



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

YHDYSKUNTAJÄTEVESILIETTEEN KÄSITTELY MÄDÄTYKSELLÄ

Tytti Ristikaarto

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Kandidaatintyö

Toukokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Yhdyskuntajätevesilietteen käsittely mädätyksellä

Tytti Ristikaarto

Oulun yliopisto, Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2024, 29 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Petra Korhonen

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli tutkia yhdyskuntajätevesilietteen käsittelyä mädätyksellä. Aluksi työssä perehdyttiin yhdyskuntajätevesilietteen syntyyn ja erilaisiin sen mahdollisiin käsittelytapoihin. Työssä käsiteltyjä erilaisia käsittelytapoja ovat mädätys, kompostointi, pyrolyysi, terminen kuivaus, poltto, kalkkistabilointi ja KemiCond-menetelmä. Työssä perehdyttiin myös syvemmin mädätykseen yhdyskuntajätevesilietteen käsittelytapana. Lisäksi tutkittiin mädätyksen tuotteita sekä mädätyksen hyviä ja huonoja puolia. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella mädätys on yleinen yhdyskuntajätevesilietteen käsittelytapa, jolla on pitkä käyttöhistoria. Lisäksi mädätys on energiatehokas käsittelytapa, jonka hiilijalanjälki on muihin käsittelytapoihin verrattuna pieni. Mädätys voidaan tehdä sekä matalammassa että korkeammassa lämpötilassa. Mädätys matalassa lämpötilassa on huomattavasti yleisempää, mutta sen tuotteet vaativat jatkokäsittelyä. Mädätys korkeammassa lämpötilassa puolestaan antaa puhtaamman tuotteen, mutta se on prosessina epävakampi. Mädätyksen tuotteita voidaan hyödyntää esimerkiksi maataloudessa sekä energian tuotannossa.

Työn tarkoituksena on toimia tiiviinä tietopakettina aiheesta kiinnostuneille. Työn lukija saa yleiskäsityksen erilaisista yhdyskuntajätevesilietteen käsittelytavoista. Lisäksi lukija saa syvempää tietoa mädätyksestä, sen hyvistä ja huonoista puolista sekä sen tuotteista ja niiden hyödyntämismahdollisuuksista.

Asiasanat: yhdyskuntajätevesiliete, mädätys, biokaasu, mädäte

ABSTRACT

The treatment of municipal sewage sludge by anaerobic digestion

Tytti Ristikaarto

University of Oulu, Degree Programme of Environmental Engineering

Bachelor's thesis 2024, 29 pp.

Supervisor at the university: Petra Korhonen

The purpose of this bachelor's thesis was to study the treatment of municipal sewage sludge by anaerobic digestion. First, the thesis focused on the formation of municipal sewage sludge and its different possible treatment methods. The different treatment methods covered in the thesis are anaerobic digestion, composting, pyrolysis, thermal drying, combustion, lime stabilization and the Kemi-Cond method. The thesis also focuses on anaerobic digestion as a treatment method on a deeper level. In addition, the products of anaerobic digestion, as well as its pros and cons, were studied in the thesis. The thesis was carried out as a literary survey.

Based on literary survey, anaerobic digestion is a common treatment method of municipal sewage sludge, and it has been used for a long time. Additionally, anaerobic digestion is an energy efficient treatment method with a relatively small carbon footprint compared to other treatment methods. Anaerobic digestion can be done in both lower and higher temperatures. Using lower temperatures is more common but the products require further processing. Using higher temperatures, however, gives a purer product but the process is more unstable. The products of anaerobic digestion can be used in, for example, agriculture and energy production.

The purpose of the thesis is to act as a compact source of information for those interested in the topic. The reader gets a general understanding of different treatment methods of municipal sewage sludge. In addition, the reader gets a deeper understanding of anaerobic digestion, its pros and cons, as well as its products and utilization possibilities.

Keywords: municipal sewage sludge, anaerobic digestion, biogas, digestate

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto	6
2 Yhdyskuntajätevesilietteen synty	7
3 Yhdyskuntajätevesilietteen käsittelytapoja	10
3.1 Mädätys	10
3.2 Kompostointi	11
3.3 Terminen kuivaus	13
3.4 Poltto	14
3.5 Pyrolyysi	15
3.6 Kemicond -käsittely	16
3.7 Kalkkistabilointi	17
4 Mädätys käsittelytapana	19
4.1 Mädätysprosessi	19
4.2 Mädätyksen hyödyt ja haitat	22
4.3 Mädätyksen lopputuotteet	24
5 Johtopäätökset	28

LÄHDELUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

BOD ₇	biologinen hapenkulutus seitsemän vuorokauden aikana (biological oxygen demand)
CSTR	täyssekoitteinen
EPS	solunulkoisen polymeerinen aines
HRT	hydraulinen retentioaika
pH	aktiivisten vetyionien määrä seoksessa (potential hydrogen)
TS	kuiva-ainepitoisuus (total solids)
VFA	haihtuvat rasvahapot (volative fat acids)

1 JOHDANTO

Kiertotalouden ollessa tulevaisuuden tavoite, myös jätteiden elinkaaren loppupäätä on tarkasteltava uudesta näkökulmasta ja pyrittävä löytämään jätteelle jatkokäyttömahdollisuuksia. Pelkästään Suomessa lietteitä muodostuu eri sektoreilla yhteensä 3 000 000 tonnia, josta yhdyskuntajätevesilietteen osuus on 842 000 märkätönna. (Pöyry Environment 2007) Lietteen loppusijoitus kaatopaikalle on vähentynyt huomattavasti ja siitä on kiittäminen lietteiden käsittelymenetelmiä ja niiden kehitystä. Mädätyksellä on mahdollista tuottaa energiaa biokaasun muodossa, eli lietteiden käsittely näyttelee myös osaansa tulevaisuuden energiantuotannossa.

Tässä työssä tutkitaan mädätystä yhdyskuntajäteveden käsittelytapana. Mädätyksen käyttö lietteiden käsittelytapana on Suomessa yleistä. Mädätys on anaerobisissa olosuhteissa tapahtuvaa hajoamista. Mädätyksessä tuotteina syntyy biokaasua ja mädätysjäännöstä, eli mädätettä. Jätevedenkäsittelyssä syntyvän jätevesilietteen käsittely on tärkeää, sillä käsittelemätön liete on käytännössä jätettä, joka on ympäristölle haitallista. Jätevesilietettä käsittelemällä siitä voidaan jalostaa tuotteita, joita voidaan hyödyntää esimerkiksi maanparannusaineina tai lämpöenergian tuotannossa. Jätevesilietteiden käsittelemättä jättäminen olisi käytettävissä olevien ravinteiden ja energian haaskausta.

Työssä selvitetään mädätykseen liittyviä hyötyjä ja haittoja, mitä erilaisia tuotteita mädätyksellä saavutetaan ja näiden tuotteiden hyödyntämismahdollisuuksia. Mädätyksen lisäksi työssä esitellään lyhyesti myös muita jätevesilietteiden mahdollisia käsittelytapoja sekä selvitetään, mitä yhdyskuntajätevesiliete on ja miten sitä syntyy. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena.

Suomenkielisiä kirjallisuuskatsauksia löytyi tällä aiheenrajauksella vähäisesti, jonka vuoksi työ on tehty suomeksi ja rajaten työ koskemaan pääasiassa mädätystä ja sen tuotteita.

