

Vaakamallisen biokaasureaktorin rakenteen kehitys

Emilia Löf

Opinnäytetyö
Toukokuu 2019
Tekniikan ala
Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Löf, Emilia	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2019
	Sivumäärä 43	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Vaakamallisen biokaasureaktorin rakenteen kehitys		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Pauliina Uusi-Penttilä, Hannariina Honkanen		
Toimeksiantaja(t) Elomatic Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Kuivamädättämöiden käyttö biokaasun tuotantoon on vielä suhteellisen tuore asia, joten riittävää kokemusta ja tietoa ei ole syötteen käyttäytymisestä niiden sisällä. Reaktorin sisällä ilmenee erilaisia ongelmia syötteen kanssa, kuten kiintoaineen laskeutumista ja kovettumista pohjalle. Opinnäytetyön toimeksiantajana toiminut Elomatic Oy huomasi tarpeen vaakamallisen kuivamädättämöreaktorin rakenteen jalostukselle meneillään olleiden projektien pohjalta.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli vaakamallisen biokaasureaktorin konseptitasoisen perusrakenteen esittely ja sedimentoitumisen ongelmakohtien paikantaminen. Lisäksi haluttiin jalostaa rakennetta sedimentoitumisen hallitsemiseksi. Kyseessä oli konttimallinen biokaasureaktori. Sedimentoitumisen hallintaan keskityttiin pääasiassa rakenteellisilla ratkaisuilla, mutta myös syötteen laatuun otettiin kantaa. Selvityksen pohjalta kehiteltiin ehdotuksia reaktorin rakenteen jalostukseen. Näistä parhaimmiksi todetut otettiin käyttöön työn pohjalta tehtyyn konseptitason 3D-malliin. Malli tehtiin Vertex G4 Plant -suunnitteluohjelmalla.</p> <p>Työn tietoperusta rakentuu biokaasun ja sedimentoitumisen teorian ympärille. Työtä varten kerätty aineisto tuli pääosin Elomaticin asiantuntijoilta, jotka ovat työskennelleet biokaasulaitosten suunnittelun ja konsultoinnin parissa. Kerätyn tiedon pohjalta työhön käytettiin omaa ideointia ja pohdintaa.</p> <p>Tuloksena saatiin muutamia konseptitason suunnitelmia reaktorin rakenteen jalostamiseksi ja esittely reaktorin konseptitasoisesta perusrakenteesta. Konseptitason malli tulee toimimaan detaljisuunnittelijalle lähtötietona uusissa biokaasureaktoriprojekteissa.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Biokaasureaktori, sedimentoituminen, vaakamallinen reaktori, biokaasu, syöte		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Löf, Emilia	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2019 Language of publication: Finnish
	Number of pages 43	Permission for web publication: x
Title of publication Developing the structure of a horizontal digester		
Degree programme Degree Programme in Energy- and Environmental Technology		
Supervisor(s) Uusi-Penttilä, Pauliina & Honkanen, Hannariina		
Assigned by Elomatic Oy		
Abstract <p>The use of dry digesters in biogas production is still relatively fresh, so there is not enough experience and knowledge about the behavior of the feed in them. There are various problems with the feed in the digester, such as solids settling and hardening on the bottom. Based on ongoing and past projects Elomatic Oy, the assignor of the bachelor's thesis, noticed the need for structural improvement in the dry digester.</p> <p>The goal of the thesis was to introduce the basic structure of the horizontal dry digester and locate the most problematic areas of sedimentation and then improve the structure of the digester. Managing sedimentation mainly focused on structural solutions, but the feed quality was also considered. Based on the study, proposals for refining the reactor structure were developed. The most useful ideas were modeled into a 3D-model of the digester. The model was made with Vertex 4G Plant -design program.</p> <p>The theoretical framework of the thesis consists of the theory of biogas and sedimentation. The data for the thesis were gathered from Elomatic designers and consultants who have been working with biogas plants. The author's own ideas and reflections were based on the information and findings of the experts.</p> <p>The concrete result of the work was a refined concept-level model of a horizontal digester and a demonstration of the concept-level basic structure of the digester. The concept-level model will serve detail designers as a source data for the new digester projects.</p>		
Keywords/tags (subjects) Digester, sedimentation, horizontal digester, biogas, feed		
Miscellaneous (Confidential information)		

Sisältö

Määritelmät	3
1 Johdanto	5
1.1 Opinnäytetyön tausta.....	5
1.2 Työn tavoite ja rajaus	7
1.3 Tutkimusmenetelmät ja toteutus	8
1.4 Elomatic Oy.....	9
2 Biokaasu	10
2.1 Tuotanto ja koostumus	10
2.2 Raaka-aine	12
2.3 Tuotantoprosessi.....	13
2.3.1 Märkä- ja kuivaprosessi	15
2.3.2 Meso- ja termofiilinen prosessi.....	17
3 Sedimentoituminen	18
3.1 Sedimentin kulkeutuminen ja laskeutuminen	18
3.2 Eroosio.....	21
4 Sedimentoituminen biokaasureaktorissa	21
4.1 Sedimentoitumisen hallinta	22
4.2 Syötteen laadun vaikutus	24
5 Vaakamallinen biokaasureaktori	24
5.1 Sekoitus	25
5.2 Sedimentoitumisen ongelmakohdat.....	27
5.3 Vertailu muihin reaktorimalleihin	28
6 Tulokset ja johtopäätökset	31
7 Pohdinta	36
7.1 Työn suoritus ja tulokset	36
7.2 Luotettavuus.....	38
7.3 Jatkokehitys	38

Lähteet	40
----------------------	-----------

Liitteet	43
-----------------------	-----------

Liite 1. Vaakamallisen biokaasureaktorin konseptitasoinen perusrakenne	43
--	----

Kuviot

Kuvio 1. Biokaasun tuotanto ja hyödyntäminen Suomessa vuosina 1994–2017	6
---	---

Kuvio 2. Koostumus- ja massavertailuesimerkki raaka-aineen hajoamisesta biokaasuksi	13
--	----

Kuvio 3. Orgaanisen aineen vaiheittainen hajoaminen biokaasuksi	15
---	----

Kuvio 4. Lieriönmuotoinen märkäprosessi.....	16
--	----

Kuvio 5. Kompogasin vaakamallinen biokaasureaktori	17
--	----

Kuvio 6. Vaakamallinen biokaasureaktori	25
---	----

Kuvio 7. Melasekoitin	26
-----------------------------	----

Kuvio 8. Syötettä kerääntyy herkästi sekoittimien väliin ja pätyihin.	27
--	----

Kuvio 9. Syötemateriaalia voi kerääntyä lämmityspattereihin ja sivuille.	28
---	----

Kuvio 10. Thönin kuivamädättämö sisältä	29
---	----

Kuvio 11. Kompogasin melasekoittimet.....	30
---	----

Kuvio 12. Huoltoluukun kautta voidaan käydä poistamassa sedimentoitunutta syötettä.	31
---	----

Kuvio 13. Huoltoluukkuun on hyvä asentaa patosteet.	32
--	----

Kuvio 14. Lämmityspatteri ilman koteloa ja koteloituna	32
--	----

Kuvio 15. Lämmityspatterit reaktorin ulkopinnassa	33
---	----

Kuvio 16. Sekoittimet limittäin aseteltuna aiheuttaa uusia ongelmakohtia.	34
--	----

Kuvio 17. Kauhamaisempi pää sekoittimessa voisi irrottaa ja liikuttaa paremmin laskeutunutta lietemateriaalia.	35
--	----

Taulukot

Taulukko 1. Biokaasun tyypillisiä koostumuksia Suomessa	11
---	----

Määritelmät

Anaerobinen

Ilmiö, joka tapahtuu hapettomissa oloissa.

Biokaasu

Kaasuseos, jota syntyy biomassan hajotessa hapettomissa oloissa. Biokaasu koostuu pääosin metaanista (55–75 %) ja hiilidioksidista (30–45 %).

Biometaani

Jalostettu biokaasu, joka kelpaa liikennekäyttöön tai kaasuverkkoon.

CHP-laitos

Sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitos (Combined Heat and Power).

Eroosio

Kiintoaineen irtoamista ja liikkumista niiden alkuperäisestä ympäristöstä fyysikaalisten voimien, kuten virtaavan nesteen tai tuulen, takia.

Hygienisointi

Hygienisoinnilla poistetaan taudinaiheuttajia ja rikkakasvien siemeniä. Hygienisointikäsittelyssä raaka-aine on 70 °C:ssa 60 minuutin ajan.

Inhibitio (kemialla)

Inhibiittorit rajoittavat katalyyttistä reaktiota myrkyttämällä tai viemällä vapaita radikaaleja ketjureaktiosta.

Kerrostuma

Pohjalle tai seinämille kerääntynyt kuiva-aines, joka ei enää liiku virtauksen voimasta.

Koheesio

Aineen sisäiset voimat, jotka vastustavat sitä rikkovia ulkoisia voimia ja pitää aineen kasassa.

Kuivamädätys

Mädätysmuoto, jossa syötteestä 20–40 % on kuiva-ainesta.

Laminaarinen virtaus

Viskoosinen virtaus, jossa partikkelit liikkuvat omissa kerroksissaan sekoittumatta keskenään.

Mesofiilinen

Matalalämpöinen mädätysprosessi, jossa lämpötila on 50–55 °C.

Mädätys

Biologisen aineen hajottaminen hapettomassa ympäristössä biokaasuksi.

Reynoldsin luku (Re)

Dimensioton luku, jota käytetään virtausmekaniikassa kuvaamaan virtauksen tyyppiä.

Sedimentti

Kerrostuva kuiva-aines, joka on kulkeutunut paikalle virtauksen voimasta.

Stokesin laki

Laki ennustaa pallonmuotoiseen kappaleeseen aiheutuvan kitkallisen voiman sen kulkiessa viskoosisessa väliaineessa.

Substraatti

Aine, johon vaikuttaa katalyyttinen toiminta.

Suspensio

Hienojakoisesti sekoittunut heterogeeninen eli sekakoosteinen seos.

Syöte

Biokaasureaktorin sisälle laitettava aines, josta tuotetaan biokaasua.

Turbulenttinen virtaus

Pyörteinen ja epäsäännöllinen virtaus. Kun Reynoldsin luku nousee, laminaarinen virtaus muuttuu turbulenttiseksi.

Termofiilinen

Korkealämpöinen mädätysprosessi, jossa lämpötila on 50–55 °C.

Viskositeetti

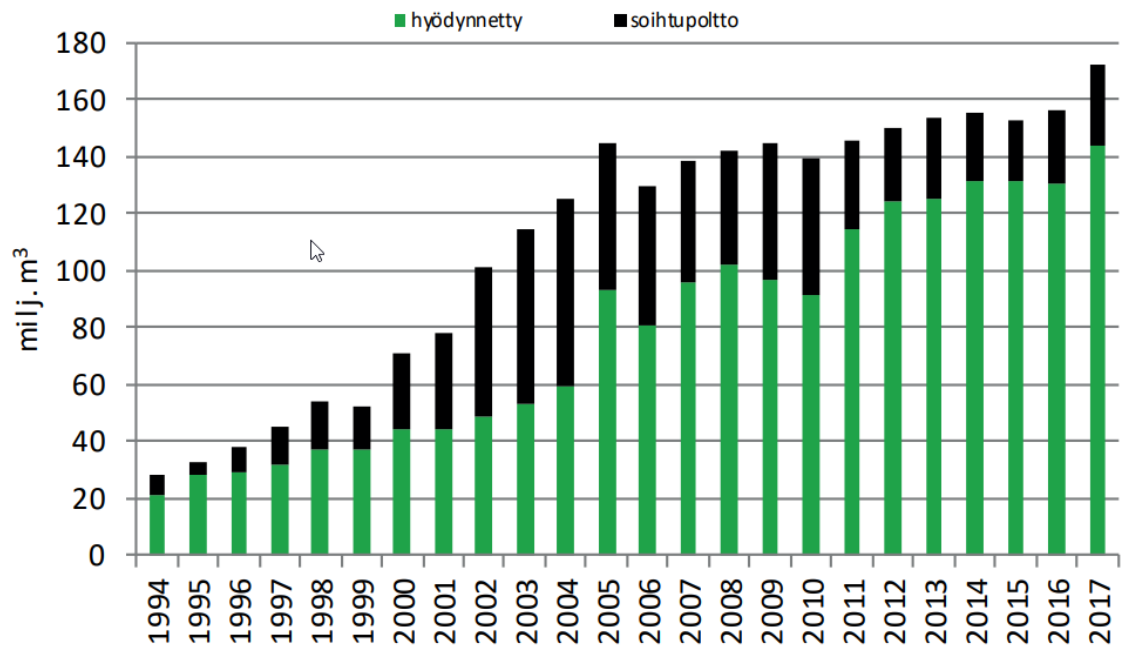
Suure, joka kuvaa nesteen tai kaasun juoksevuutta eli kykyä vastustaa virtausta.

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta

Suomella on pitkän aikavälin tavoitteena päästä hiilineutraaliksi yhteiskunnaksi. Vuoteen 2030 tähtäävän kansallisen energia- ja ilmastostrategianmukaisesti Suomen tavoitteena on nostaa uusiutuvien energialähteiden käyttö yli 50 prosenttiin 2020-luvulla. Samassa strategiassa on myös ilmoitettu, että tavoitteena on saada vähintään 50 000 kaasulla toimivaa autoa sekä nostaa energiaomavaraisuus 55 prosenttiin. Yksi tapa tukea tätä on lisätä biopolttoaineiden tuotantoa rakentamalla uusia biokaasulaitoksia. Lisäksi biokaasun tuotannon lisäys luo lisää työpaikkoja ja kasvattaa energiaomavaraisuutta näin vähentäen riippuvuutta energiantuonnista. (COM (2016)/767 final – 2016/0382(COD); Valtioneuvoston selonteko kansallisesta... 2017, 11, 59.)

