Hilii yht.kg/vuosi	Typpi yht.kg/vuosi
Kasvihuonejäte (salaatti)	1300	4	5	6,2	5,5	25	3	0,27	351	7,3	32500	4459
Verinen sahanpuru	1300	4	5	28,1	25,7	118	5	0,24	312	22,1	153400	6955
Ketunlanta	5000	14	18	38,5	23,6	81	39	4,44	22200	2,1	405000	194950
Perunaj.-vilijarehu	39	0	0	43,4	42,8	174	16	0,31	12	11,1	6786	609
Nurmi	13000	36	46	42,9	38,8	176	11	0,27	3510	16,6	2288000	137930
Sianliete	7361	20	26	4,1	2,9	16	5	3,07	22598	3,0	117776	39602
Yhteensä	28000	77	100	29,5	24,5	107	14	1,7	48983	7,8	3003462	384505
SYÖTE												
TS, kok %	29,5					Reaktoritilavuus (m ³)						
VS, kok %	24,5					Alkutilavuus (m ³)						
C/N, kok	7,8					OLR						
N-tot (kg/tnTS)	46,5					Kuormituksen lisäys	14	vrk välein				
NH ₄ -N (kg/kgFW)	1,7					TS-vähennelmä (%)	40					
OLR (kgVS/(m ³ vrk))	7,8											
Syöttö (tn/vrk/V_{reaktori})	38											
Syöttöjakso (nro)	Jakso 1	Jakso 2	Jakso 3	Jakso 4	Jakso 5	Jakso 6	Jakso 7	Jakso 8	Jakso 9	Jakso 10		
Syöttöjakso (vrk)	14	28	42	56	70	84	98	112	126	140		
OLR (kgVS/m ³ vrk)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
V (reaktori, jaksossa)	600	634	707	828	1017	1200	1200	1200	1200	1200		
Syöttö (FW) tn/vrk	2,4	5,2	8,7	13,5	20,8	29,4	34,3	39,2	44,1	49,0		
Poiste (tn/vrk)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,9	30,2	34,6	38,9	43,2		

Syöttömäärä ja reaktorissa olevan massan määrä syöttöjaksoittain



NÄYTTEENOTTOSUUNNITELMA

	ma					ti					ke					to					pe									
	no-pisteet					no-pisteet					no-pisteet					no-pisteet					no-pisteet									
JAKSO I																														
Viikot 1-4 tai TS < 20% ja pH 1=2=3																														
Viikko 1	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P
pH	x	x	x	x																	x	x	x							
VFA + alkaliteetti	x		x																				x							
Ammoniumtyppi	x		x																											
TS + VS	x	x																												
VFA, erittely																														
Viikko 2	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P
pH		x	x	x																	x	x	x							
VFA + alkaliteetti		x																					x							
Ammoniumtyppi			x																											
TS + VS		x																												
VFA, erittely																														
Viikko 3	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P
pH		x	x	x																	x	x	x							
VFA + alkaliteetti			x																				x							
Ammoniumtyppi			x																											
TS + VS		x																												
VFA, erittely																														
Viikko 4	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P
pH		x	x	x																	x	x	x							
VFA + alkaliteetti			x																				x							
Ammoniumtyppi			x																											
TS + VS		x																												
VFA, erittely																														
JAKSO II																														
Viikot 5-10 tai TS > 20% ja V < 1200 m³																														
Viikko 5	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P
pH		x	x	x																	x	x	x							
VFA + alkaliteetti		x	x	x																			x							
Ammoniumtyppi		x	x	x																										
TS + VS		x		x																										
VFA, erittely																														
Viikko 6	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P
pH		x	x	x																	x	x	x							
VFA + alkaliteetti		x	x	x																			x							
Ammoniumtyppi		x	x	x																										
TS + VS																														
VFA, erittely																														
Viikko 7	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P
pH		x	x	x																	x	x	x							
VFA + alkaliteetti		x	x	x																			x							
Ammoniumtyppi		x	x	x																										
TS + VS		x		x																										
VFA, erittely																														
JAKSO III																														
Viikot 11-16 tai TS > 20% V = 1200 m³ ja kuormitusta nostetaan edelleen																														
Viikko 11	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P
pH		x	x	x	x																x	x	x							
VFA + alkaliteetti		x	x	x	x																		x							
Ammoniumtyppi		x	x	x	x																									
TS + VS		x		x	x																									
VFA, erittely		x	x	x																										
Viikko 12	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P
pH		x	x	x	x																x	x	x							
VFA + alkaliteetti		x	x	x	x																		x							
Ammoniumtyppi			x		x																									
TS + VS		x			x																									
VFA, erittely																														
JAKSO IV																														
Viikot 17 - kunnes tasapainoinen prosessi on saavutettu																														
Viikko 17	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P
pH		x	x	x	x																x	x	x							
VFA + alkaliteetti		x	x	x	x																		x							
Ammoniumtyppi			x		x																									
TS + VS		x			x																									
VFA, erittely																														
Vakaan prosessin vaihe, näytteet 1 krt/kk (tai 1 krt/6 kk)																														
	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P	S	1	2	3	P
pH		x	x	x	x																									
VFA + alkaliteetti		x	x	x	x																									
Ammoniumtyppi		x	x	x	x																									
TS + VS		x			x																									
VFA, erittely		(x)	(x)	(x)																										