2 YHDYSKUNTAJÄTEVESILIETTEEN SYNTY

Yhdyskuntajätevesilietettä syntyy sivutuotteena jätevedenpuhdistamoilla jäteveden puhdistusprosessissa. Jäteveden puhdistusprosessi on monivaiheinen prosessi. Prosessin tarkoitus on puhdistaa jätevettä niin, että siitä saadaan poistettua kiintoaines, ravinteet, orgaaninen aines sekä erilaiset haitta-aineet. Prosessin monivaiheisuuden ansioista jätevedessä olevia bakteereja, viruksia, hajuja ja orgaanisia aineita pystytään vähentämään tai jopa kokonaan poistamaan. (Pelto-Huikko & Vieno, 2009) Yhdyskuntajätevesilietteestä käytetään usein myös nimityksiä ”puhdistamoliete” tai ”jätevesiliete”.

Yhdyskuntajätevesiliete koostuu vedestä ja kiinteästä orgaanisesta aineesta, koostumus vaihtelee lietteen alkuperästä riippuen ja alueittain. Se sisältää hyödyllisiä ravinteita, mutta toisaalta myös haitallisia aineita, kuten myrkyllisiä raskasmetalleja, orgaanisia haitta-aineita sekä patogeenejä. (Fjäder 2016) Tästä syystä puhdistamolietteen käyttöä säädetään lainsäädännöllä ja liete on käsiteltävä, ennen kuin sitä voidaan käyttää esimerkiksi maatalouden lannoitteena. Käsittelemättömän lietteen pääseminen esimerkiksi vesistöihin aiheuttaisi niiden pilaantumista ja ihmisten sairastumista. Lietteen koostumus on tärkeää tuntea, jotta lietteen jatkokäsittely ja hävitys olisi turvallista ja tehokasta. Esimerkiksi kompostointiprosesseissa on tärkeää tuntea lietteen pH-arvo ja sen sisältämät orgaaniset hapot. Poltossa ja kaatopaikkasijoituksessa taas on tärkeää tuntea lietteen raskasmetallien, tuholaismyrkkujen sekä hiilivetyjen pitoisuudet. (Fytili & Zabaniotou 2008)

Jätevesissä esiintyy runsaasti typpeä ja fosforia, joilla on ympäristölle haitallisia vaikutuksia. Liiallinen fosfori aiheuttaa vesistöjen rehevöitymistä. Jätevesiin fosfori päätyy ihmisten ulosteiden ja virtsan kautta. Suomessa fosfori poistetaan jätevedestä yleensä kemiallisesti. Typpi aiheuttaa myös vesistöihin päätyessään rehevöitymistä ja päätyy myös jätevesiin ihmisen ulosteista ja virtsasta. Fosforista poiketen sitä poistetaan jätevedestä biologisesti. Typen ja fosforin poisto jätevedestä on erityisen tärkeää vesistökuormituksen ehkäisemiseksi. (Säylä 2013) Vuonna 1991 säädetyin yhdyskuntajätevesidirektiivin (91/27/ETY) tarkoituksena on ollut ”suojella vesiympäristöä yhdyskuntajätevesien haitallisilta vaikutuksilta”. Direktiivin arvioinnissa

vuonna 2019 todettiin, että direktiivillä on onnistuttu merkittävästi vähentämään vesiympäristöihin kohdistuvaa kuormitusta. Yhdyskuntajätevesidirektiiviin ollaan kuitenkin tekemässä päivityksiä, sillä nykyisessä muodossaan se ei huomioi riittävästi kaikkia yhdyskuntajätevedessä olevien epäpuhtauksien lähteitä. (Euroopan unionin neuvosto 2023)

Jätevesilietteet voidaan jakaa erilaisiin kategorioihin niiden syntypaikan mukaan. Kolme eri kategoriaa ovat yhdyskuntajätevesiliete, teollisuuden jätevesiliete ja maatalousliete. Yhdyskuntajätevesiliete käsittää yhdyskuntajäteveden lietteen tai sekoituksen teollisuus- ja yhdyskuntajätevesien lietteitä. Teollisuuden jätevesilietteet ovat peräisin erilaisten teollisuuden prosessien jätevesistä. Pääosa yhdyskuntajätevesistä muodostuu kotitalouksissa. Yhden henkilön vesikulutus Suomessa on keskimäärin 155 litraa vuorokaudessa, josta suurin osa päättyy jätevedeksi viemäriin. Lisäksi yksi henkilö tuottaa keskimäärin orgaanista kuormitusta seuraavasti: BOD 70 g/vrk, fosfori 2,2 g/vrk ja typpi 15 g/vrk. Kotitalouksista peräisin oleva jätevesi voidaan luokitella harmaaseen jäteveteen ja mustaan jäteveteen. Harmaa jätevesi on peräisin peseytymisestä, pyykinpesusta, siivoamisesta ja keittiöstä. Musta jätevesi on vessavettä. Orgaaninen aines yhdyskuntajätevedessä on peräisin pääasiassa mustasta jätevedestä, kun taas itse vesi on pääasiassa harmaasta jätevedestä. (Ramboll Finland Oy 2023)

Jätevedenpuhdistusprosessi on monivaiheinen. Ensimmäisenä on esikäsittely, jossa jätevedestä erotellaan suurimmat partikkelit. Tässä vaiheessa jätevesi virtaa välppien, eli siivilöiden läpi. Välppäyksen jälkeen jätevesi kuljetetaan hiekanerotuksen läpi, jolloin hiekka ja muu raskasaine, kuten lasin ja metallin kappaleet painuvat pohjalle. Jätevedessä oleva rasva jää kellumaan veden pinnalle, josta se poistetaan. Seuraavaksi vuorossa on kemiallinen puhdistus, jossa veteen lisätään saostuskemikaalia, jotta liukoisessa muodossa oleva fosfori saadaan erotettua vedestä. (Pelto-Huikko & Vieno 2009) Esikäsittelyn jälkeen seuraava vaihe on selkeytys, jossa jätevesi ohjataan esiselkeytysaltaisiin. Esiselkeytysaltaissa syntyy laskeutuksen lopputuloksena raakalietettä. Laskeutus perustuu gravitaatioon. Selkeytyksen jälkeen vuorossa on ilmastusvaihe. Tässä vaiheessa jätevesi ohjataan ilmastusaltaaseen. Ilmastusaltaassa oleva aktiiviliete saa aikaan biologisen prosessin, jonka seurauksena jäteveden orgaaninen aines hajoaa solumassaksi, hiilidioksidiksi ja vedeksi. Seuraavaksi vuorossa

on jälkiselkeytys, jossa edellisessä vaiheessa tärkeää roolia näytellyt aktiiviliete erotetaan laskeuttamalla ja palautetaan takaisin ilmastusaltaaseen. Näin käytössä oleva aktiiviliete kiertää prosessissa. Jälkiselkeytyksen jälkeen vuorossa on jälkikäsitteily halutulla menetelmällä. (Fytli & Zabaniotou 2008)

Jätevedenpuhdistamoilla syntyvä jätevesiliete voidaan jakaa erilaisiin ryhmiin sen perusteella, missä vaiheessa prosessia liete on syntynyt. Primääri- eri raakaliete on tiivistä esiselkeytyksessä syntynyttä lietettä, joka on painavaa ja painuu altaan pohjalle. Aktiiviliete muodostuu ilmastuksessa. Sekundääriliete otetaan talteen jälkiselkeytyksestä biologisen käsittelyn jälkeen. Sekundääriliete voidaan joko kierrättää takaisin ilmastukseen tai poistaa prosessista ylijäämälietteenä. Tetriäärinen liete on fosforipitoista lietettä, joka on erotettu kemiallisessa jälkisaostuksessa. Sekaliete on lietettä, joka sisältää sekä raakalietettä että sekundäärilietettä. (Metcalf & Eddy 2003).