Opinnäytetyö on ajankohtainen lisääntyvän biokaasuntuotannon takia. Vuonna 2017 biokaasua tuotettiin Suomessa 172,2 miljoonaa m³, joka on melkein 10 % enemmän kuin vuonna 2016 (ks. kuvio 1). Kuvioista 1 näkee myös, että yli 20 miljoonaa kuutiometriä biokaasua tuhlatiin soih tupoltolla. (Huttunen, Kuittinen & Lampinen 2018, 8.)



Kuvio 1. Biokaasun tuotanto ja hyödyntäminen Suomessa vuosina 1994–2017 (Huttunen ym. 2018, 8)

Biokaasun talteenotolla ja hyötykäytöllä on merkittävästi hyviä puolia. Metaani on noin 21 kertaa hiilidioksidia voimakkaampi kasvihuonekaasu, joten sen talteen otolla voidaan vähentää merkittävästi kasvihuonekaasujen päästöjä (Latvala 2009, 59). Biokaasuntuotanto katsotaan kestäväksi vaihtoehdoksi tuottaa energiaa, koska sen raaka-aineet ovat luonnollisia ja uusiutuvia (Evans 2018). Biokaasulla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita ja näin edistää vähähiiliseen talouteen siirtymistä sekä hidastaa ilmastonmuutosta. Elinkaaritarkasteluissa biokaasusta jalostetun biometaanin on huomattu olevan energiataseeltaan ja kasvihuonepäästöiltään paras biopolttoaine useiden tutkimusten mukaan. Myös hiukkaspäästöt ovat huomattavan pienet verrattuna perinteisiin polttoaineisiin (Kinnunen & Rintala 2015, 17). Lisäksi tuottamalla biokaasua saadaan vähennettyä lannan ja muiden biohajoavien jätteiden aiheuttamia hajuhaittoja (Alakangas, Hurskainen, Laatikainen-Luntama & Korhonen 2016, 189).

Sedimentaatioon hallinnalle on syntynyt tarve, kun suuren kokoluokan kuivamädättämöt ovat alkaneet yleistyä. Kuivamädättämön syöte sisältää suuren määrän kuiva-ainesta. Kuiva-aine aiheuttaa erilaisia ongelmia laskeutuessaan reaktorin pohjalle tai

kertyessään kiinni esimerkiksi lämmityspattereihin. Sedimentoitumista esiintyy erityisesti kohdissa, joihin sekoitinakselit eivät ylety. Myös muita syötteen laadun ongelmia on havaittu, kuten pinnalle kellumaan jäävä kevyt aines (esimerkiksi muovi).

Sedimentaation hallinnalla tehdään biokaasun tuotannosta entistä kannattavampaa. Lämmityspattereihin kertyneenä kerrostumat toimivat eristeenä ja lisäävät lämmitystarvetta reaktoriin, mikä lisää tuotantokustannuksia. Kerrostumat reaktorin pohjalla voivat kovettuessaan vahingoittaa reaktorin sekoittimia ja vievät tilavuutta biokaasuntuotannolta. Sedimentaation hallinnalla myös vähennetään kunnossapitokustannuksia, kun reaktoria ei tarvitse tyhjentää ja avata niin usein, eikä tuotanto keskeydy. Sekoittimien toimimattomuus taas johtaa siihen, että kaikki biokaasu ei pääse vapautumaan kaasutilaan, mikä voi aiheuttaa lietteen paisumista ja johtaa reaktorin vaurioihin.

1.2 Työn tavoite ja rajaus

Opinnäytetyön tavoitteena oli vaakamallisen biokaasureaktorin perusrakenteen esittely ja sedimentoitumisen ongelmakohtien paikantaminen. Kyseessä on tulppavirtausta käyttävä kuivaprosessimädättämö. Tarkoitus oli perehtyä kyseisen biokaasureaktorin rakenteeseen ja pohtia kuinka sedimentoitumista voitaisiin minimoida. Tavoitteena oli edistää biokaasulaitosten suunnittelua ja työn tuloksena pyrittiin saamaan useampia konseptitason suunnitelmia siitä, kuinka rakennetta voitaisiin jalostaa erityisesti sedimentoitumisen hallinnan kannalta. Reaktorin rakenteen esittelyssä ja suunnittelussa hyödynnettiin Vertex G4 Plant -suunnitteluohjelmaa.

Koska tavoitteena oli reaktorin perusrakenteen konseptitasoinen esittely, ei tässä työssä otettu huomioon rakenteen lujuusominaisuuksia. Rakenteista ja ratkaisuista ei tehty numeerisia kustannusarvioita.

Sedimentin muodostumiseen ja teoriaan keskityttiin vain niiltä osin, kuin ne liittyvät biokaasuntuotantoon reaktorissa. Sedimentoitumisen ehkäisyyn ja hallintaan pyrit-

tiin pääasiassa keskittymään rakenteellisilla ratkaisuilla, mutta tutkittiin myös pintapuolisesti sitä edistäviä ja ehkäiseviä tekijöitä syötteen ominaisuuksien kannalta. Syötteen laadulla on vaikutusta myös vaahtoamiseen ja pintalietekerroksen muodostumiseen, mutta nekin jätettiin rajauksen ulkopuolelle.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja toteutus

Koska opinnäytetyössä pyrittiin muutokseen, oli se kehittämistutkimus. Työssä käytettiin laadullista eli kvalitatiivista tutkimusotetta. Kehittämistutkimusta ei yleensä pidetä omana tutkimusmenetelmänä, koska se koostuu useista eri tutkimusmenetelmistä. Kehittämistutkimuksessa käytettäviä tutkimusmenetelmiä valitaan kehittämiskohteen ja tutkimusongelman mukaisesti. (Kananen 2015, 33, 40.)

Opinnäytetyö on syklinen prosessi, joka lähtee liikkeelle ongelman tunnistamisesta, joka tässä työssä oli sedimentoituminen biokaasureaktorissa. Tutkimusongelmaa varten tulee ymmärtää kokonaisuus, johon tutkittava ongelma liittyy. Ongelma on helppompi ymmärtää, kun se on osa laajempaa kontekstia. Muuttamalla ongelma tutkimuskysymyksi, on ongelma helpompi ymmärtää ja siihen on helpompi löytää vastaukset. (Kananen 2015, 11–12, 24.)

Tärkeimmiksi tutkimuskysymyksiä osoittautuivat tässä opinnäytetyössä seuraavat:

- Mitkä ovat sedimentoitumisen ongelmakohdat vaakamallisessa biokaasureaktorissa?
- Mitä ovat sedimentoitumisen hallintakeinot?
- Millä rakenteellisilla ratkaisuilla voidaan vaikuttaa sedimentoitumisen minimointiin?
- Millaisilla syötteen ominaisuuksilla on vaikutusta sedimentoitumiseen?

Tavoitteena ei ollut ratkaista ongelmaa käytännössä, vaan luoda kuvaus ja ratkaisu siitä. Sedimentoitumista ja sen hallintaa ei voitu arvioida numeerisesti tässä työssä, vaan arviointi perustui pohdintoihin ja päättelyihin. Tästä syystä opinnäytetyön teke-

miseen käytettiin laadullista eli kvalitatiivista tutkimusotetta. Tutkimuksen tekee kvalitatiiviseksi myös se, että aineisto perustuu lähinnä avoimiin kysymyksiin ja haastatteluihin. Koska ongelmasta oli vaikea esittää täsmällisiä kysymyksiä, tuki myös se kvalitatiivisen tutkimusotteen valintaa. Jos ongelmasta voitaisiin esittää tarkkoja kysymyksiä, tarkoittaisi se, että ongelma tunnetaan ja tutkimuksesta tulisi kvantitatiivinen. (Kananen 2015, 33–34; Kananen 2017, 33.)

Aineistoon kuului primääri- ja sekundääriaineistoa. Primääriaineisto koostui lähinnä tutkimusta varten tehdyistä avoimista haastatteluista ja sekundääriaineistoon lukeutui aiheesta julkaistu kirjallisuus ja muut tiedotteet (Kananen 2015, 77). Haastateltavia olivat biokaasureaktoriin parissa työskentelevät asiantuntijat. Lisäksi aineistoa saatiin Elomaticin sisäisistä lähteistä. Asiantuntijoilta tiedusteltiin, millaiset ratkaisut ovat toimineet hyvin biokaasureaktorin rakenteissa ja mitkä vaativat jatkokehitystä.

Arviointi perustuu pitkälti päätelmiin, jotka tehtiin aiheesta julkaistun tiedon ja haastateltujen henkilöiden kokemusten perusteella. Laadullisessa tutkimuksessa on tyyppillistä esittää ilmiö kuvilla ja kuvailevalla tekstillä, kuten myös tässä opinnäytetyössä. Päätelmät olivat induktiivisia. Induktiivisella tarkoitetaan, että edetään yksittäisistä havainnoista tuloksiin. Arviointiin käytettiin myös benchmarking eli vertailukehittäminen -menetelmää. Benchmarking-menetelmällä oli tarkoitus vertailla toisen vaakamallisen reaktorin rakennetta ja sedimentoitumisen ongelmakohtia opinnäytetyön reaktoriin Internetistä löytyvän tiedon pohjalta. (Kananen 2017, 36.)

1.4 Elomatic Oy

Toimeksiantajana tässä opinnäytetyössä toimi Elomatic Oy. Elomatic on yksityisomistuksessa oleva konsultti- ja insinööritoimisto. Yrityksen perusti Ari Elo vuonna 1970 Turussa, ja nykyään hän toimii yrityksen hallituksen jäsenenä. Elomaticin toiminta alkoi laivateollisuudesta. Yritys on sittemmin laajentanut toimintaansa muun muassa paperiteollisuuteen, bio- ja lääketeollisuuteen sekä elintarviketeollisuuteen. 80-luvulla Elomatic kehitti 3D-suunnitteluohjelmiston, joka nykyään tunnetaan nimellä Cadmatic. Cadmatic on nykyään paljon käytössä myös kilpailevilla toimijoilla laiva- ja

tehdasteollisuudessa. Muita Elomaticin omia konsepteja ovat Caligo-savukaasupururit ja keinotekoisten nostojärjestelmien suihkupumppuratkaisut öljy- ja kaasuteollisuuden tarpeisiin. (Meidän tarinamme n.d.)

Elomaticin liikevaihto oli 81 miljoonaa euroa vuonna 2018. Elomaticilla työskenteli noin 950 henkilöä vuoden 2019 alussa. Päätoimipaikat sijaitsevat Suomessa. Toimistoja on Turussa, Helsingissä, Jyväskylässä, Tampereella, Porissa ja Oulussa. Suomen lisäksi toimistoja on myös ulkomailla. Opinnäytetyö tehtiin Elomaticin Boiler and Power Plant –ryhmässä, joka toimii Jyväskylän toimistolla. Jyväskylän toimipisteellä työskentelee yli 200 henkilöä. (Elomaticin liikevaihto nousi yli 81 miljoonaan euroon 2019; Elomatic lyhyesti n.d.)

2 Biokaasu

2.1 Tuotanto ja koostumus

Biokaasua muodostuu hapettomissa eli anaerobisissa olosuhteissa erilaisten mikrobien hajottaessa orgaanista ainesta. Jos happea on läsnä, prosessi muuttuu kompostoinniksi eikä biokaasua muodostu (Biokaasun tuotanto maatilalla 2013, 3). Teollisesti tuotetun biokaasun lisäksi biokaasua muodostuu myös luonnossa soissa ja järvien pohjamudissa. Myös kaatopaikat ja märehitijöiden vatsat tuottavat biokaasua. (Kymäläinen 2015, 59–60.)

Biokaasu koostuu normaalisti 55–75 % metaanista ja 30–45 % hiilidioksidista. Taulukosta 1 voi vertailla tuotetun biokaasun koostumusta Venäjältä tuotuun maakaasuun. Biokaasu voi sisältää pienissä määrin myös typpeä, rikkivetyä sekä kloori- ja fluoriyhdisteitä. Määriin vaikuttavat tuotantotavat ja raaka-aineet. Lämpöarvo biokaasulla on 4–6 kWh/m³. (Alakangas ym. 2016, 189.)

Taulukko 1. Biokaasun tyypillisiä koostumuksia Suomessa (Kutuniva 2012, 36)

Komponentti	Biokaasulaitos	Biokaasu Jätevedenpuhdistamo	Kaatopaikka	Maakaasu (Venäjä)
CH ₄ (%)	60 - 70	55 - 65	45 - 55	98
CO ₂ (%)	30 - 40	35 - 45	30 - 40	0,1
N ₂ (%)	< 1	< 1	5 - 15	0,9
Rikkivedyt (%)	10 - 2000	10 - 40	50 - 300	Ei mainittu

(CH₄ = metaani, CO₂ = hiilidioksidi ja N₂ = typpi)

Suoraan reaktoreista saatuna biokaasua ei voi juurikaan sellaisenaan käyttää. Hätäta-pauksissa raaka biokaasu voidaan kuitenkin polttaa, minkä takia laitoksissa onkin soih tupolttimet (Lampinen & Rautio 2015, 126). Raaka biokaasu tulee ensin puhdis-taa. Raaka biokaasu sisältää mekaanisia osia vaurioittavia ja haitallisia päästöjä muo-dostavia ainesosia. Tosin lämpölaitekäytössä kaasulle ei juuri vedenerotuksen lisäksi muita puhdistustoimenpiteitä tehdä. Biokaasulaitoksissa on yleensä lämmityskattila, jossa tuotettua raakakaasua poltetaan. Tällä saadaan tarvittava lämpöenergia laitok-sen lämmitykseen sekä prosessin tarpeisiin. (Latvala 2009, 41–43.)