(Jokaiselle viikolle on oma suunnitelma, joka on piilotettavissa/palautettavissa excel-lomakkeella)

ANALYYSIEN VIITEARVOT JA KORJAAVAT TOIMENPITEET

TAVOITEARVO	INHIBITTORAJA	MAHDOLLINEN SYY	TOIMENPITEET	MUUTA HUOMIOITAVAA	TEORIAPERUSTA JA LÄHTEET (viittaus lukuun, jossa säää kriteerillä)
Erinääritetty / tasainen		Syöte voi olla useita, kuten erilaiset reaktorin toiminnassa esiintyvät häiriöt, syötteen ominaisuudet ja erilaiset prosessitasapainon häiriöt.	Pyritään selvittämään syy ja suoritetaan tarvittavat korjaustoimet.	Tasapainoisessa prosessissa kaasuntuotto pysyy tasaisena, tavoitteen mukaisesti prosessin ylläpitoalueen jälkeen. Prosessin ylläpitoalueessa seurataan kuormituksen nostamisen vaikutusta kaasuntuottoon.	4.6.1 Lämpötila 4.6.4 Haihtuvat rasvahapot 4.6.5 Ammoniumtyppi 4.7.3 Sekoitus 4.7.7 Prosessin ylläpito 4.7.8 Prosessista seurattavat parametrit
50-80		Erläiset metanogeenien toimintaa inhiboivat prosessitasapainon häiriöt.	Pyritään selvittämään syy ja suoritetaan tarvittavat korjaustoimet.		4.1 Anaerobinen hajominen 4.6.1 Lämpötila 4.6.4 Haihtuvat rasvahapot 4.6.5 Ammoniumtyppi 4.7.3 Sekoitus 4.7.7 Prosessin ylläpito 4.7.8 Prosessista seurattavat parametrit
55 ± 0,5	≥ Δ2	Syötteen lämpötila, lämmön heikko siirtyminen massassa (korkea TS), eristävän sedimenttikerroksen kertyminen reaktorin pohjalle, vika lämpöpörsäissä tai ohjauksijärjestelmässä, jne.	Selvitetään syy, ja korjataan vika. Tai kompensoidaan muilla mahdollisilla keinoilla, esim. tehostamalla esilämmitystä, lisäämällä mädätteen kiertävää tai reaktorin lämmitystehoa. Vältetään kylmiä ja paljon lämmitystehoa vaativia sekä sedimentoitumista aiheuttavia syötteitä.		4.6.3 pH ja alkaliteetti 4.6.4 Haihtuvat rasvahapot 4.6.5 Ammoniumtyppi
6,8-7,4	< 6,6 tai > 8	VFA:t kumuloidut prosessiin. Kohonnut ammoniumtyppiitoisuus.	Selvitetään syy nousuun/laskuun muiden analyyttien avulla. Prosessi saattaa olla kaatumassa, syöttöä rajoitetaan, pH:tä säädetään kernikaalilla. Analysoidaan VFA, alkaliteetti ja NH ₄ -N kalusta näytteenotuspisteistä.		4.6.4 Haihtuvat rasvahapot
1 000-4 000 (mesofiilinen), termofiilissä prosessissa korkeimmat pitoisuudet.	8 000	Hydrolyysi nopeampaa suhteessa metanogeenisiin tai metanogeenisiin inhibitoituihin.	Oetaan uusintänäytteet eri no-pisteistä. Jos nousu jatkuu, syöttöä rajoitetaan ja analysoidaan VFA-eritytel. Hapen syöttäminen reaktorin laskeeseen VFA-pitoisuutta.		4.6.4 Haihtuvat rasvahapot
< 2 400	> 5000	Aseklattisten metanogeenien inhibitoiminen tai liian nopea hydrolyysi.	Selvitetään, johtuuko kumuloiduminen ammoniakk-inhibitiosta (ks. rivi 12) vai VFA-kumuloidumisesta. (ks. rivi 6).		4.6.4 Haihtuvat rasvahapot 7.1.3 Viitearvojen määrittäminen
	900-1 100	Liiallisesta kuormituksesta johtuva vedyn osapaineen nousu. Metanogeenien toiminta inhibitoitunut.	Syöttöä rajoitetaan.		4.6.4 Haihtuvat rasvahapot
	5 1,0-1,4				7.1.3 Viitearvojen määrittäminen 4.6.5 Ammoniumtyppi
< 1,5	3-5; 1,5-3 (pH > 7,4)	Typipitoiset ja paljon liukoistuvaa typpeä sisältävät syötteet, pitkä viipymä, korkea klerirätyssäste.	Oetaan uusintänäytteet eri no-pisteistä. Syöttöä rajoitetaan, vähennetään typpi-pitoisten ja paljon liukoistuvaa typpeä sisältävien syötöiden osuutta. Myös klerirätyksen vähentäminen rajoittaa ammoniumtyppi-pitoisuutta.		4.6.5 Ammoniumtyppi
< 100	> 100, adaptiivisuus prosessissa 800-900	Lämpötilasta ja pH:sta johtuva ammoniakin osuuden nousu tai korkea ammoniumtyppiitoisuus.	Oetaan uusintänäytteet eri no-pisteistä. Jos nopea nousu, pyritään laskemaan pH laskulle neutraalia. Vähennetään typpi-pitoisten syötöiden osuutta. Lasketaan lämpötilaa. Määritetään VFA-eritytel inhibitiin selvittämiseksi. Ammoniumtyypin saostus magnesiumilla ja/tai fosfaattilla.		4.6.3 pH ja alkaliteetti 4.7.6 Ammoniakki-inhibitiion hallinta
6 000-13 000	> 0,5	Kertyvät hapot kuluttavat alkaliteettiä.	Oetaan uusintänäytteet. Jos samaan aikaan kohonnut VFA, toimitaan kohdan 11 mukaisesti.		4.6.3 pH ja alkaliteetti
< 0,3-0,4	> 0,5	Puskurikaapasteetti vähentynyt kertyneiden rasvahappojen vuoksi.	Rajoitetaan syöttöä.		4.6.3 pH ja alkaliteetti
45-55		Matala väliheräisy, viipymäaika liian lyhyt. Huonosti tai hitaasti haijovat syötteet	Syöttöä vähennetään, jotta saavutetaan riittävä viipymäaika. Muuretaan syötökokoostumusta.		4.7.2 Syöttestä tehtävät analyysit 4.7.5 Viipymäaika
20-40					4.7.2 Syöttestä tehtävät analyysit 4.7.6 Ammoniakki-inhibitiion hallinta