Jätevesilietettä tiivistetään painovoimaisesti, jotta siitä saataisiin poistettua mahdollisimman paljon vettä. Painovoimaiselle laskeutukselle vaihtoehtoisia tiivistystapoja ovat mekaaninen tiivistys lingolla, ruuvilla tai suotonauhapuristimella sekä flotaatiotiivistys. (Karttunen 2004)

Yhdyskuntien jätevesiä puhdistetaan Suomessa noin 500 miljoonaa kuutiometriä vuosittain 350 eri puhdistamolla. Vuonna 2021 kuivattua jätevesilietettä käsiteltiin Suomessa yhteensä 1 073 857 märkätonnia, mikä on kuivattuna noin 150 000 tonnia. (Pöyry Environment 2007) Jätevedenpuhdistamolietteiden määrän odotetaan tulevaisuudessa kasvavan puhdistustekniikan kehityksen ja toisaalta väestönkasvun myötä.

3 YHDYSKUNTAJÄTEVESILIETTEEN KÄSITTELYTAPOJA

Suomessa yleisimmät jätevesilietteen käsittelytavat ovat mädätys ja kompostointi sekä näiden yhdistelmät. Jätevesilietteen käsittelyn tavoitteena on tärkeiden ravinteiden talteenotto ja sitä kautta luonnonvarojen säästäminen, ympäristölle haitallisten aineiden vähentäminen, hajujen poisto ja kuljetuskustannusten pienentäminen. (Vilpanen & Toivikko 2017)

Jätevesilietteen käsittelytapoja on useita. Ne voidaan jakaa prosessin ominaisuuksien ja toimintatavan perusteella biologisiin ja termisiin käsittelytapoihin. Näiden lisäksi on olemassa myös kemiallisia käsittelytapoja, jotka ovat markkinoilla vielä uusia. Termisiä käsittelytapoja ovat terminen kuivaus, pyrolyysi ja poltto, biologisia käsittelytapoja ovat kompostointi ja mädätys ja kemiallisia käsittelytapoja ovat Kemicond-käsittely ja kalkkistabilointi. Lietteen käsittelylle tyypillistä on erilaisten käsittelytapojen ketjutus. (Smith 2009)

3.1 Mädätys

Anaerobinen mädätys on menetelmä, jonka avulla voidaan saavuttaa sekä päästöjen kontrollointia että energian talteenottoa. Menetelmä sopii sekä maataloudesta että yhdyskunnista peräisin oleville jätevesilietteille, sillä ne sisältävät suuria pitoisuuksia biohajoavaa ainesta. (Ye et al. 2008)

Mädätys on kompostoinnin ohella yleisin tapa käsitellä jätevesilietteitä. Se tapahtuu hapettomissa olosuhteissa reaktorissa, joko mesofiilisesti tai termofiilisesti. Mesofiilisessä mädätyksessä prosessin lämpötila on noin 37 °C ja termofiilisessä 55 °C. Suomessa nykyisistä mädättämöistä suurin osa toimii mesofiilisella alueella. Termofiilisessä ja mesofiilisessä prosesseissa toimivat eri bakteeriryhmät. Mesofiilisen mädätyksen jälkeen liete pitää jälkikäsitellä, jotta voidaan varmistua lietteen hygienisoitumisesta. Termofiilisessä mädätyksessä jälkikäsitelyä ei tarvita, sillä se poistaa taudinaiheuttajia paremmin, kuin mesofiilinen mädätys. Termofiilisessä mädätyksessä reaktioiden tapahtuminen on nopeampaa ja esimerkiksi orgaanisen aineen

hajoaminen on nopeampaa, kuin mesofiilisessa mädätyksessä. (Kangas et al. 2011) Mädätyksen lopputuotteen käyttömahdollisuudet riippuvat siitä, onko lopputuote tuotettu mesofiilisesti vai termofiilisesti. Termofiilisesti käsiteltyä lietettä voidaan käyttää sellaisenaan esimerkiksi maanparannuksessa. Mesofiilisesti käsitelty liete pitää stabiloida esimerkiksi kompostoinnilla ennen jatkokäyttöä. (Pöyry Environment Oy 2007)

Esikäsitely ennen mädätystä riippuu käsiteltävästä lietteestä. Puhdistamoliete täytyy ensin sakeuttaa. Sakeuttaminen voidaan toteuttaa joko mekaanisella tiivistimellä tai gravitaatiotiivistimellä. Mädätysprosessi perustuu siihen, että bakteerien toiminnan vaikutuksesta osa lietteen orgaanisesta aineksesta muuttuu metaanipitoiseksi biokaasuksi. Tällöin myös lietteen kiintoaineksen määrä vähenee. (Metcalf & Eddy, 2003)

Mädätyksen positiivisina ympäristövaikutuksina on sen mahdollistama ravinteiden kierrätys. Lisäksi mädätys tuhoaa patogeeneja, vähentää hajuhaittoja ja hygieniariskejä sekä hajottaa torjunta-aineita. Kuivauksen ja esikäsitelyn aikana syntyy jätevesiä, jotka ohjataan jätevedenpuhdistamolle käsiteltäväksi. Ongelmaksi jätevesi muodostuu, jos läheisyydessä ei sijaitse suurta jätevedenpuhdistamo, sillä jäteveden koostumuksen vuoksi sen käsittely pienillä tai keskisuurilla jätevedenpuhdistamoilla on haastavaa. (Iivari 2010)

3.2 Kompostointi

Kompostointi on mädätyksen ohella yleisin tapa käsitellä jätevesilietteitä. Kompostointi alkaa esikompostoinnilla, jossa kompostimassaan lisätään ilmaa eli sitä ilmastetaan ja sekoitetaan. Kompostimassasta myös poistetaan kompostikaasuja. Massan kosteutta säädelään ilmastuksella sekä lisäämällä siihen vettä. Esikompostointivaiheessa komposti lisäksi hygienisoidaan. Kompostointilaitoksia on erityyppisiä ja ne eroavat toisistaan reaktorityypin mukaisesti. Suomessa käytössä olevia kompostointilaitoksia ovat tunnelikompostointi, rumpukompostointi, tornikompostointi, konttikompostointi ja membraanikompostointi. Näistä tyypeistä yleisimmin käytössä on tunnelikompostointi, jonka etuna on se, että sitä voidaan käyttää sekä pienillä että suurilla tuotantolaitoksilla. (Pöyry Environment 2007)

Esikompostoinnin jälkeen kompostimassa voidaan joko siirtää jälkikypsytykseen tai se voidaan siirtää seulottavaksi ennen jälkikypsytystä. Jälkikypsytytys tapahtuu yleisimmin avoimen kentän menetelmällä, mutta jälkikypsytytys katetussa kattilassa on myös mahdollinen. Jälkikypsytyksessä kompostia käännellään aluksi muutaman viikon välein ja kypsytyksen edetessä käntelyväliä harvennetaan. Jälkikypsytyksen päätyttyä komposti seulotaan tukiainekappaleiden sekä mahdollisten epäpuhtauksien poistamiseksi kompostimassasta. Seulottu kompostimassa käsitellään sen loppukäyttötarkoituksen mukaisesti. Useimmiten kompostimassaan lisätään hiekkaa, jolloin siitä saadaan valmistettua kompostimultaa. Kompostimassasta on mahdollista jalostaa myös lannoitteita ja maanparannusaineita. (Metcalf & Eddy 2003; Pöyry Environment Oy 2007)