Biokaasua voidaan hyödyntää lämmön- ja sähköntuotannossa CHP-laitoksissa. Bio-kaasusta saadaan liikennepolttoaineeksi kelpaavaa biometaania jalostuksella. Jalos-tuksella saadaan nostettua biokaasun metaanitasoa ja poistettua hiilidioksidia ja muita epäpuhtauksia. Jalostuksella metaanin taso nostetaan 95–98 %: iin. Biome-taani voidaan myös injektoida kaasuverkkoon, koska se ei juurikaan eroa kaasuverk-koon siirrettävästä kaasusta (Kinnunen & Rintala 2015, 17–18). Prosessissa synty-nyttä hiilidioksidia voidaan taas hyödyntää esimerkiksi kasvihuoneissa, mutta Martti-sen ja Maarasen (2015, 11) mukaan sen hyötykäyttö on vielä vähäistä taloudellisista syistä. Mädätyksen jälkeen jäävää orgaanista mädätysjäännöstä voidaan hyödyntää lannoite ja maanparannusaineena (Kinnunen & Rintala 2015, 18).

Mädätysjäännös koostuu lähinnä hajoamattomasta materiaalista ja prosessissa muo-dostuneesta mikrobibiomassasta. Biokaasutuksen jälkeen lietteen ravinteet ovat no-

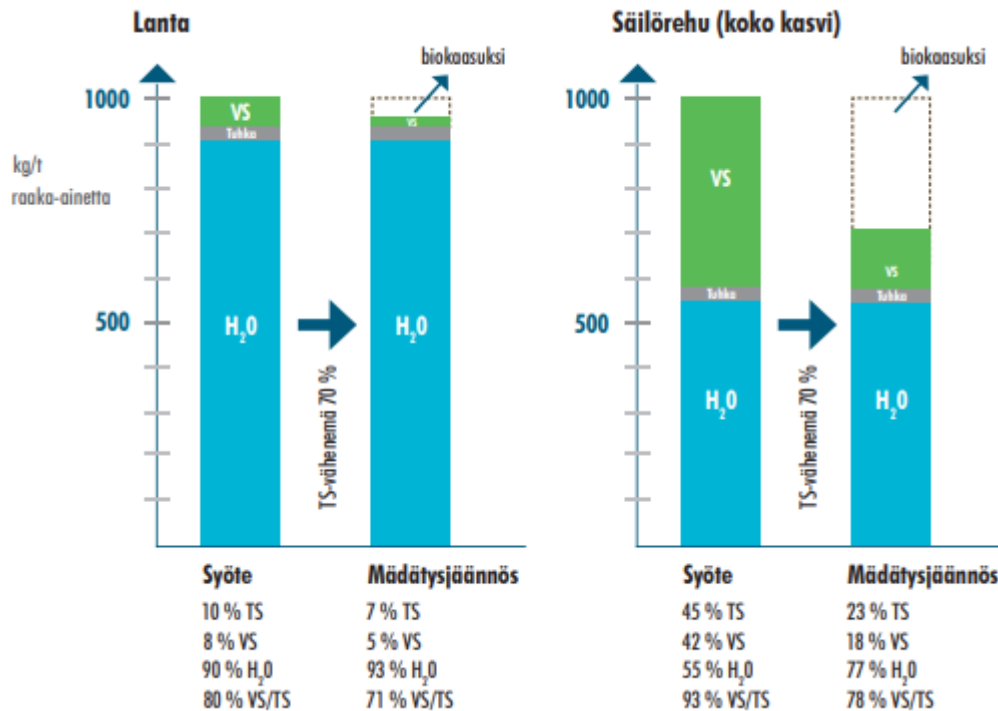
peammin ja helpommin liukenevassa muodossa. Mädätysjäännöstä voidaankin käyttää yleensä lannoitteena, mikä lisää biokaasun tuotannon kannattavuutta korvaamalla epäorgaanisia lannoitteita ja parantamalla ravinteiden kierrätystä. Jalostamalla mädätysjäännöksestä voidaan saada vieläkin parempi lannoite. Mädätysjäännöstä voidaan hyödyntää myös maanparannusaineena. (Kinnunen & Rintala 2015, 18.)

Haastatteluissa selvisi, että Elomaticin asiakkaan laitoksissa mädätysjäännöksestä erotetaan neste puristamalla erillisellä separaattorilla. Märkäjäännöksen kuiva-ainepitoisuus vaikuttaa sen loppukäyttömahdollisuuksiin. Vedenpuhdistamot ottavat vastaan vain tiukan kuiva-ainerajan alittavat lietteet.

2.2 Raaka-aine

Biokaasun materiaaliksi eli substraatiksi kelpaa lähes kaikki orgaaninen aines. Puu tosin on sellaisenaan huono raaka-aine, koska se sisältää paljon vaikeasti hajoavia osia. Helposti hajoavia aineita ovat proteiinit, rasvat ja hiilihydraatit, joita parhaat raaka-aineet sisältävät. Parhaimmat raaka-aineet tulevat biomassan käsittelyn sivuvirroista ja jätteistä. Esimerkiksi maatilojen jätteet ja sivutuotteet, kuten lanta ja kasvintuotannon sivutuotteet, ovat parhaimpia raaka-aineita. Raaka-aineen valinnassa ja hallinnassa tulee kiinnittää huomiota myös inhibitiota aiheuttaviin ja toksisiin aineisiin. Inhibitiolla tarkoitetaan tässä tapauksessa katalyyttisen reaktion rajoittumista inhibiittoreiden vaikutuksesta. Inhibiittorit joko myrkyttävät tai vievät vapaita radikaaleja ketjureaktiosta. (Daintith & Martin 2010, 421; Kymäläinen & Luostarinen 2015, 21–22.)

Raaka-aine sisältää kuiva-ainetta (TS, total solids) ja vettä. Kuiva-aine sisältää hajoavan orgaanisen aineen (VS, volatile solids) lisäksi epäorgaanista ainetta ja vettä. Epäorgaaninen aines on sama asia kuin tuhka. Biokaasun muodostuessa kuiva-aineen määrä vähenee (ks. kuvio 2). (Kymäläinen & Luostarinen 2015, 23–24.)



Kuvio 2. Koostumus- ja massavertailuesimerkki raaka-aineen hajoamisesta biokaasuksi (Kymäläinen & Luostarinen 2015, 24)

Syöte vaatii usein hygienisoinnin ennen reaktoria tai sen jälkeen. Hygienisointi voi tapahtua jatkuva- tai panostoimisena. Kuivamädätyksessä paljon käytetty yhdyskuntien biojäte sisältää eläinperäisiä aineita, joita koskee niin sanottu sivutuoteasetus (EY asetus 1069/2009 ja 142/2011) (Kymäläinen & Luostarinen 2015, 41). Asetus määrittää eläinperäisille sivutuotteille hygienisointikäsitteilyn. Hygienisoinnin tarkoitus on poistaa taudin aiheuttajia ja rikkakasvien siemeniä. Hygienisointi käsittelyssä raaka-aine on 60 minuuttia 70 °C:ssa. (Latvala 2009, 16–17.)

2.3 Tuotantoprosessi

Biokaasun tuotantoprosessin hallinnan edellytyksenä on anaerobisen hajoamisprosessin ymmärtäminen (Kymäläinen 2015, 59). Tuotantoprosessia voidaan anaerobisen käsittelyn lisäksi kutsua biometanoinniksi, biokaasutukseksi tai mädättämiseksi (Alakangas ym. 2016, 190). Prosessi vaatii tietyt olosuhteet toimiakseen tasapainoi-

sesti ja tehokkaasti. Olosuhteisiin vaikuttavat muun muassa pH, hapettomuus ja lämpötila. Yksi merkittävimmistä näistä on lämpötila ja sen perusteella prosessit jaetaankin mesofiilisiin ja termofiilisiin. (Kymäläinen 2015, 63.)

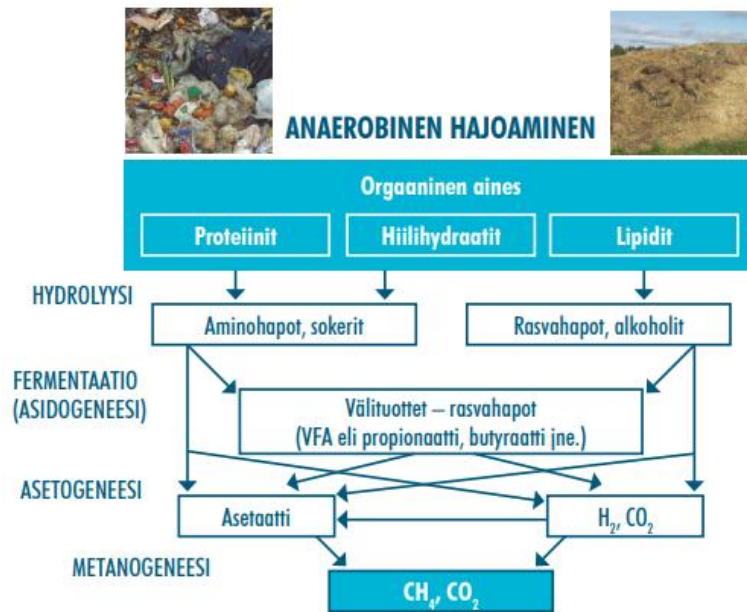
Biokaasuprosessi voi olla jatkuva- tai panostoiminen. Jatkuvatoimisessa prosessissa syötettä lisätään ja mädätysjäännöstä poistetaan reaktorista jatkuvasti tai tietyin säännöllisin väliajoin. Tällöin myös biokaasuntuotanto on jatkuvaa ja tasaista. Panosperiaatteellisessa prosessissa syötemateriaali laitetaan reaktoriin kerta-annoksena ja suljetaan, kunnes reaktori tyhjennetään. (Luostarinen 2015, 83, 87.)

Tuotanto koostuu eri osaprosesseista, joihin on tarjolla erilaisia tekniikoita. Tekniikat voidaan jaotella kuiva-ainepitoisuuden mukaan märkä- tai kuivaprosessiksi, syöttötavan mukaan panos- tai jatkuvasyötteiseksi sekä vaiheisuuden perusteella yleensä yksi- tai kaksivaiheiseksi. Tekniikan valintaan vaikuttavat saatavilla olevien syötteiden ja halutun mädätysjäännöksen laatu sekä haluttu energiantuotto. (Luostarinen 2015, 82.)

Hajottaminen tapahtuu eri vaiheissa toisistaan riippuvaisten erilaisten mikro-organismien toimesta. Seuraavan vaiheen mikrobit käyttävät edellisen vaiheen hajoamistuotetta. Prosessia voivat häiritä merkittävät olosuhde- ja syötevaihtelut. Tämä tarkoittaa, että ulkoisten ja ravitsemuksellisten olosuhteiden tulee olla kunnossa ja kaikille sopivat, jotta välituotteita ei pääse kertymään ja aiheuttamaan inhibitioita. (Kymäläinen 2015, 60.)

Hydrolyysi, fermentaatio (asidogeneesi), asetogeneesi ja metanogeneesi ovat anaerobisen hajoamisen neljä eri vaihetta (ks. kuvio 3). Ensimmäisessä vaiheessa, hydrolyysissä, suuret orgaaniset molekyylit pilkkoutuvat osakseen ja liukenevat. Näitä ovat rasvat, proteiinit ja hiilihdyraatit. Mikrobisoluille nämä ovat liian suuria, joten ne tuottavat ja välittävät solun ulkopuolelle entsyymejä pilkkomiseen. Fermentaatiossa eli hajoamisen toisessa vaiheessa, mikrobit tuottavat erilaisia orgaanisia happoja ja alkoholia. Myös hiilidioksidia, ammoniakkia ja vetyä muodostuu toisessa vaiheessa. Tuotekoostumukseen vaikuttavat syötteet, olosuhteet ja mikrobipopulaation koostu-

mus. Fermentaatioissa työskentelee osittain samat mikrobit kuin hydrolyysissä. Asetogeenisissä tuotetaan metaanin tuotannon raaka-aineet fermentaatio-vaiheen lopputuotteista. Metaanin tuotannon raaka-aineita ovat: vety, hiilidioksidi ja asetaatti. Näistä asetogeenin lopputuotteista metanogeenit tuottavat viimeisessä vaiheessa, metanogeenisissä, metaania ja hiilidioksidia. Asetogeenisetbakteerit toimivat symbioosissa metaania tuottavien metanogeenien kanssa. (Kymäläinen 2015, 61–63.)