TULOSTEN KIRJAUSTAULUKKO JA ESIMERKKEJÄ KUVAAJISTA

No-päivä	Päivä_jnr	Lt	Biokaasu	CH ₄ -pit.	pH_syt	pH_1	pH_2	pH_3	pH	määritt.	VFA_1	VFA_2	VFA_3	VFA	Alkaliteetti	Alkaliteetti	Alkaliteetti	NH ₄ -N	NH ₄ -N_1	NH ₄ -N_1	NH ₄ -N_2	NH ₄ -N_2	NH ₄ -N_3	NH ₄ -N_3	määritt.	määritt.	NH ₄ -N	NH ₄ -N	
1.6.2020	0	55				7,9	7,5	7,7	8,0	600	1900	1250						3,0	709	2,0	219	2,0	327	2,0	561				
5.6.2020	4	54				7,6	7,6	8,0	8,0	1050																			
15.6.2020	14	55				7,8	5,6	8,2	8,0	1100	1050	1200						1,9	375	1,9	29	1,9	725	2,0	564				
16.6.2020	15	56				7,8	7,0	8,0	8,0	1500								2,2	455	2,2	87	2,2	643	3,0	877				
20.6.2020	19	56				7,7	8,5	7,8	8,1	1500	1750	2000						2,3	394	2,3	1303	2,3	475	4,5	1539				
21.6.2020	20	55				7,9	6,5	7,0	7,7	1800								2,1	496	2,1	26	2,1	79	4,3	703				
22.6.2020	21	55				8,1	6,5	6,5	7,5	1300	2000	2200						2,2	724	2,2	27	2,2	27						
25.6.2020	24	55				8,0	6,5	7,0	7,8	2200								3,0	841	3,0	37	3,0	113						
30.6.2020	29	5				7,0	7,0	7,5	8,2	2400	2300	1800						4,0	5	4,0	5	4,0	16	4,2	81				

(Taulukkoon on kirjattu esimerkinomaisesti kuvitteellisia analyysituloksia.)