Kompostoinnista aiheutuvia ympäristövaikutuksia ovat prosessissa syntyvät jätevedet, hajukaasut sekä liikenteestä ja aumojen käsittelystä johtuvat melu- ja pölyhaitat. Hajukaasut ovat kompostoinnissa syntyviä poistokaasuja, jotka koostuvat suurimmaksi osaksi vedestä ja hiilidioksidista. Kaasut sisältävät lisäksi haisevia yhdisteitä, joista merkittävin on ammoniakki. Lisäksi kaasuisissa esiintyy erilaisia rikkiyhdisteitä. Hajuja voidaan kuitenkin poistaa käsittelemällä, tavallisimmin hajukaasuja pestään ensin joko happo- tai vesipesurilla, jonka jälkeen ne vielä käsitellään biosuodattimessa. Muita mahdollisia käsittelymenetelmiä hajun poistamiselle ovat katalyyttinen poltto ja otsonointi. Prosessissa syntyvät jätevedet ovat peräisin reaktorikompostoinnista. Syntynyttä jätevettä käytetään prosessissa kompostimassan kasteluun. Ylijäävä jätevesi voidaan johtaa jätevedenpuhdistamolle käsiteltäväksi. (Pöyry Environment 2007)

Kompostointi soveltuu erityyppisille alueille. Mikäli jälkikypsytytys tehdään ulkona, kompostointilaitoksen sijoittelussa tulee ottaa huomioon hajuhaitat. Tällöin laitoksen etäisyys asutukseen tulisi olla riittävän suuri. Pienempien laitosten sijoitukseen liittyvät vaatimukset ovat pienemmät, kuin suurempien laitosten. Sijoittelun taloudellinen kannattavuus perustuu kustannustehokkuuteen ja menetelmän taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaa käsittelyyn tulevan lietteen ominaisuudet. (Iivari 2010)

Kompostointilaitoksissa ei tuoteta laitoksen ulkopuolella hyödynnettävissä olevaa energiaa. Tulevaisuudessa lietteiden ja jätteiden energiahyötykäyttö lisääntyy, joten on

mahdollista, että kompostoinnin merkitys jätevesilietteen käsittelymenetelmänä heikentyy. (Pöyry Environment 2007)

3.3 Terminen kuivaus

Ennen varsinaista termistä kuivausta jätevesiliete tulee esikäsitellä. Esikäsitellyssä liete esikuivataan mekaanisesti esimerkiksi linkoa apuna käyttäen niin, että mahdollisimman suuri osa lietteessä olevasta vedestä saadaan poistettua. Veden haihduttaminen myöhemmässä vaiheessa on huomattavasti kalliimpaa, kuin esikäsitellyssä tapahtuva mekaaninen kuivaus. Varsinainen terminen kuivaus aloitetaan esikäsitelyn jälkeen. Termisessä kuivauksessa lietteestä poistetaan siihen esikäsitelystä jäänyttä vettä haihduttamalla. Kuivaus voi tapahtua joko konvektiokuivauksella, joka perustuu suoraan lämmitykseen, tai kontaktikuivauksella, joka perustuu epäsuoraan lämmitykseen. Lämmönlähteinä voidaan käyttää kuumaa ilmaa, termoöljyä tai höyryä. Termisellä kuivauksella kuivaus voidaan toteuttaa joko osittaisena tai täyskuivauksena. Täyskuivauksessa lopputuote on joko pölymäistä tai granuloitunutta lietettä. Termisellä kuivauksella on mahdollista saada lietteen kuiva-ainepitoisuudeksi jopa yli 90 % TS. Liete on mahdollista rakeistaa tai granuloida joko jo termisen kuivauksen yhteydessä tai sen jälkeen. Yleisimmin termisen kuivauksen lopputuotteena saatu liete hyödynnetään joko polttoaineena tai lannoitevalmisteena. Kuivauksessa lietteen määrä vähenee, mikä helpottaa sen käsittelyä, varastointia sekä vähentää kuljetuskustannuksia. (Pöyry Environment 2007; Iivari 2010)

Termisen kuivauksen aiheuttamia ympäristövaikutuksia ovat hajukaasut sekä mahdollisesti kuivatun lietteen pölyäminen. Hajukaasut tulee käsitellä, käsittely tapahtuu esimerkiksi poltolla tai kaasupesurilla. Orgaaninen lietepöly on hengitettynä terveydelle haitallista ja sen vuoksi sen käsittelyssä tarvitaan suojaimia. Pölymäiseen lietteeseen liittyy palo- ja räjähdysriskejä ja se yleensä johdetaan suoraan polttoon. Granuloituneen lietteen käsittely on turvallisempaa ja helpompaa. (Pöyry Environment 2007)

Termisen kuivauksen käyttökustannukset ovat korkeat johtuen sen toimintaan tarvittavasta lämmitysenergian määrästä. Edullisinta olisi sijoittaa laitos sellaiseen paikkaan, missä ylimääräinen lämpö voidaan hyödyntää esimerkiksi

kaukolämpöverkossa tai kasvihuoneilla, sekä toisaalta missä edullista sekundäärilämpöä on saatavilla. Tilantarve termisellä kuivauksella on pieni verrattuna esimerkiksi kompostointiin. Menetelmänä terminen kuivaus soveltuu parhaiten suurten lietemäärien käsittelyyn sekä alueellisiin käsittelylaitoksiin. Esimerkkinä Pohjanmaalla toteutettu laitos, jossa lietteet on kerätty niin, että lietteiden kuljetusmatkat laitokselle ovat olleet alle 80 km. Lietettä kuivatessa sen määrä vähenee, mikä pienentää varastointi- ja kuljetuskustannuksia. Lopputuotteen jatkokäytön kannalta olisi hyvä, että laitos sijaitisi lähellä polttolaitosta tai ravinnekäyttöön soveltuvaa peltoaluetta. (Pöyry Environment 2007)

Lietteen lämpöarvo paranee, kun sitä käsitellään termisesti kuivaamalla. Lämpöarvon kasvamisen vuoksi termisesti kuivattua lietettä voidaan hyödyntää tehokkaammin energiantuotannossa. Lämpöenergiaa termisessä kuivauksessa kuluu 0,9–1,1 kWh haihdutettua vesikiloa kohden. Sähköenergian kulutus taas vaihtelee välillä 4–5 kWh/m³, riippuen kuivauksen laitteistosta. Kuiva-aineen lisääntyessä viisi prosenttia, energian kulutus kasvaa yhdeksän prosenttia, eli lämmönkulutus on korkea. Terminen kuivaus usein yhdistetään polttoon niin, että termisesti kuivattua lietettä poltetaan, jotta termisesti kuivatun lietteen lämpöarvo saadaan hyödynnettyä. Käyttökustannusten korkeuden vuoksi menetelmän käytön edellytyksenä on edullinen energianlähde, esimerkiksi mädätyksestä saatava biokaasu tai ylijäämälämpö teollisuudesta tai kaukolämmön tuotannosta. (Myllymaa et al. 2008; Iivari 2010)

3.4 Poltto

Poltto on yksi termisistä jätevesilietteen käsittelytavoista. Ennen varsinaista polttoa liete esikäsitellään kuivaamalla liete mekaanisesti. Mekaanisen kuivaamisen jälkeen liete kuivataan myös termisellä kuivauksella. Varsinainen poltto tapahtuu polttokattilassa. Hyvän sekoittumisen kannalta on tärkeää, että polttokattilassa saadaan aikaan turbulenttinen virtaus, joka aikaansaadaan johtamalla prosessiin ilmaylimäärä. Ilmaylimäärä tulee kuitenkin minimoida niin, että se vastaa tarvetta, sillä se kuluttaa lämpöenergiaa. Mahdollisia polttotekniikoita ovat arina- ja leijupolttotekniikka. Polttoon parhaiten soveltuva tekniikka on leijupolttotekniikka, sillä märän lietteen polttaminen on mahdollista leijupolttotekniikalla. Arinapolttua käytettäessä lietteen kuiva-

ainepitoisuuden täytyy olla korkeampi, kuin leijupolttotekniikkaa käytettäessä, vähintään 45 % TS. Lisäksi liete on kannattavinta polttaa erikseen lietteen syntypaikassa. (Pöyry Environment 2007)