Kuvio 3. Orgaanisen aineen vaiheittainen hajoaminen biokaasuksi (Kymäläinen 2015, 60)

2.3.1 Märkä- ja kuivaprosessi

Kuiva-ainepitoisuus on märkä- ja kuivaprosessien selkein ero. Märkäprosessissa kuiva-ainepitoisuus on alle 15 %. Syötteenä on yleensä lietemäisiä materiaaleja, mutta prosessiin voidaan laittaa myös kuivia materiaaleja, kunhan reaktorin sisällä olevan massan kuiva-ainepitoisuus pysyy alle 15 %. Kuivaprosessissa kuiva-ainepitoisuus on 20–40 %. (Luostarinen 2015, 82–83.)

Märkäprosessin reaktorit ovat lähes poikkeuksetta jatkuvatoimisia ja täyssekoitteisia. Usein reaktori on malliltaan lieriönmuotoinen (ks. kuvio 4). Syötteen vähäisen kuiva-

ainepitoisuuden ansiosta tehokas mekaaninen sekoitus on mahdollista. Sekoittaminen voidaan toteuttaa myös kaasulla tuomalla tuotettua biokaasua pohjaan venttiilien kautta. Märkäprosesseja on niin isossa kuin pienessäkin mittakaavassa. (Luostarinen 2015, 82–84.)



Kuvio 4. Lieriönmuotoinen märkäprosessi (Luostarinen 2015, 85)

Kuivaprosesseja on käytössä vain suurissa laitoksissa, jossa syötemateriaalina on pääosin yhdyskuntien biojätteet. Prosessi voi olla yksi- tai useampi vaiheinen. Lisäämällä prosessiin jälkikaasutusyksikkö eli tekemällä prosessista useampivaiheinen saadaan lisättyä metaanin tuotantoa (Latvala 2009, 32). Reaktorit voivat olla kuivaprosesseissa jatkuvatoimisia tai panosperiaatteella toimivia. Jatkuvatoimiset reaktorit ovat yleensä pitkittäin vaakatasossa tulppavirtausperiaatteella toimivia (ks. kuvio 5). Syöte tulee toisesta päästä sisään ja toisesta ulos. (Luostarinen 2015, 83–86.)



Kuvio 5. Kompogasin vaakamallinen biokaasureaktori (Kutuniva 2012, 53)

Metaanin tuotantoa varten vaadittu tilavuus on pienempi kuivaprosessissa sen runsaamman kuiva-ainepitoisuuden ansiosta (Luostarinen 2015, 83). Tasaisen toiminnan ja mikrobikannan takaamiseksi kuivaprosessissa on yleensä tarpeen kierrättää käsiteltyä materiaalia takaisin reaktoriin (Luostarinen 2015, 86–87). Kuivaprosessin sekoittamiseen ei sovellu samat laitteistot kuin märkäprosessiin sen runsaamman kuiva-ainepitoisuuden takia (Latvala 2009, 32).

2.3.2 Meso- ja termofiilinen prosessi

Biokaasun tuotantoprosessi voidaan jaotella sen lämpötilan mukaan mesofiiliseen eli matalalämpöiseen ja termofiiliseen eli korkealämpöiseen prosessiin. Mesofiilisen prosessin lämpötila on noin 35–43 °C ja termofiilisen 50–55 °C. Merkittävin ero näiden prosessien välillä onkin niiden lämpötila. (Kymäläinen 2015, 63–64.)

Lämpötilan lisäksi eroavaisuuksia on esimerkiksi pH-arvossa, viipymääjassa ja hygienisointi tehokkuudessa. Termofiilisen prosessin pH on tyypillisesti korkeampi kuin mesofiilisen, koska hiilidioksidin liukenevuus heikkenee lämpötilan noustessa (Kymäläinen 2015, 65). Lietteiden viipymääjat reaktorissa voivat olla termofiilisessä muutamia päiviä lyhyempiä kuin mesofiilisessä, koska hajoaminen on nopeampaa korkeammissa lämpötiloissa (Kymäläinen 2015, 74). Myös hygienisoinnin ja täten lannoitekäyttöön halutun mädätysjäätännöksen kannalta, termofiilinen käsittely olisi parempi vaihtoehto (Paavola 2015, 97). Mesofiilinen prosessi on kuitenkin vakaampi eikä

vaadi yhtä paljon lisälämmitystä kuin termofiilinen (Kymäläinen 2015, 69; Latvala 2009, 34).

3 Sedimentoituminen

Sedimentaatioon liittyy olennaisesti käsitteet eroosiosta, kerrostumisesta, sekoittumisesta, kulkeutumisesta ja sedimentin tiivyydestä (Vanoni 2006, 1). Sedimentaatio on nesteessä olevan kuiva-aineen eli sedimentin laskeutumista. Laskeutunut aines muodostaa tiivistettyä lietettä ja selkeyttää nestettä. Yleensä erotus tapahtuu painovoiman avulla, mutta myös keskipakovoimailmiöllä saadaan partikkelit erkanemaan nesteestä. (Daintith & Martin 2010, 737.)

Sedimentillä tarkoitetaan niin epäorgaanisen kuin orgaanisen aineen irtomateriaalia, jota fyysinen voima, kuten aallot, tuuli, virtaukset ja painovoima, voivat liikuttaa. Sedimentti liikkuu yleensä suspensiossa. Suspensiolla tarkoitetaan tasaista seosta. Sedimentti voi suspension lisäksi liikkua rullaamalla ja liukumalla pohjaa tai sedimenttikerrosta pitkin (Vanoni 2006, 11). Sedimentti partikkelien liikkuvuuteen vaikuttaa partikkelien koko, tiheys ja muoto (Vanoni 2006, 6). Väliaineen ominaisuuksilla on myös vaikutusta. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi väliaineen nesteen tiheys, leikkausjännitys, viskositeetti, virtausnopeus ja turbulentsuus. Turbulentti virtaus on energisempi kuin laminaarinen ja täten paremmin eroosiota aiheuttava. (Masselink, Hughes & Knight 2011, 105–113, 117-123.)

3.1 Sedimentin kulkeutuminen ja laskeutuminen

Hyvin pienillä virtausnopeuksilla sedimentti ei liiku. Mitä suurempi virtaus, sen todennäköisemmin partikkelit alkavat liikkua. Tärkein ominaisuus, joka vaikuttaa sedimentin liikkumiseen on sen partikkelin koko. (Vanoni 2006, 11–12.)

Yksinkertaistettuna sedimentaation selittää Stokesin laki (kaava 1). Stokesin laissa liikkuvaan pallomaiseen partikkeliin vaikuttaa pyörteettömässä väliaineessa vastusvoima F_s (Valtanen 2013, 190). Vastusvoimaa varten on olemassa teoreettisia arvoja eri ellipsoideille. Reynoldsin luvun noustessa myös vastuskerroin nousee. Reynoldsin luvulla kuvataan virtauksen tyyppiä. (Daintith & Martin 2010, 715, 737, 787; Vanoni 2006, 15–16.)

(1)

$$F_s = 6\pi\eta r v,$$

jossa

η = väliaineen viskositeetti

r = pallon säde

v = kappaleen nopeus (Valtanen 2013, 190).

Todellisuudessa ilmiö, jolla sedimentoitumista ilmenee, on monimutkaisempi. Partikkelit harvemmin ovat symmetrisiä tai pallomaisia. Vanonin (2006, 20) mukaan on huomattu, että muiden kuin pyöreiden kappaleiden, putoavan epäsuorasti riippuen Reynoldsin luvusta, joka vallitsee niiden vajotessa. Laskeutumisnopeutta eli sedimentoitumisnopeus voidaan kuvata nimellishalkaisijan, muotokerroimen (SF, shape factor) ja Reynoldsin luvun avulla. Kaavassa 2 on esitetty, miten muotokerroin lasketaan ja kaavassa 3 on esitetty Reynoldsin luku. (Vanoni 2006, 11–14.)

(2)

$$SF = \frac{c}{\sqrt{ab}},$$

jossa

a = pisin kohtisuora akseli

b = keskipitkä akseli

c = lyhyin kohtisuora akseli (Vanoni 2006, 14).

(3)

$$Re = \frac{wd}{\nu},$$

jossa

w = laskeutumisnopeus

d = pallon halkaisija

ν = väliaineen kinemaattinen viskositeetti (Vanoni 2006, 14).

Partikkelin laskeutumiseen vaikuttaa myös vastusvoimat, kuten ilmanvastus. Vastuskertoimen (C_D) avulla on annettu Reynoldsin luvun koko alueelle laskeutumisnopeus (kaava 4). Vastuskerroin on Stokesin-alueella, toisin sanoen $Re < 0,1$, on $C_D = 24 / Re$. Suuremmilla Reynoldsin luvuilla vastuskerroin on myös Reynoldsin luvun funktio, mutta sitä ei voi analyttisesti ilmaista. Tämän takia suuren Reynoldsin luvun omaavia kappaleita on tutkittu kokeilla. (Vanoni 2006, 14.)

(4)

$$w^2 = \frac{4}{3} \frac{gd}{C_D} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right),$$

jossa

w = laskeutumisnopeus

g = painovoima

d = pallomaisen kappaleen halkaisija

C_D = (ilman)vastuskerroin

γ_s = pallomaisen kappaleen ominaispaino

γ = nesteen ominaispaino (Vanoni 2006, 14).

Jos nesteessä on vain muutama lähekkäin oleva partikkeli, ne putoavat ryhmänä nopeammin kuin yksin ollessaan. Toisaalta taas, jos partikkelit ovat levittäytyneet tasaisesti nesteeseen, vaikutus viereisiin partikkeleihin aiheuttaa usein laskeutumisuuden laskemista ja näin hidastaen partikkelien laskeutumista. Turbulenttinen virtaus on yksi tärkeimmistä tekijöistä sedimenttien suspensioon. Turbulenttinen tarkoittaa nesteen tai kaasun epäsäännöllistä pyörteellistä virtausta. (Vanoni 2006, 17, 39.)

3.2 Eroosio

Eroosio on kiintoainehiukkasten irrottamista ja liikuttamista niiden alkuperäisestä ympäristöstä (Vanoni 2006, 27). Eroosiossa partikkelien irtoamine tapahtuu virtaavan nesteen aiheuttamista voimista tai toisen objektin aiheuttaman kineettisen voiman aiheuttamana. Partikkelin irrottua, sen täytyy sekoittua virtaukseen kulkeutuakseen. (Vanoni 2006, 1.)

Eroosion kannalta sedimentit voidaan jakaa sidoksisiin ja ei-sidoksisiin. Ei-sidoksisten sedimenttien liikkuvuuteen eroosion voimasta vaikuttaa vain partikkelin koko, muoto ja tiheys. Ei-sidoksisia ovat esimerkiksi hiekka ja sora. Sidoksiseen sedimenttien liikkuvuuteen ja eroosiota vastustaviin voimiin vaikuttaa myös partikkelien keskinäiset koheesiot. Koheesio voima on usein voimakkaampi kuin partikkelien omat voimat. Sidoksisia aineita ovat esimerkiksi savi. (Vanoni 2006, 27.)

4 Sedimentoituminen biokaasureaktorissa

Raskaat materiaalit, kuten hiekka ja muu mädäntymätön materiaali, voivat kerrostua reaktoriin. Suurin osa näistä raskaista materiaaleista voidaan erottaa syötteestä ennen reaktoriin menoa, mutta esimerkiksi hiekka voi olla tiukastikin tarttunut orgaaniseen materiaaliin hankaloittaen sen erotusta. Esimerkiksi eläinten lanta voi sisältää paljon hiekkaa. (Al Seadi, Rutz, Prassl, Köttner, Finsterwalder, Volk & Janssen 2008, 79.)

Elomaticin reaktoritapauksissa syötteet vaihtelevat paljon. Syötteinä on ollut eläinperäisiä materiaaleja, kotitalouksien biojätteitä ja nurmisyötettä. Syötteestä on erotettu lähinnä metallit, mutta hiekka ja muu ylimääräinen aines on mennyt suoraan reaktoriin. Esimerkiksi nurmisyötteelle ei ole tehty sen kummempia puhdistuksia, vaan se on syötetty suoraan ruuvilla reaktoriin sellaisenaan.

4.1 Sedimentoitumisen hallinta

Jos muodostuneita kerrostumia ei poisteta säännöllisesti, sedimenttikerrokset kovettuvat ja niiden poisto onnistuu enää vain raskaalla laitteistolla. Jatkuva kerrostumien poisto voidaan toteuttaa Al Seadin ja muiden (2008, 79) mukaan lattiaharavalla tai lattiakaivolla, mutta he eivät spesifioi erikseen vaakamallisen ja pystymallisen reaktorin sedimentaation hallintaa. Lattiaharavat ja lattiakaivot toimivat paremmin pystymallisissa reaktoreissa. Lisäksi lattiaharavat ovat suhteellisen kevyt tapa ja toimi vain reaktorin ollessa tyhjennettynä. Lattiakaivo ei vaakamallisessa tulppavirtausreaktorissa juurikaan auta sedimentoituneen aineen poistossa suuren tasaisen lattiapinta-alan takia. Jos sedimenttikerros on niin paksu, että poistosysteemi ei enää toimi, joudutaan prosessi keskeyttämään ja poistamaan kerrostumat manuaalisesti tai mekaanisesti riippuen reaktorin koosta.

Al Seadi ja muut (2008, 79) kertovat, että yli 10 metrin korkeissa reaktoreissa staattinen paine katsotaan olevan riittävän suuri poistamaan hiekka, liete ja kalkki. Staattinen paine tuskin kuitenkaan auttaa laajapohjaisessa vaakamallisessa reaktorissa laskeutuvan aineen hallintaan, vaikka korkeutta olisikin riittävästi.

Al Seadin ja muiden mukaan (2008, 79) seuraavat ovat perusmenetelmiä sedimentoitumisen ja sedimentoitumisen aiheuttamien ongelmien minimoinnissa:

- Sopiva sekoitus tapa
- Reaktorin kapasiteetin määrittäminen
- Korkean hiekkapitoisten syötemateriaalien välttäminen
- Hiekan poistomenetelmien kehittäminen

- Hiekan kierron välttäminen oikein mitoitetulla kiertopumppauksella
- Säiliöiden ja varastojen tyhjennys säännöllisesti.

Sopivalla sekoitustavalla tarkoitetaan, että ylläpidetään sopivaa suspensiota ja sopivaa turbulენტtista virtausta ja näin estäen kiintoaineen sedimentoitumista pohjalle. Oikein valittu sekoitustapa ei myöskään vaurioidu syötteestä. Kun reaktorin kapasiteetti on määritetty oikein, ei tule ongelmia liian suuren tai pienen syöte tai kuiva-aine määrän kanssa.

Hiekka ja muu epäorgaaninen aine ovat haitaksi reaktorissa, joten niiden joutumista reaktoriin tulisi välttää. Jos reaktoria ei ole mitoitettu tietylle syötteelle, ei sitä tulisi sinne syöttää. Syöteen puhdistusmenetelmiä tulisi ottaa käyttöön ja kehittää. Hiekkikierron estämiseksi kiertopumppaus tulisi suunnitella oikein. Jos kiertopumppausta ei ole mitoitettu oikein, kierrätetään syöteen sijasta herkästi vain raskasta epäorgaanista ainesta. Ajan mittaan raskasta ainesta on enempi ja enempi, kun se ei pääse poistumaan reaktorista ja pysyy kiertopumppauksen avulla siellä.

Kuten Al Seadi ja muut, myös Pennsylvanian yliopiston julkaisussa todetaan mekaanisen sekoittamisen ja lietteen kierrättämisen pumpuilla oleelliseksi osaksi kiintoaineen laskeutumisen hallintaa. Lisäksi Pennsylvanian yliopiston mukaan lämmityssysteemin oikealla sijoituksella on merkitystä. Strategisesti asetettuina lämmityssysteemi tehostaa lämmityskiertoa ja vähentää sedimentoitumisen ongelmaa. Julkaisu ei kuitenkaan kerro, mikä on optimaalisin sijoitus tapa. (Anaerobic Digestion: Biogas Production and Odor Reduction 2012.)

Hiekka ja muu raskas materiaali alkavat laskeutua jo säilytyksen ja varastoinnin aikana, joten pohjalla oleva syötemateriaali on laadultaan huonompaa kuin pinnalla oleva. Tyhjentämällä varastot säännöllisesti, parannetaan syöteen laadun tasaisuutta ja minimoidaan reaktorin sedimentaatio ongelmaa.

4.2 Syötteen laadun vaikutus

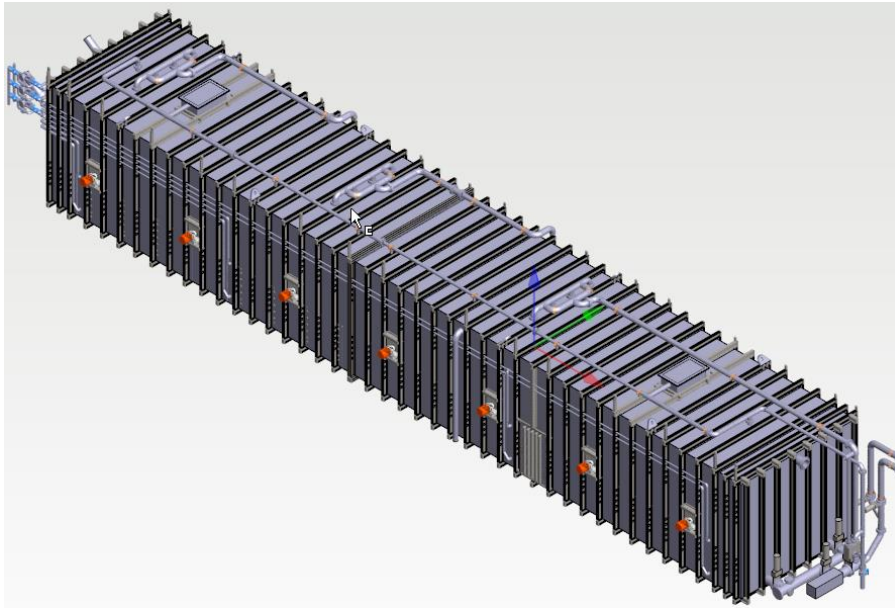
Marttisen ja Maarasen (2005, 7) luomassa biokaasulaitoksen esiselvityksessä sanotaan, että teurasjätteen sisältämä rasva aiheuttaa ongelmia biokaasuntuotannossa. Rasvan korkea pitoisuus aiheuttaa muun muassa liimamaisen aineen muodostumista ja kerrostumia seinämille.

Yhdyskuntajäte voi sisältää monia eri epäpuhtauksia. Epäpuhtauksiksi laskeutuvat esimerkiksi muoviset, metalliset, lasiset ja muut ei-hajoavat pakkausmateriaalit. Nämä aiheuttavat reaktorin lisäksi ongelmia myös putkissa ja pumpuissa tukkeuttamalla niitä. (Al Seadi ym. 2008, 66.)

Elomaticin sisäisestä lähteestä selvisi, että Haminassa on ollut ongelmia muovisten materiaalien kertymisestä syötteen pinnalle. Poistoputket ovat lähes lattiatasossa, jolloin muovia ei ole päästy poistamaan pinnalta.

5 Vaakamallinen biokaasureaktori

Tavallisesti vaakamalliset biokaasureaktorit ovat lieriön muotoisia. Tämän työn kohteena oleva vaakamallinen biokaasureaktori ei kuitenkaan ole lieriömäinen, vaan konttimainen (ks. kuvio 6). Lieriömäisissä reaktoreissa käytetään yhtä sekoitinta, joka kulkee läpi reaktorin syöttöpäästä poistopäähän. Konttimallisessa reaktorissa on monta erillistä sekoitinta. Kuivamädättämöreaktorit kuljetetaan paikalle usein yhtenä tai kahtena kappaleena, mikä rajoittaa sen kokoa. Muodon takia vaakamallisissa reaktoreissa käytetään tulppavirtausta. Materiaalin mahdollisimman hyvä hajoaminen varmistetaan minimi viipymäajoilla reaktorissa. (Al Seadi ym. 2008, 78.)



Kuvio 6. Vaakamallinen biokaasureaktori

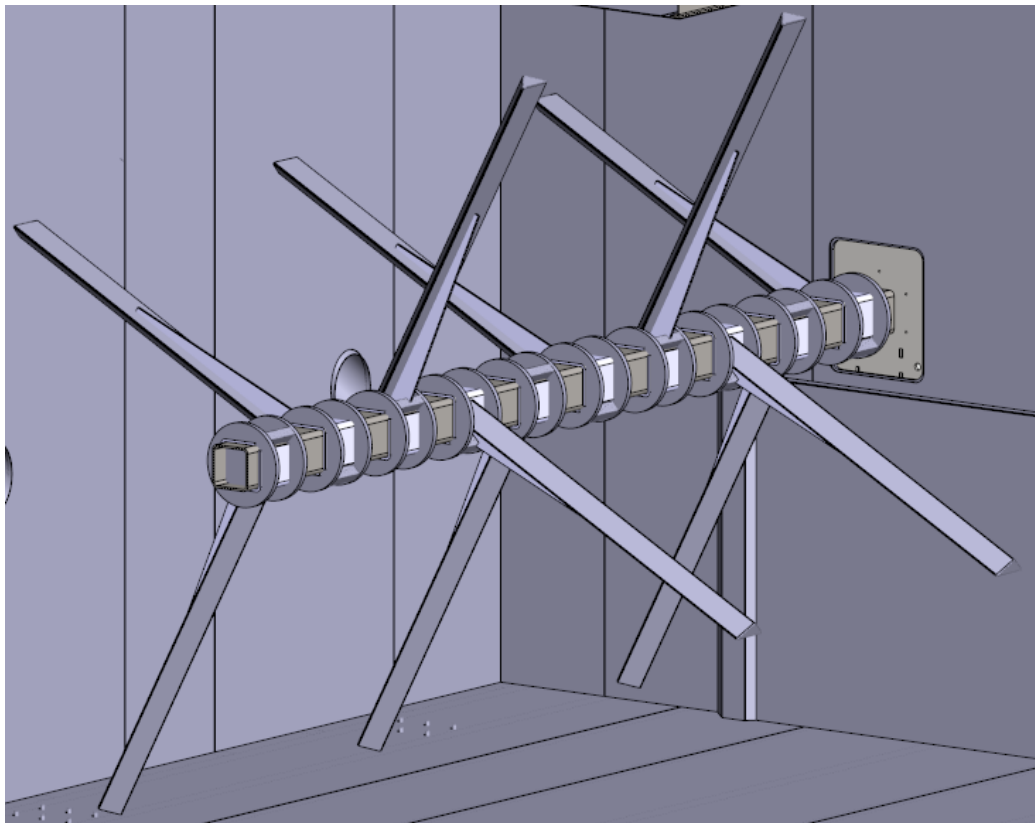
Opinnäytetyön reaktori koostuu elementeistä, mikä mahdollistaa sen helpon kuljetuksen ja kapasiteetin muokkauksen sekoittimien kappalemäärää lisäämällä tai vähentämällä. Liitteessä 1 on esitetty reaktorin perusrakenteeseen kuuluvat komponentit sekä osa rakenteen kehitysideoista. Reaktorin perusrakenteeseen kuuluu siis sekoittimien lisäksi syöttö- ja poistoputket reaktorin päissä, kierto- ja kaasunkeräysputkistot. Myös kaasutilaan yhteydessä oleva varoventtiili on oleellinen osa biokaasureaktoria. Näiden putkistojen lisäksi reaktoriin kuuluu lämmitysjärjestelmä. Pitääkseen lämmön reaktori on vuorattu eristeillä.

5.1 Sekoitus

Sekoituksella tasoitetaan lämpötilaeroja, vapautetaan muodostuvaa biokaasua reaktorin yläosan kaasutilaan ja ylläpidetään mahdollisimman hyvä kontakti mikrobien ja hajotettavan syötteen välillä. Sekoituksella estetään myös pintalietteen ja sedimentin muodostusta. (Luostarinen 2015, 82–84; Al Seadi ym. 2008, 80.)

Biomassa sekoittuu reaktorissa passiivisesti nousevien kaasukuplien, uuden syötteen työntäessä vanhaa ja termisten virtausten voimasta. Vaikka reaktorissa tapahtuu passiivista sekoittumista, tarvitaan optimaalisen mädätyksen saavuttamiseksi hydraulisia, pneumaattisia tai mekaanisia sekoittimia. Noin 90 % biokaasun tuotantolaitoksista käyttää mekaanisia sekoittimia. Sekoitus voi olla jatkuvaa tai jaksottaista. Sekoituskäytöt voidaan optimoida empiirisesti ja mukauttaa laitoskohtaisesti. (Al Seadi ym. 2008, 80.)

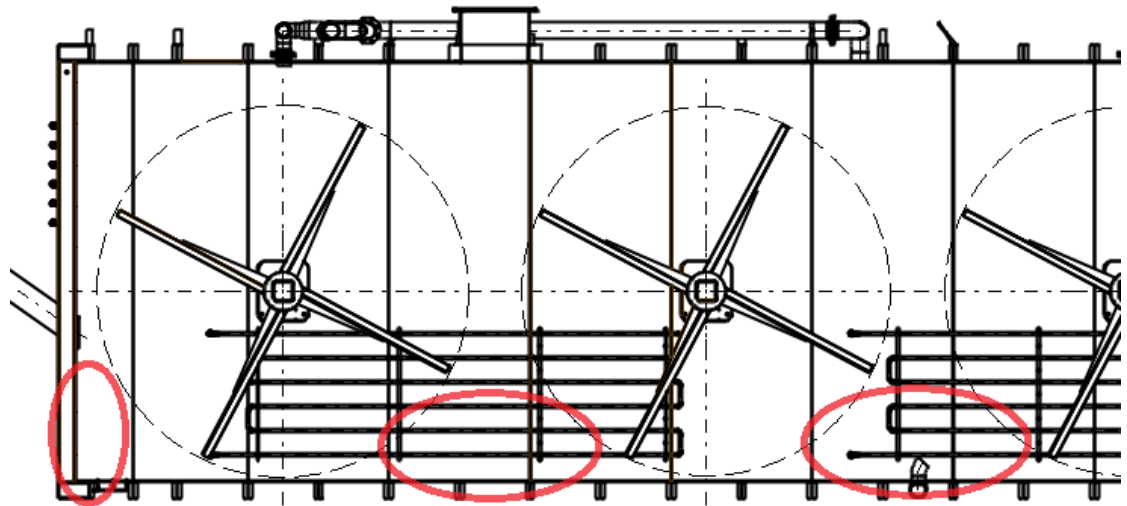
Vaakamallisissa reaktoreissa on yleensä mekaaniset hitaasti pyörivät melasekoittimet (ks. kuvio 7). Sekoittimen melat ovat yleensä horisontaalisella akselilla. Sekoittimet pyörivät lyhyissä jaksoissa usean kerran päivässä työntäen yhdessä uuden syötteen kanssa lietettä eteenpäin. Tätä sanotaan tulppavirtaukseksi. (Al Seadi ym. 2008, 82.)