Poltossa syntynyttä tuhkaa ei voida hyödyntää maanparannusaineena eikä lannoitevalmisteena. Tuhkan loppusijoituspaikka on yleisimmin kaatopaikka tai jätteenkäsittelylaitos. Ennen loppusijoitusta tuhka tulee kuitenkin käsitellä stabiiliksi. Joissain tilanteissa osa tuhkasta on mahdollista hyödyntää esimerkiksi tiilien tai sementin valmistuksessa tai tienrakennuksen täyteaineena. Joissain tapauksissa tuhkasta on mahdollista erottaa jakeita, joita voidaan erottaa hyötykäyttöön, esimerkiksi fosforia lannoitteiden valmistukseen. (Pöyry Environment 2007; Iivari 2010)

Polton ympäristövaikutukset riippuvat käsiteltävän lietteen sisältämistä haitta-aineista. Lieite saattaa sisältää esimerkiksi klooria, raskasmetalleja, rikkiä, fosforia ja typpeä. Ympäristöongelmia aiheutuu, jos nämä muodostavat toksisia yhdisteitä savukaasuihin tai jos ne pääsevät rikastumaan tuhkaan. Jos tuhka sisältää raskasmetalleja tai muita mahdollisia haitta-aineita, se määritellään ongelmajätteeksi. (Iivari 2010)

Yhdyskuntajätevesilietteen suhteen poltto ei ole tyypillisin eikä myöskään käytännöllisin lietteenkäsittelytapa. Polton käyttämistä jätevesilietteen käsittelymenetelmänä rajoittaa jätevesilietteen korkea vesipitoisuus, sen likaavuus ja sen matala lämpöarvo. Korkea vesipitoisuus ja matala lämpöarvo vaikuttavat palamislämpötilaan laskevasti, kun sen tulisi jätteenpoltoasetuksen mukaankin olla vähintään 850 °C. Lisäksi jätevedenpuhdistuksessa käytettävät epäorgaaniset kemikaalit lisäävät polttovaiheessa tuhkapitoisuutta ja aiheuttavat näin kuonan muodostumista kattilaan. (Pöyry Environment 2007)

3.5 Pyrolyysi

Pyrolyysi, eli kuivatislaus, on kuumennusprosessi, joka tapahtuu vähähappisissa olosuhteissa. Siinä orgaanisten aineiden haihtuvat yhdisteet hajoavat ja muodostavat kaasuja. Pyrolyysillä on mahdollista käsitellä termisesti kuivattua lietettä ja mädätysjäännöstä. Pyrolyysi voi olla nopeaa tai hidasta, hitaassa pyrolyysissä käsiteltävä

liete lämmitetään hitaasti 400–800 °C ja sen viipymäaika on pitkä. Nopeassa pyrolyysissä liete lämmitetään nopeasti 650 °C ja sen viipymäaika on lyhyt. Hitaassa pyrolyysissä syntyy enemmän tervaa ja hiiltä, mutta vähemmän kaasuja. Nopeassa pyrolyysissä kaasuja syntyy enemmän. (Fytili & Zabaniotou, 2008; Fonts et al., 2012)

Menetelmän hyvänä puolena on se, että sen avulla lähes kaikki prosessiin syötetty liete voidaan muuttaa käyttökelpoiseen muotoon. Menetelmän käytöstä siis syntyy vain vähäisesti jätettä. Ongelmana on menetelmien vaatimien investointien ja tekniikoiden korkea hinta. Pyrolyysin lämpötila on kuitenkin alhaisempi kuin polton lämpötila, jonka vuoksi pyrolyysissä haitallisten aineiden kaasumaiset päästöt ovat vähäisemmät. Tästä syystä savukaasupäästöjen puhdistukseen ei tarvita kalliita laitteistoja. (Inguanzo et al. 2002)

Pyrolyysin lopputuotteita voidaan hyödyntää polttoaineina ja maanparannusaineena. Saatu lopputuote riippuu siitä, onko prosessissa käytetty nopeaa vai hidasta pyrolyysia. Nopealla pyrolyysillä tuotetaan ensisijaisesti bioöljyä ja -kaasua. Hitaalla pyrolyysillä taas tuotetaan ensisijaisesti biohiiltä. (Inguanzo et al. 2002; Fonts et al. 2012)

3.6 Kemicond -käsittely

Kemicond -käsittelyllä voidaan käsitellä primäärilietettä eli raakalietettä, sakeutettua lietettä tai mädätettyä lietettä. Käsiteltävän jätevesilietteen pH-arvoa tulee alentaa käsittelyä varten, mikä voidaan toteuttaa lisäämällä lietteeseen rikkihappoa. Liette halutaan saada happamammaksi siksi, että lietteen geelimäinen rakenne hajoaa happamissa olosuhteissa. Näin myös metallisuolat, kuten rautahydroksidit- ja fosfaatit pääsevät liukenemaan. Itse käsittely tapahtuu niin, että lietteeseen lisätään vetyperoksidia, joka hapettaa lietteen. Tällöin kahdenarvoinen ferrirauta hapettuu kolmenarvoiseksi ferriraudaksi. Ferrirauta saostaa fosfaatti-ionit ferrifosfaattina. Tässä vaiheessa geelimäinen rakenne hajoaa lisää ja lietteestä vapautuu vettä. (Pöyry Environment 2007; Myllymaa et al. 2008)

Kemicond -käsittelyn jälkeen liete täytyy neutralisoida, yleensä natriumhydroksidin avulla. Lietteeseen lisätään myös polymeeriä kuivauksen tehostamiseksi. Lietteen

kuivauksessa syntyy rejektivettä, jonka fosfori- ja kiintoainepitoisuudet ovat matalammat kuin rejektivessä yleensä. Kemicond -käsittely liete on hygienisoitua ja lähes hajutonta, joten sen varastointi on helpompaa muilla menetelmillä saatuihin tuotteisiin nähden. Kemicond -käsittelyllä saatava lopputuote on rakeista ja lähes tarttumaton, jolloin sen käsittely ja kuljetus on myös helpompaa. Kemicond -käsittelyä lietettä on mahdollista kompostoida, eikä se vaadi yhtä paljon tukiainetta kuin tyypillinen, linkokuivattu liete. (Pöyry Environment 2007)

Menetelmässä käytettäviä kemikaaleja ovat rikkihappo, vetyperoksidi ja natriumhydroksidi. Nämä kemikaalit voivat muodostaa turvallisuus- ja ympäristöriskejä. Toisaalta menetelmällä on myös positiivisia ympäristövaikutuksia, sillä se vähentää lietteen hajuhaittoja ja toisaalta myös hygienisoi lietteen. Menetelmän rajoituksena ovat sen käyttökustannukset, sillä menetelmä vaatii toimiakseen useita kemikaaleja. Kemicond -käsittely lopputuote vaatii aina jatkokäsittelyn, jotta tuote voidaan saattaa käyttöön. Haastavaa on myös menetelmän operointi, sillä jokaiselle käytössä olevalle kemikaalille tulee löytää optimisyötösuhteet. Koska käsittelyssä käytetään kemikaaleja, siinä on myös työturvallisuuden liittyviä riskitekijöitä. (Iivari 2010)