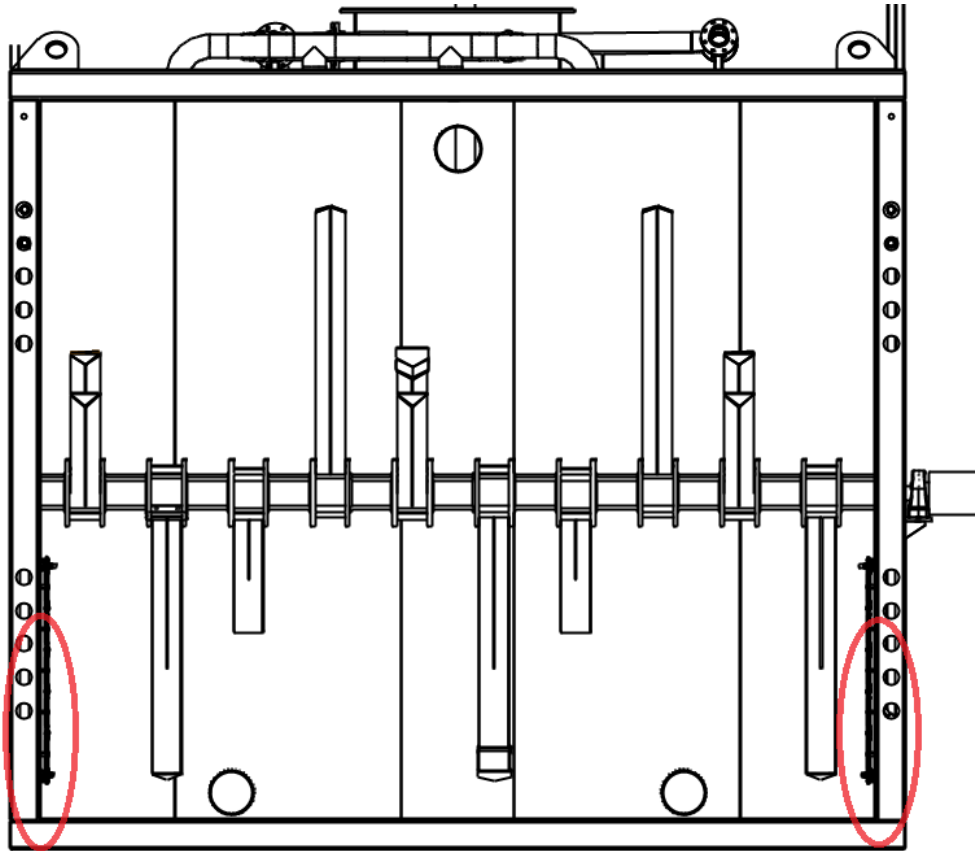
Kuvio 7. Melasekoitin

5.2 Sedimentoitumisen ongelmakohtat

Ongelmakohtina sedimentoitumiselle ovat paikat, joissa massan sekoittuminen on vähäisintä. Näitä ovat kohdat, johon sekoitin ei yllä eli reaktorin nurkat ja päädyt sekä erityisesti sekoittimien väliin jäävät tilat (ks. kuvio 8 ja kuvio 9). Myös lämmityspatterit keräävät itseensä ainesta. Syötteen kiintoainepitoisuus laskee matkalla syöttöpäästä poistopäähän, jolloin sedimentoituminen on runsaampaa reaktorin syöttöpäässä. Syöttöpään sakeamman syötteen takia lämmityksen ja sekoituksen tarve on suurempi syöttöpäässä kuin poistopäässä.



Kuvio 8. Syötettä kerääntyy herkästi sekoittimien väliin ja pätyihin.



Kuvio 9. Syötemateriaalia voi kerääntyä lämmityspattereihin ja sivuille.

5.3 Vertailu muihin reaktorimalleihin

Vertailu kohteena on Thönin ja Kompogasin lieriömäinen vaakamalliset kuivamädättäjäreaktorit. Mädättäjät ovat tulppavirtausreaktoreja, joissa käytetään termofii- listä prosessia. Thönin julkaisussa sanotaan, että heidän patentoidulla melasekoittimellansa ja viipymäajalla taataan tasalaatuinen liete kaarevapohjaisessa mädättä- mössä (ks. kuvio 10). Thönin mukaan tällä mallilla saadaan kontrolloitu tulppavirtaus, jolla ehkäistään sedimentaatiota ja pintalietteen muodostusta. (Thöni 2017.)



Kuvio 10. Thönin kuivamädättämö sisältä (High Solids Anaerobic Digestion from Thöni (TTV) 2015)

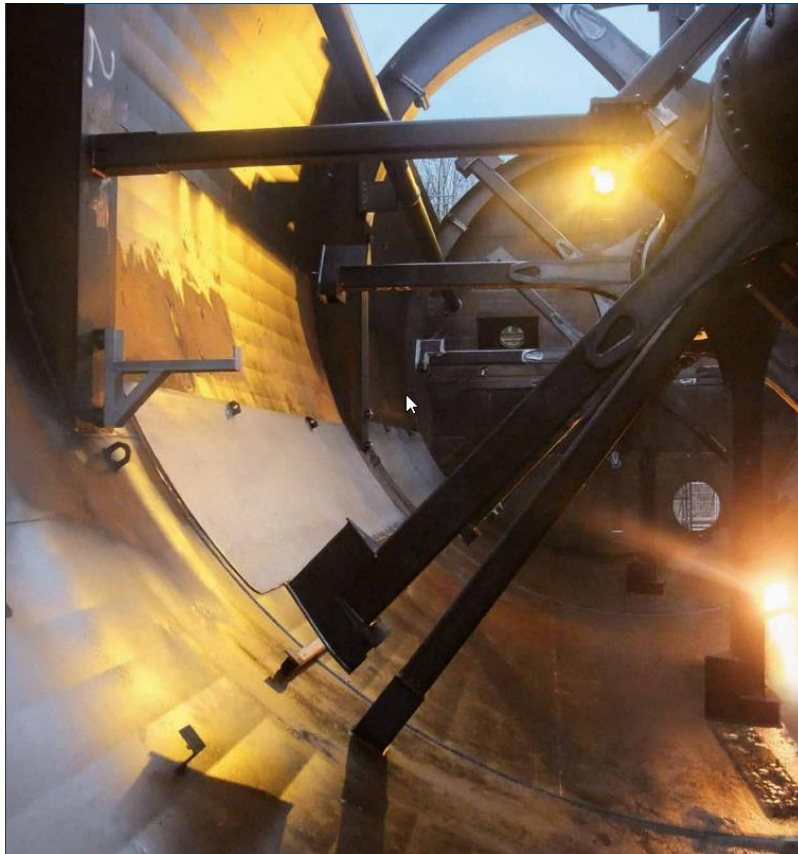
Thönin reaktori on malliltaan lieriön muotoinen ja sekoitin menee pitkittäissuunnassa läpi reaktorin. Thönin reaktorissa sekoitin rajoittaa reaktorin kokoa toisin kuin moduuleina toimitettavat sekoittimet, jolloin reaktorin kokoa voidaan kasvattaa sekoitin kerrallaan.

Haastatteluissa selvisi, että lieriömäinen reaktori on muotonsa ja sekoittimiensa takia kalliimpi valmistaa. Yhdellä pitkällä akselilla oleva sekoitin on raskaampi ja täten hinakkaampi kuin yksittäisinä moduuleina olevat. Yksittäin toimiville sekoittimille voidaan valita sen vaatiman tehon mukaan sopiva moottori. Reaktorin loppupäähän voidaan asentaa pienempi tehoiset sekoittimet, koska tehon tarve on pienempää reaktorin poistopäässä.

Lieriömäisessä reaktorissa on vähemmän rakenteesta johtuvia ongelmakohtia joihin syötteen kiintoainesta voi kerääntyä. Todennäköisesti kuitenkin lieriön pohjaan sekoittimien siipien väliin ja reaktorin tukirakenteiden taakse saattaa kerääntyä pieniä määriä kiintoainesta. Välit sekoittimen melojen välissä ovat kuitenkin suhteellisen

pieniä. Internetlähteiden perusteella on vaikea sanoa, miten lämmitys on lieriönmuotoisissa järjestetty. Haastatellun asiantuntijan mukaan ne ovat reaktorin alapuolella. Verrattuna sisään asennettuihin pattereihin, pohjaan sijoitellut vaativat enemmän tehoa, jotta syöte saadaan sopivan lämpöiseksi.

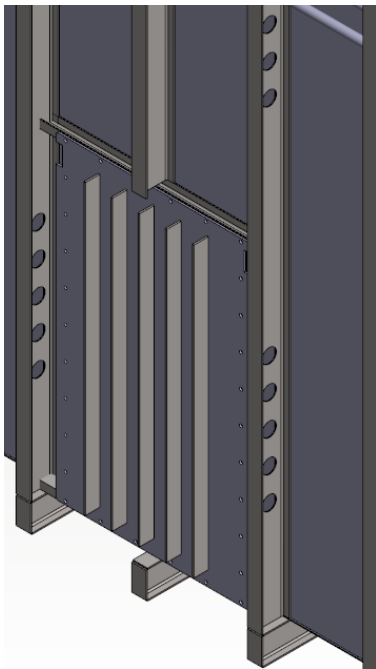
Thönin sekä Kompogasin reaktoreiden sekoittimien meloissa on järeän oloiset päät, kuten aikaisemmin esitetystä kuviosta 10 ja kuviosta 11 voi nähdä. Verrattuna opinnäytetyön kohteena oleviin alkuperäisiin sekoittimen meloihin nähden Kompogasin ja Thönin melat eivät todennäköisesti yhtä helposti pysähdy ja vaurioidu kovettuman sattuessa kohdalle. Muodon takia ne myös kauhaisevat paremmin lietettä pohjasta liikkeelle.



Kuvio 11. Kompogasin melasekoittimet (Kompogas® Plug-Flow Steel Digester in Multiple Sizes n.d.)

6 Tulokset ja johtopäätökset

Sedimentoitumisen hallintaan yksi tärkeimpiä keinoja on reaktorin kunnossapito. Jotta sekoittimet pysyvät ehjänä eikä suuria kerrostumia pääse kertymään, tulisi reaktori tyhjentää huollon yhteydessä 1–2 vuoden välein. Kunnossapidon tarve pitää pystyä arvioimaan reaktorikohtaisesti rakenteen ja syötteen perusteella. Tässä varmasti tapahtuu kehitystä, kun vaakamallisista reaktoreista kertyy käyttökokemuksia pidemmältä ajalta. Reaktoriin kertyneet kerrostumat voitaisiin käydä poistamassa mekaanisesti huoltoluukun (ks. kuvio 12) kautta. Huoltoluukkuun olisi hyvä asentaa patoesteet (ks. kuvio 13), jotta ei luoda lisää ongelmakohtia, johon kiintoainesta voisi kerääntyä. Patoesteet ehkäisisivät myös avaamisen aikaan sattuvia ongelmia. Esimerkiksi, jos reaktoriin onkin jäänyt tavaraa, se ei valu suoraan luukun avaajan päälle. Luukun ja sekoittimien suunnittelussa tulee ottaa huomioon, että sisällä pääsee liikkumaan esimerkiksi pienellä tarkoitukseen soveltuvalla työkoneella, jolla poistaa kerrostumia.

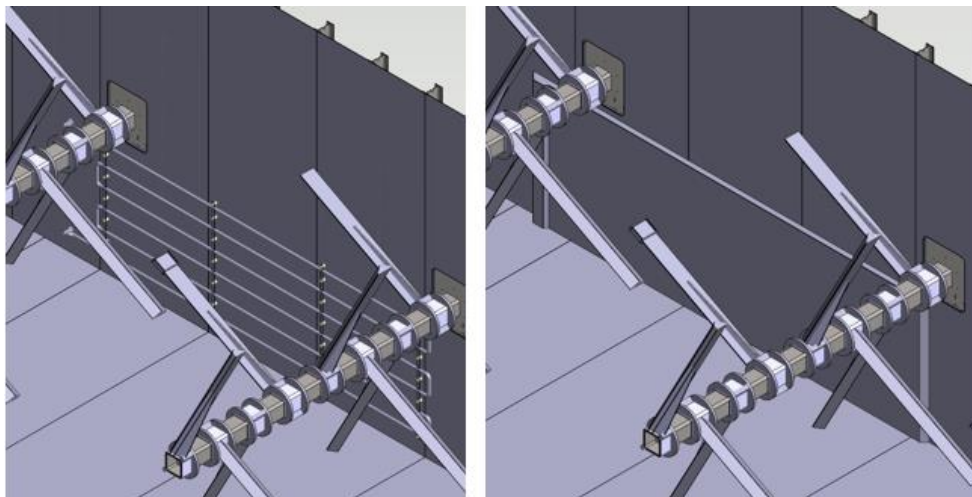


Kuvio 12. Huoltoluukun kautta voidaan käydä poistamassa sedimentoitunutta syötettä.

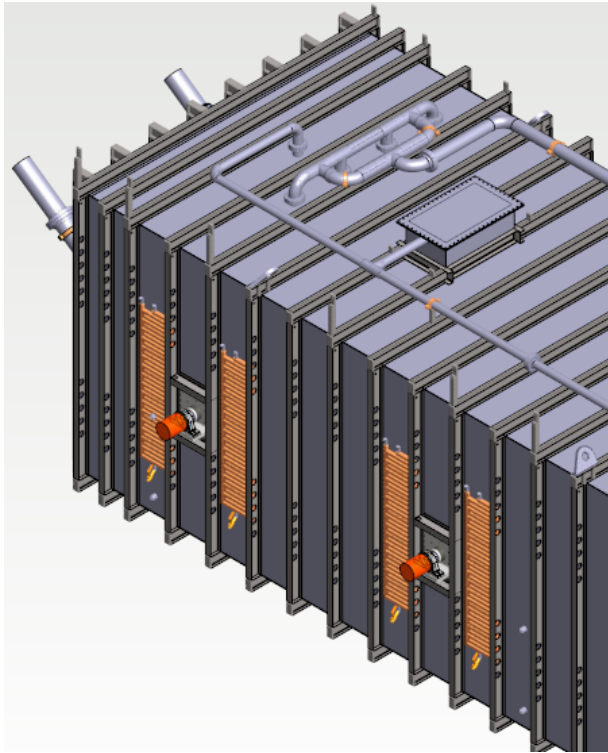


Kuvio 13. Huoltoluukkuun on hyvä asentaa patoesteet.

Patterit voitaisiin koteloida sopivalla levyllä (ks. kuvio 14). Tällöin pinta-ala, johon kertyvää ainesta voisi tarttua pienentyisi. Toinen ratkaisu olisi asentaa lämmityspatterit reaktorin ulkopintaan (ks. kuvio 15). Ulkopintaan ja koteloituina toki lämmönsiirontarve kasvaa, mikä nostaa tuotanto- ja investointikustannuksia.



Kuvio 14. Lämmityspatteri ilman koteloa ja koteloituna



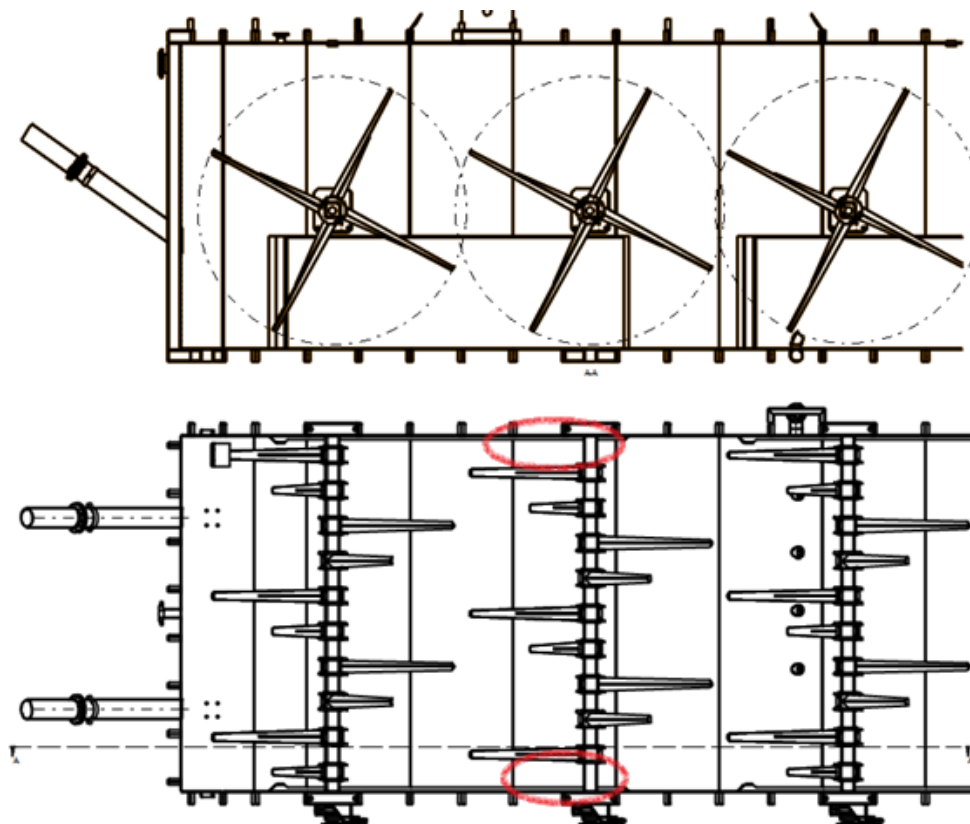
Kuvio 15. Lämmityspatterit reaktorin ulkopinnassa

Lämmityspattereihin kerääntyvää ainesta voitaisiin välttää myös asentamalla patterit reaktorin kattoon ja pohjalle, mutta lämmitysteho ei olisi tarpeeksi kannattava. Lisäksi haastattelussa selvisi, että lämmitystarve on suurempaa nimenomaan sekoittimien kohdalla ja lietemassan keskikohdilla.

Vertailussa lieriömäiseen reaktoriin huomattiin, että siellä on vähemmän ongelmakohtia kuin työnkohteena olevassa konttimallisessa reaktorissa. Tästä voidaan päätellä, että reaktorista olisi hyvä poistaa turhat nurkat ja minimoida sekoittimien väliin jäävä tila. Kalliin valmistuksen takia lieriömäisiä ei ole aina haluttu ottaa Suomessa tai muualla käyttöön. Pelkkien kuvien ja Internetin julkaisujen perusteella on vaikea sanoa, ilmeneekö muita ongelmia syötteen kanssa Thönin tai Kompogasin reaktoreissa.

Sopiva sekoitustapa on myös tärkeä. Sekoittimilla ylläpidetään turbulენტtista virtausta ja pidetään syöte liikkeessä. Myös seiniin tai lämmityselementteihin kertyvää

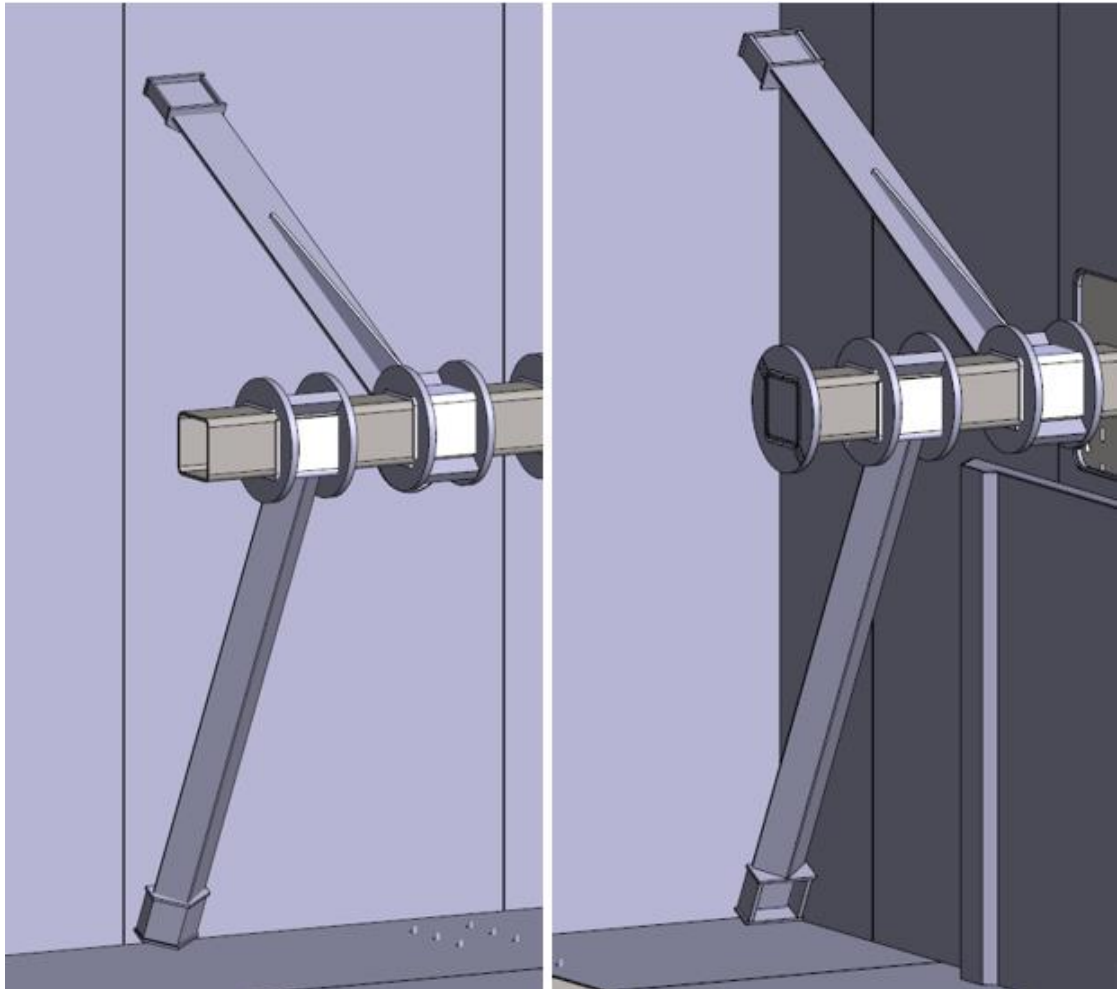
ainesta voitaisiin hallita laittamalla sekoittimen mela pyyhkäisemään mahdollisimman läheltä. Minimoimalla sekoittimien väliin jäävä tila vähennettäisiin sekoittimien väliin muodostuvia sedimenttikasoja. Limittäin mennessään (ks. kuvio 16) sekoittimet voidaan asentaa entistä likemmin toisiaan, mutta samalla luodaan uusia ongelmia. Sekoittimien ollessa limittäin joka toinen ei pääse pyyhkäisemään tarpeeksi läheltä seinää tai patteria. Lisäksi pitää miettiä, voidaanko tahattomasti vahingoittaa lämmitysjärjestelmää sekoittimen mennessä läheltä patteria, jos patterin ja sekoittimen väliin jää kiinteä esine. Myös sisällä liikkuminen tyhjennyksen yhteydessä hankaloituisi.



Kuvio 16. Sekoittimet limittäin aseteltuna aiheuttaa uusia ongelmakohtia.

Sekoittimia voitaisiin myös kehittää niin, että ne kaapaisivat paremmin reaktorin pohjasta lietettä liikkeelle (ks. kuvio 17). Jos sekoittimessa on riittävästi tehoa ja lujuusominaisuuksia, voisi se irrottaa myös jo laskeutunutta ja kovettunutta ainesta. Haastattelussa selvisi, että sekoittimen vääntömomenttia saadaan kyllä kasvatettua, mutta silloin akselin ja lapojen rakenteesta tulee reilusti raskaampia, jotta kestävät

lavan päähän lisätyn kappaleen aiheuttaman kuorman. Raskaampi rakenne nostaa valmistuskustannuksia merkittävästi. Lisäksi lapojen lujuuslaskenta on haastavaa, koska syötteen vaihtelevat paljon ja syötteen rakenne muuttuu alku- ja loppupään välillä.



Kuvio 17. Kauhamaisempi pää sekoittimessa voisi irrottaa ja liikuttaa paremmin laskeutunutta lietemateriaalia.

Al Seadin ja muiden mukaan hydraulinen paine olisi riittävä yli 10 metrin korkuisissa mädättämöissä poistamaan sedimentoitunutta ainesta. Tämän työn mallissa se ei todennäköisesti päde, kun kyseessä on tulppavirtaus mallinen reaktori, jossa korkeus liikkuu noin 4–6 metrissä ja pohjapinta-ala on laaja. Tämä tieto voi muutenkin koskea todennäköisesti pohjasta tyhjennettäviä mädättämöitä, sillä Al Seadin ja muiden

tekstissä ei erityisesti mainita millaisessa reaktorissa nämä sedimentoitumisen hallinta- ja poistokeinot toimivat.

Myös lattiakaivot mainitaan Al Seadin ja muiden julkaisussa. Lattiakaivot voitaisiin saada osaksi vaakamallista biokaasureaktorin sedimentoitumisen hallintaa, jos reaktorin pohja ei olisi täysin vaakatasossa. Liete pysyisi liikkeessä, kun reaktorin pohja olisi kallistettu poistopäätä kohti. Kallistetussa pohjassa liete ei vain laskeutuisi pohjalle, vaan valuisi myös koko ajan eteenpäin painovoimasta ja hydraulisesta paineesta. Periaate olisi siis sama kuin putkistossa vietolla, jolla varmistetaan esimerkiksi, että kaasuputkiin ei jää mahdollisesti kaasusta tiivistynyttä vettä seisomaan. Tästä tosin pitäisi tehdä laskelmia, kuinka suuri kallistuksen tulisi olla, jotta liete liikkuisi riittävästi ja tutkia toisiko se muita ongelmia mukanaan. Kallistettu pohja ainakin vaikuttaisi sekoittimien suunnitteluun.

Haastatteluissa selvisi myös, että vahingoittuneet sekoittimet aiheuttavat sedimentoitumisen lisäksi muita ongelmia, kuten paisumista. Paisumista tapahtuu, kun kaasu ei pääse lietteestä vapautumaan. Esimerkiksi pinnalle jäävä kevyt aines, esimerkiksi muovipussit, ovat aiheuttaneet kerroksia, jotka eivät päästä kaasua vapautumaan kaasutilaan. Reaktorin perusrakenteeseen olisi siis hyvä lisätä ylivuotoputki, jota kautta liete pääsisi hallitusti purkautumaan reaktorista. Ylivuotoputkeen tulee ottaa huomioon, että kaasu ei kuitenkaan kulkisi sitä kautta tai muuten ottaa talteen ylivuotoputkeapitkin kulkeutuva kaasu. Myös poistoputkien sijoittelua voitaisiin pohtia. Kelluva-aines ei todennäköisesti pääse koskaan ulos reaktorin alaosaan sijoitetuista poistoputkista, vaan kerääntyy reaktoriin.