3.7 Kalkkistabilointi

Kalkkistabilointi soveltuu käsittelymenetelmäksi koneellisesti kuivatulle lietteelle, jonka kiintoainepitoisuus on 18–35 % TS. Menetelmä soveltuu myös märän lietteen käsittelyyn. (Iivari 2010)

Kalkkistabiloinnissa lietteen pH-arvoa nostetaan niin korkeaksi, että lietteen biologinen toiminta lakkaa (Kusnetsov et al. 2018). Sen tulee pysyä korkeana riittävän kauan, jotta liete saadaan hygienisoitua. Kalkkistabilointiin käytetään poltettua kalkkia, mikäli käsiteltävänä on kuivattua lietettä. Kuivattua lietettä käytettäessä pH-arvo nousee yli 12 ja lämpötila yli 60 °C, kun kalkki reagoi lietteen sisältämän veden kanssa. Jos käsiteltävänä on märkä liete, käsittelyssä voidaan käyttää sammutettua kalkkia. Tällöin pH-arvo nousee, mutta lämpötilan suhteen ei tapahdu nousua. Sammutettua kalkkia voidaan käyttää myös kuivatulle lietteelle. Lopputuotteena saatava liete on hygieenistä ja sen kalsiumpitoisuus ja pH-arvo ovat korkeat. Kalkkistabiloitua lietettä voidaan käyttää

viherrakentamisessa ja maataloudessa. (Metcalf & Eddy 2003; Pöyry Environment 2007; Iivari 2010)

Ympäristöön kohdistuvia mahdollisia vaikutuksia ovat lietemäärän kasvaminen käsittelyssä, joka vaikuttaa kuljetusmäärien kasvuun. Lisäksi laitoksen tulee varautua ammoniakkin talteenottoon, mikäli kalkkia käytetään suuria määriä. (Pöyry Environment 2007)

Käyttö tulevaisuudessa lisääntynee pienillä laitoksilla ja haja-asutusalueilla. Rajoitteena se, että menetelmällä tuotettua kalkkistabiloitua lietettä on mahdollista käyttää vain kesäaikaan. Näin ollen kalkkistabilointi ei sovellu isoille laitoksille, mutta se soveltuu hyvin kohteille, joissa lietettä syntyy vain kesäaikaan. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi leirintäalueiden ja lomakyläiden jätevedenpuhdistamoiden lietteet. (Pöyry Environment 2007; Iivari 2010)

4 MÄDÄTYS KÄSITTELYTAPANA

4.1 Mädätysprosessi

Mädätys on orgaanisen aineksen anaerobista hajoamista, jonka aikaansaavat anaerobiset mikro-organismit. Mädätysprosessissa syntyvä paha haju on peräisin typpiyhdisteiden pelkistymisestä ammoniakiksi ja rikkiyhdisteiden pelkistymisestä rikkivedyksi.

Mädättäminen on biologinen käsittelytapa lietteelle. Se on entsyymiproessi, joka tapahtuu anaerobisissa olosuhteissa. Mädätysprosessissa on neljä päävaihetta, jotka etenevät ketjumaisesti siten, että ensimmäisessä vaiheessa syntyneet tuotteet ovat seuraavien vaiheiden mikrobien käytössä. Entsyymit ovat avainasemassa prosessin toiminnassa. (Palmio 2019)

Ensimmäinen vaihe on hydrolyysi, joka tapahtuu mikrobien (hydrolyyttisten bakteerien) tuottamien entsyymien aikaansaamana. Osa näistä entsyymeistä osallistuu myös mädätysprosessin seuraavaan vaiheeseen, eli asidogeneesiin. Hydrolyysissä orgaaniset polymeerit, joita bakteerit eivät pysty suoraan hyödyntämään, hajoavat pienemmiksi monomeereiksi. Tämä tapahtuu asidogeenin eli happamuutta aiheuttavan aineen solunulkoisen hydrolyyttisen entsyymin vaikutuksesta. Orgaanisten yhdisteiden hajoaminen vaatii pitkän ajan, jonka vuoksi tätä vaihetta voidaankin kutsua prosessin pullonkaulaksi. Vaiheen pitkä kesto johtuu orgaanisen aineen päällä olevasta, mikrobien erityksestä muodostuneesta solunulkoisesta polymeerisestä aineksesta (EPS), joka hidastaa hydrolyysia. Tämän takia HRT, eli hydraulinen retentioaika on pitkä ja hajoamistehokkuus matala. (Devlin et al. 2011) Mädätyksen toiminnan kannalta hydrolyysin toimintaa olisi hyvä tehostaa. Hydrolyysin toimintaa voidaan parantaa lietteen esikäsittelyllä, eli esimerkiksi termisellä käsittelyllä. (Li et al. 2019)

Toista vaihetta kutsutaan asidogeneesiksi eli happokäymiseksi. Tässä vaiheessa liukoisista orgaanisista monomeereista muodostuu biologisen reaktion kautta ammoniakin ja asidogeenisten bakteerien avulla haihtuvia rasvahappoja (VFA). Happokäymisessä muodostuu haihtuvia rasvahappoja, alkoholeja, ketoneja, hiilidioksidia

ja vettä. VFA-tuotannon lisääntyessä myös etikkahappoa muodostuu enemmän, joka johtaa myös parempaan saantiin metaanin suhteen. (Li et al. 2019)

Kolmannessa vaiheessa, eli asetogeneesissä, muodostuneet reaktiotuotteet hajoavat asetogeenisten mikrobien vaikutuksesta vedyksi, hiilidioksidiksi, asetaatiksi ja etikkahapoksi. Näin syntyy raaka-ainetta seuraavalle vaiheelle, metanogeneesille. Pieni määrä homoasetogeenisiä bakteereja käyttää hiilidioksidia ja vetyä substraatteina etikkahapon muodostamiseksi. (Li et al. 2009)

Viimeisessä vaiheessa, eli metanogeneesissä, aiemmin muodostuneet tuotteet reagoivat metaaniksi. Metanogeneesi on monimutkainen prosessi, joka tapahtuu useiden mesofiilisten bakteerilajien yhteisvaikutuksesta. Metaaniksi reagoiminen tapahtuu seuraavien reaktioyhtälöiden mukaisesti: (Li et al. 2019)



(Li et al. 2019)

Yhtälössä 1 on kuvattu asetaatti-ionin ja vedyn reaktio, jonka reaktiotuotteena syntyy metaania ja vetykarbonaatti. Yhtälössä 2 on kuvattu vetykarbonaatin ja vedyn reaktio, jonka reaktiotuotteena syntyy metaania ja vettä. Yhtälössä 3 on kuvattu metanolin reaktio hiilidioksidiksi ja vedeksi. Yhtälössä 4 on kuvattu formiaatti-ionin ja vedyn reaktio, jonka reaktiotuotteena syntyy metaania, hiilidioksidia ja vetykarbonaattia. Yhtälössä 5 on kuvattu vedyn ja hiilidioksidin reaktio, jonka reaktiotuotteena syntyy metaania ja vettä.

Anaerobisessa mädätyksessä hapen määrän rajallisuuden vuoksi iso osa mikrobeista hapettavat orgaanisia aineita ja luovat näin tasapainon hapettuville ja pelkistäville reaktioille. Metanogeenit ovat tärkein osa metaanin tuotannon kannalta, eli niiden toiminnan säilyminen on metaanin tuotannon edellytys. Metanogeenit kestävät heikosti pH-arvon vaihtelua, joten ne tarvitsevat vakaat olosuhteet. Optimaalinen pH-arvo metanogeenille on 6,5–7,5. Optimaalisen lämpötilan vaihteluväli on suurempi, sillä metanogeenisen vaiheen metanogeenit ovat mesofiilisiä bakteereja tai termofiilisiä bakteereja. (Pang et al. 2018; Zou et al. 2018; Wan et al. 2018)

Mädätys tapahtuu reaktorissa. Reaktorin valinnassa on otettava huomioon syötteen ominaisuudet ja koostumus. Mädätyksen reaktoreita jaotellaan sekoitustyyppin ja syöttötavan mukaan. Sekoitustyyppinä ovat CSTR ja tulppavirtaus, syöttötapoja ovat jatkuvatoiminen ja eräsyötteinen (Wellinger et al. 2013). Jätevedelle soveltuvia reaktorityyppejä ovat CSTR-tyypin reaktorit eli täyssekoitusreaktorit (Latvala 2009).