7 Pohdinta

7.1 Työn suoritus ja tulokset

Työn tavoitteena oli vaakamallisen biokaasureaktorin perusrakenteen esittely ja rakenteen jalostaminen sedimentoitumisen hallitsemiseksi. Sedimentaation hallintaa

on vaikea esittää numeerisesti, minkä takia tässä työssä käytettiin laadullista tutkimusotetta. Suurin osa tiedoista ja ideoista koskien biokaasureaktorin sedimentaatio ongelmaa tuli Elomaticin työntekijöitä haastatteleamalla ja sisäisiä lähteistä.

Teoreettista viitekehystä varten löydetty tieto ja työn tulokset tuntuvat molemmat sanovan pitkälti samaa syötteen ongelmista. Sedimentoitumista voidaan hallita reaktorin sisäisillä ratkaisulla, kuten sekoittamalla syötettä riittävästi. Sekoittamisella ylläpidetään sopivaa turbulენტista virtausta. Sekoittimien asettelulla on myös vaikutusta, mutta niillä on rajalliset mahdollisuudet.

Vaikka muitakin tapoja on hallita laskeutumista ja kovettumista, on syötteen laadunhallinta yksi merkittävimmistä. Syöte tulisi puhdistaa mahdollisista ongelmatekijöistä, kuten hiekasta, muovijätteestä sekä rasvasta, mitä Elomaticin kohteissa ei ole juuriakaan tehty. Rasva onkin parempi ottaa talteen ja viedä biodieselin jalostukseen, joka usein onkin biokaasuntuotannon yhteydessä. Sedimentoitumisen teorian pohjalta voidaan sanoa, että syötteen olisi hyvä olla myös mahdollisimman tasalaatuista palakoon kannalta, jotta tasainen sekoittuminen olisi mahdollista. Elomaticin omista lähteistä kävi ilmi, että syötteen seassa oleva muovi aiheuttaa erityisesti ongelmia, mutta muissa tutkimuksissa ja tiedonannoissa tätä ei mainittu. Muissa tapauksissa tunnuttiin keskittyvän lähinnä hiekan aiheuttamiin ongelmiin.

Mielestäni hiekan ja muiden raskaiden epäorgaanisten aineiden poisto syötteestä on merkittävin menetelmä sedimentoitumisen hallintaan. Biokaasureaktorin rakenteen kehityksen kannalta parasta olisi vähentää vaakatasoista pinta-alaa ja pyrkiä mahdollisesti siirtymään kaarevapohjaiseen reaktoriin, jos raha ei ole este.

Tarkemman sedimentoitumisongelman kartoittamiseksi olisi voinut olla hyödyllisempää olla yhteistyössä biokaasulaitoksen kanssa, jolloin aineistoa olisi mahdollisesti ollut vielä helpommin saatavilla. Erilaiset raportit sedimentoitumisesta ja syötteen laadun vaihtelusta olisi merkittävää sedimentoitumisen ehkäisyn kannalta. Koska tavoitteena oli mallin parantaminen suunnittelutoimiston tarpeisiin, on tämä tutkimus riittävä siihen tarpeeseen.

7.2 Luotettavuus

Luotettavimpia ratkaisuja ja ongelman syvempää ymmärrystä varten tulisi saada erilaisia mittatuloksia sedimentoitumisesta reaktorissa. Jos syötteen liikkeistä on olemassa erilaisia kaavioita, ei niitä verkosta ollut saatavilla ainakaan ilmaiseksi.

Luotettavaa tietoa biokaasun tuotannosta löytyi monipuolisesti. Tietoa löytyi etsimällä Internetistä ja tutkimalla muita biokaasuun liittyviä opinnäytetöitä. Opinnäytetöistä katsottiin alkuperäinen lähde. Tietoperustan tieto pystyttiin vahvistamaan monista toisistaan riippumattomista lähteistä.

Sedimentaatiosta oli vaikeampi löytää tietoa varsinkin suomeksi. Suoraan biokaasureaktorin sisällä tapahtuvaan sedimentaatio ongelmaan löytyi vähän tietoa kirjallisuudesta ja muista julkaisuista. Sedimentoituminen biokaasureaktoreissa toimii kuten muukin sedimentoituminen, minkä takia sedimentoituminen teoriassa kyllä tunnetaan hyvin, jolloin lähteenä voitiin käyttää muutakin materiaalia.

Koska aineisto on suurimmalta osin suullisilla haastatteluilla kerättyä ja näistä ei ole dokumentointia, vaikuttaa se luotettavuuteen heikentävästi. Luotettavuutta nostaa kuitenkin haastateltujen asiantuntijuus.

Benchmarking-menetelmää varten olisi ollut hyödyllisempää olla yhteydessä muihin reaktorien valmistajiin ja käyttäjiin. Nyt vertailu muihin reaktoreihin perustui Internetistä löytyvään tietoon. Internetissä oleva tieto valmistajien ja toimittajien omilla sivuilla voi olla hyvin myyntiä edistävää eli ei täysin puolueetonta. Päätelmät, joita niistä tehtiin, saivat kuitenkin vahvistuksen haastatellulta Elomaticin työntekijältä.

7.3 Jatkokehitys

Biokaasureaktorin sedimentoitumisen hallinnan kannalta tärkeimpänä on syötteen hiekan, muovin ja muiden mädätystä haittaavien komponenttien erotusmenetelmien kehitys. Jos hiekan kierto on reaktorissa ongelma, tulisi miettiä, mikä voisi olla paras

sijoittelu kiertoputkistolle, joka nyt ottaa kierrätettävän materiaalin pohjalta, jonne hiekka yleensä päätyy.

Myös syötteen kuiva-aineen palakokoon voisi olla syytä perehtyä syvemmin, jotta saavutetaan optimaalinen suspensio. Syötteen laadun parantamisella vähennettäisiin sedimentoitumisen lisäksi myös pintalietteen muodostusta, johon tässä opinnäyte-työssä ei syvemmin perehdytty. Syötteen kovettumista ja pintalietteen muodostu- mista tulisi myös tutkia lisää. Voitaisiin tutkia, onko olemassa mahdollisia lisäaineita, joita lisäämällä syötteeseen voitaisiin ehkäistä laskeutuneen aineen kovettumista ja vähentää koheesio voimia.

Eri syötteiden vaikutusta tarkoituksen mukaiseen reaktorin rakenteeseen tulisi myös mielestäni tutkia. Jos syötetään tasalaatuista nurmea, voi reaktorin rakenteeksi riit- tää hyvinkin yksinkertainen rakenne verrattuna kotitalouksissa tuotettuun biojättee- seen, josta voi löytyä seasta sinne kuulumatontakin materiaalia. Ihmisiä tulisikin va- listaa paremmin siitä mitä biojätteisiin heitetään, jotta saadaan vähennettyä väärän materiaalin joutumista reaktoriin. On kyllä mahdollista, että suuri syy on ihmisten vä- linpitämättömyys jätteenlajittelussa, eikä niinkään puutteellinen tieto.

Jotta reaktori osattaisiin tyhjentää sopivin väliajoin, tarvitaan siitä kokemusta ja sii- hen kehitettyjä sopivia mittalaitteita. Mittalaitteilla ja antureilla voitaisiin ehkäistä re- aktorin turhat huollot ja reagoida oikeaan aikaan huolto- ja tyhjennystarpeisiin.

Lähteet

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama J. & Korhonen J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Teknologian tutkimuskeskus VTT. VTT Technology 258. Juvene Print.

Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. & Janssen, R. 2008. Biogas handbook. University of Southern Denmark Esbjerg. Esbjerg, Denmark.

Anaerobic Digestion: Biogas Production and Odor Reduction. 2012. Article in Penn State Extension's website. The Pennsylvania State University. Viitattu 16.4.2019. <https://extension.psu.edu/anaerobic-digestion-biogas-production-and-odor-reduction>

Biokaasuntuotanto maatilalla. 2013. Opas biokaasuntuotantoon. Motiva. Viitattu 22.5.2019. https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf

COM (2016)/767 final – 2016/0382(COD). Ehdotus Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviksi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämiseksi (uudelleenlaadittu toisinto). Euroopan komissio. Viitattu 21.5.2019. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:52016PC0767R\(01\)&from=FI](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:52016PC0767R(01)&from=FI)

Daintith, J. & Martin, E. 2010. Dictionary of Science. 6th Edition. Oxford University Press. <https://janet.finna.fi>, Knovel.

Elomaticin liikevaihto nousi yli 81 miljoonaan euroon. 2019. Tiedote Elomaticin verkkosivuilla. Viitattu 31.1.2019. <https://www.elomatic.com/fi/elomatic/uutiset/2019/01/15/elomaticin-liikevaihto-nousi-yli-81-miljoonaan-euroon/>

Elomatic lyhyesti. N.d. Artikkelit Elomaticin verkkosivuilla. Viitattu 10.1.2019. <https://www.elomatic.com/fi/yritys/elomatic-lyhyesti.html>

Evans, S. 2018. The pros and cons of biogas: is it the answer to a circular economy? Analyysi power-technology.com verkkosivuilla. Viitattu 22.1.2019. <https://www.power-technology.com/features/biogas-pros-and-cons/>

High Solids Anaerobic Digestion from Thöni (TTV). 2015. Artikkelit Thönin verkkosivuilla. Viitattu 13.2.2019. <http://www.thoeni.com/en/fermentation-of-organic-waste.html>

Huttunen, M. J., Kuittinen V. & Lampinen, A. 2018. Suomenbiokaasulaitosrekisteri n:o 21. Tiedot vuodelta 2017. Joensuu: Itä-Suomen yliopisto.

- Kananen, J. 2015. Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisu opinnäytetyön kirjoittajalle. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- Kananen, J. 2017. Laadullinen tutkimus pro graduna ja opinnäytetyönä. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisu opinnäytetyön kirjoittajalle.
- Kinnunen, V. & Rintala, J. 2015. Biokaasualan monet mahdollisuudet. Julkaisussa: Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja hyödyntäminen. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu, 9–20.
- Kompogas® Plug-Flow Steel Digester in Multiple Sizes. N.d. Hitachi Zosen Inova AG. Dry Fermentation of Biogenic Waste. Viitattu 18.4.2019. http://www.hz-inova.com/cms/wp-content/uploads/2015/08/PF1500_Online_E.pdf
- Kutuniva, J. 2012. Hiilidioksidin hyödyntäminen ja kuivamädätys. Jyväskylän yliopisto Kokkolan yliopistokeskus Chydenius & Oulun yliopisto Oulun Eteläisen Instituutti.
- Kymäläinen, M. 2015. Anaerobinen hajoaminen ja sen hallinta biokaasureaktorissa. Julkaisussa: Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja hyödyntäminen. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu, 59–81.
- Kymäläinen, M. & Luostarinen, S. 2015. Biokaasutuotannon raaka-aineet. Julkaisussa: Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja hyödyntäminen. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu, 21–47.
- Lampinen, A. & Rautio, E. 2015. Biokaasun käsittely ja hyödyntäminen. Julkaisussa: Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja hyödyntäminen. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu, 124–172.
- Latvala, M. 2009. Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.
- Luostarinen, S. 2015. Biokaasuprosessit ja laitostaseet. Julkaisussa: Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja hyödyntäminen. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu, 82–93.
- Luostarinen, S. & Jaakkola, U. 2015. Biokaasutuotannon raaka-aineiden esikäsittely. Julkaisussa: Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja hyödyntäminen. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu, 48–58.
- Marttinen, S. & Maaranen, K. 2005. Esiselvitys biokaasulaitoksen sijoittumisesta Kirkkokallion teollisuusalueelle. Satafood Kehittämisyhdistys ry Ympäristöteknologia.

http://www.honkajoki.fi/files/honkajoki/honkajoki_doc/vihercenter_biokaasulaitoksen_esiselvitys.pdf

Masselink, G., Hughes, M. & Knight, J. 2011. Introduction to Coastal Processes and Geomorphology. Second edition. Hodder Education, a member of the Hodder Headline Group.

Meidän tarinamme. N.d. Artikkelit Elomaticin verkkosivuilla. Viitattu 10.1.2019. <https://www.elomatic.com/fi/yritys/meidan-tarinamme.html>

Paavola, T. & Kapuinen, P. 2015. Mädätysjäännöksen käsittely ja hyödyntäminen. Julkaisussa: Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja hyödyntäminen. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu, 94–123.

Thöni. 2017. TTV Thoeni High Solids Anaerobic Digestion verkkosivu. Viitattu 13.2.2019. <http://ttv.thoeni.com/#home>

Valtanen, E. 2013. Tekniikan taulukkirja. Genesis-Kirjat. 20. painos.

Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. 2017. Työ- ja elinkeinoministeriö. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu 4/2017. Viitattu 21.5.2019. http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79189/TEMjul_4_2017_verkkajulkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Vanoni, V. 2006. Sedimentation Engineering - ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice (MOP) No. 54. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Liitteet

Liite 1. Vaakamallisen biokaasureaktorin konseptitasoinen perusrakenne