CSTR on jatkuvatoiminen ja täyssekoitteinen reaktori. Se on yleisin märkämädätysreaktorityyppi, jonka prosessilämpötila on 20 °C ja 37 °C välillä ja viipymäaika 20–30 päivää. Tällä reaktorityypillä sekoitus voidaan hoitaa kaasun kierrätyksellä, mekaanisilla potkureilla tai nesteen kierrätyksellä. Sekoitus voi tapahtua ajoittain tai jatkuvasti. Reaktori on vertikaalinen säiliö, jossa johdettu syöte sekoitetaan ja lämmitetään (Fardin et al. 2018). Syöttö tapahtuu esimerkiksi kerran vuorokaudessa tai kerran tunnissa. Reaktorityypin haittapuolena on pitkä retentioaika, mikä johtuu siitä, että järjestelmästä poistuu jatkuvasti aktiivista biomassaa. (Wang et al. 2010)

UASB- ja EGSB- reaktorit ovat anaerobisia reaktoreita, jotka perustuvat granuloitumiseen (Wang et al. 2010). UASB-reaktorissa säiliön alaosaan johdetaan jätevedettä ja se virtaa reaktorissa ylöspäin. Lietepatjassa on granuloita, jotka muodostuvat mikrobeista. Painonsa vuoksi ne eivät huuhtoudu virran mukana ylöspäin, vaan pysyvät paikoillaan patjassa. Lietekerroksessa olevat mikro-organismit hajottavat orgaanisia yhdisteitä, jolloin muodostuu metaania ja hiilidioksidia. Sekoitusta tapahtuu nousevien kuplien vaikutuksesta. Kun jätevesi on selkeytynyt, se johdetaan ulos reaktorin yläosasta. (Tilley et al. 2014) Granuloiden viipymäaika on pidempi, kuin jäteveden. (Kymäläinen & Pakarinen 2015). EGSB (Expanded granular sludge bed) on reaktori, jossa on UASB-

yksikkö. Siinä on laajentuva leijupeti. Menetelmä soveltuu mataliin (jopa 10 °C) ja korkeisiin lämpötiloihin. Suurilla lastausnopeuksilla menetelmän hyötysuhde on korkea, ja sitä voidaan käyttää myös haastaville ja jopa myrkyllisille syötteille. Biomassan ja substraatin kontaktiin saattamiseksi käytetään ylöspäin suuntautuvaa, korkeaa virtausnopeutta. (Wang et al. 2010)

4.2 Mädätyksen hyödyt ja haitat

Mädätys on yleisimpiä ja vanhimpia kehitellyistä lietteenkäsittelymenetelmistä, joten siitä löytyy runsaasti käyttökokemusta. Prosessiin kuluu vähän energiaa ja sen avulla saadaan tuotettua stabiilia lietettä. Prosessissa syntyvää metaania voidaan käyttää energiantuotantoon. (Metcalf & Eddy 2003) Primäärilietteen mädätys on helpompaa, kuin sekundäärilietteen (Forster & Lafitte-Trouqué 2002).

Patogeenien hajoamisessa on eroja riippuen siitä, toteutetaanko mädätys mesofiilisesti vai termofiilisesti. Mesofiilisessä mädätyksessä lämpötila on niin alhainen, että lietteessä olevat patogeenit eivät tuhoudu. Mesofiilisesti mädätetyssä lietteessä on siis korkeammat patogeenipitoisuudet, kuin esimerkiksi kompostoidussa lietteessä. Termofiilisessä mädätysprosessissa lämpötila on korkeampi ja käsittely tuhoaa patogeeneja tehokkaasti. Termofiilisesti käsitelty liete täyttää lannoitevalmistelaisissa säädetyt hygieniavaatimukset. (Tontti et al. 2012)

Kun vertaillaan erityyppisiä lietteenkäsittelymenetelmiä, mädätyksellä ravinteet säilyvät parhaiten. Mädätyksellä kierrätysravinteeksi saadaan fosforille jopa 100 % ja typelle 99,9 %. Vertauksena, esimerkiksi kompostoinnilla kierrätysravinne fosforille on noin 57 % ja typelle 56 %. Haasteena on kuitenkin fosforin talteenotto. Mädätyksen jälkeen puhdistamolietteestä poistetaan vielä vettä, jota kutsutaan rejektivedeksi. Tämä rejektivesi sisältää suuria pitoisuuksia fosforia. Rejektivedestä fosforia voidaan ottaa talteen useilla erilaisilla menetelmillä. Osa näistä tekniikoista perustuu ammoniumin kiteyttämiseen magnesiumin avulla. Lisäksi mädätyksellä on muihin käsittelytapoihin verrattuna selkeästi pienin kokonaishiilijalanjälki. Pieni hiilijalanjälki perustuu siihen, että mädätysprosessissa sähköä ja lämpöä syntyy ylimäärä. Lisäksi käsittelytavan vaatima energia on suhteellisen vähäinen verrattuna siitä saatuun energiaan. (Ruuhela 2017)

Anaerobinen mädätys on taloudellisin tapa käsitellä jätevesilietettä biokaasuksi. Lisäksi prosessissa metaanin ja hiilidioksidin talteenotto on lähes täydellistä, jolloin ilmakehään ei käytännössä päädy päästöjä. (Bonoli et al. 2011)

Anaerobinen mädätys tarjoaa menetelmän, jolla voidaan vähentää jätevesilietteen käsittelyn päästöjä, kun samalla saadaan biokaasua, jota voidaan käyttää uusiutuvana energianlähteenä. Kuitenkin menetelmällä on myös haasteensa. Yksi haasteita luova tekijä on ammoniakki. Ammoniakkia syntyy typpipitoisen aineen biologisen hajoamisen seurauksena ja sitä esiintyy vapaana ammoniakkina (FA) sekä ammoniumionina. (Kayhanian 2010) Ammoniakin läsnäolo on välttämätöntä bakteerien toiminnan kannalta, mutta konsentraation noustessa suureksi se häiritsee prosessia ja toimii mädätyksessä inhibiittorina. Yleisesti arvioidaan, että sopiva ammoniumpitoisuus on alle 200 mg/l, typen ollessa välttämätön ravintoaine anaerobisille mikro-organismeille. (Liu & Sung 2002) Vapaan ammoniakin on arvioitu olevan pääasiallinen inhibition syy, sillä se kykenee läpäisemään solukalvon vapaasti (Kroeker et al. 1979). Ongelmaa voidaan vähentää pH-arvon ja lämpötilan säätelyllä ja esimerkiksi immobilisoimalla mikro-organismeja (Chen et al. 2008). Vapaan ammoniakin konsentraatio kasvaa pH-arvon noustessa. Toisaalta ammoniakin aiheuttama prosessin epästabiilius voi johtaa haihtuvien rasvahappojen (VFA) syntymiseen, mikä aiheuttaa pH-arvon laskua ja sitä kautta FA:n määrän laskua. Näin ollen pH-arvon, FA:n ja VFA:n vuorovaikutus voi johtaa ns. ”inhiboituun stabiiliin tilaan”, jossa prosessi kyllä toimii vakaasti, mutta metaanisaanto on pienempi. (Chen et al. 2008) Eryityisesti metanogeenit sietävät ammonium-inhibitiota heikosti ja se vaikuttaa niiden kasvuun (Kayhanian 1994).

Termofiilisen mädätyksen haasteet liittyvät ammoniakki-inhibition, sillä korkeampi lämpötila altistaa sille. Tämän vuoksi termofiilinen mädätys vaatii tarkempaa optimointia ja monitorointia. Termofiilisen mädätyksen etuna olisi se, että lopputuotteena saatava mädätysliete olisi hygienisoitua. (Dhar et al. 2020) Ammoniakkii-inhibition lieventämisessä ammoniakin strippaus on osoittautunut tehokkaaksi menetelmäksi. Strippauksessa on tärkeää kiinnittää huomioita olosuhteisiin, eli pH-arvoon, lämpötilaan ja kaasun virtausnopeuteen, sillä ne vaikuttavat suuresti ammoniakin poistonopeuteen ja vaikuttavat näin prosessin taloudellisuuteen. Ammoniakin strippaus on fysikaaliskemiallinen menetelmä, jossa ammoniakki poistetaan mädätteen nestefaasista

kaasuvirtauksen avulla. Strippauksen haasteena on kolonniin likaantuminen, jolloin ne myös vaativat puhdistusta. Lisäksi alkalien lisääminen mädätteeseen sen pH:n nostamiseksi voi johtaa liialliseen alkalikationin kerääntymiseen. Tämä taas voi estää mikrobien kasvua ja metaanin tuotantoa sekä aiheuttaa vaahtoutumista, joka puolestaan vaikuttaa prosessin toimintaan. (Liu et al. 2022)

Yksi mädätykseen liittyvä haaste on lopputuotteena saatavan mädätysjäännöksen haitta-ainepitoisuudet. Joissakin tapauksissa mädätysjäännös voi sisältää esimerkiksi lääkkeitä tai mikromuoveja, jotka eivät ole hajonneet mädätysprosessissa. Tällaisia haitta-aineita sisältävän mädätteen päästäminen ympäristöön on ympäristölle haitallista. Mädätteen laatua ja sen eri aineiden pitoisuuksia testataan ja sen tulee täyttää tietyt laatuvaatimukset. Koska laboratoriossa käytettävien testien havaintoraja on aika korkea, ne eivät välttämättä luotettavasti havaitse ympäristölle haitallisia pitoisuuksia mädätteessä. Lisäksi tietyt haitta-aineet varastoituvat maaperän orgaaniseen ainekseen pitkäksi aikaa. Pitkä-aikaisvaikutusten arviointi voi olla haastavaa. (Fjäder 2016)

4.3 Mädätyksen lopputuotteet

Mädätyksen lopputuotteena syntyy biokaasua ja ravinnerikasta mädätysjäännöstä. Biokaasua voidaan hyödyntää energiana ja se on ekologinen vaihtoehto fossiilisille polttoaineille. Sitä voidaan käyttää liikenteen polttoaineena, mutta myös esimerkiksi lämmön ja sähkön tuotantoon. (Horn et al. 2020) Biokaasu koostuu pääasiassa metaanista ja hiilidioksidista, mutta pieniä määriä happea ja typpeäkin esiintyy. Tyypillisesti metaanin osuus biokaasussa on 55–65 %. (Rasi 2009) Mädätysjäännökseen jää kaikki käsiteltäväksi tulleen lietteen ravinteet (Ruuhela 2017).

Mädätysjäännöksestä voidaan valmistaa maanparannusainetta, lannoitetta ja sitä voidaan käyttää viherrakentamiseen. Näin lietteessä olevat hyödylliset ja arvokkaat ravinteet saadaan kiertoon. Käyttöä säätelee kuitenkin maa- ja metsätalousministeriön lannoitevalmisteasetukset. Näissä on määritelty esimerkiksi hygieeniset laatuvaatimukset ja suurimmat sallitut raskasmetallipitoisuudet. Jotta lietettä voidaan käyttää esimerkiksi lannoitteena, sen täytyy ylittää näihin kriteereihin. Koska lietepohjaiset lannoitteet luokitellaan maanparannusaineiksi, niiden valmistajalla tulee olla myös Eviran

laitoshyväksyntä. (Horn et al. 2020) Myös biohiilen valmistamisen mahdollisuutta mädätysjäännöksestä tutkitaan.

Mädättämöllä tuotetusta biokaasusta saadaan energiaa laitosten omaan käyttöön tai sitä voidaan myös myydä. Karkea tapa arvioida jätevesilietteestä saatavaa biokaasun määrää on arvioida sitä sen perusteella, kuinka monen henkilön jätevedet puhdistamolle tulee puhdistettavaksi. Arviointi voidaan tehdä yhtälöön 6 perustuen.

$$28 m^3 / 1000as. \times d \tag{6}$$

Jossa as. tarkoittaa asukasmäärää ja d vuorokautta.

(Kiviluoma-Leskelä 2010)

Biokaasu soveltuu käytettäväksi energiantuotannossa sen suuren metaanipitoisuuden vuoksi. Metaanilla on suuri energiasisältö. Biokaasua voidaan käyttää sähkön ja lämmön tuotannossa ja lisäksi liikennepolttoaineena. Jätevesilietteestä valmistettu biokaasu voi sisältää kosmetiikkatuotteista peräisin olevia siloksaaneja, jotka hankaloittavat tuotteen moottorikäyttöä. Lisäksi huomioon on otettava metaanin voimakas kasvihuonevaikutus, jonka vuoksi biokaasun käsittelyssä ja varastoinnissa on huolehdittava, ettei metaani pääse purkautumaan ilmaan. Mikäli biokaasu halutaan käyttää liikenteessä polttoaineena, se täytyy ensin puhdistaa. Yleisin puhdistustapa on vesipesu, jossa biokaasu syötetään vesikolonneihin 7–9 bariin paineessa. Vesikolonissa biokaasun sisältämä hiilidioksidi sitoutuu veteen. Vesipesun jälkeen biokaasusta poistetaan kosteus, jonka jälkeen se paineistetaan 200–300 bariin ja varastoidaan. Puhdistetun kaasun metaanipitoisuus on noin 95 %. Suomessa liikennekäyttö on vielä vähäistä harvasta tankkausverkostosta ja ajoneuvokannasta johtuen. Biokaasun lämmityskäytössä investointikustannukset ovat pienet. Lämmitysprosessissa ensimmäinen vaihe on vedenerotus, josta kaasu ohjataan matalassa paineessa kaasupolttimille. Lämmöntuotannon hyötysuhde voi olla jopa 95 %. Sähköntuotantoa varten biokaasua voidaan joutua käsittelemään lisää, riippuen biokaasun koostumuksesta. Siitä voidaan joutua poistamaan rikkiä ja syloksaaneja. Sähköntuotannon hyötysuhde vaihtelee välillä 25–40 %. (Latvala 2009)

Mädätysjäännöstä, eli mädätettä voidaan joko hyödyntää sellaisenaan tai sitä voidaan jatkojalostaa. Syötteen sisältämästä orgaanisesta timestä osa mineralisoituu, jolloin se on helpommin kasvien käytettävissä. Mädätysjäännöksestä voidaan separoida sen sisältämä kiintoaines ja neste. Tällöin suurin osa mädätysjäännöksen fosforista päätyy kuivajakeeseen ja vastaavasti timestä nestejakeeseen. Nestejake voidaan käyttää peltolevitykseen sellaisenaan, palauttaa prosessiin laimennusvedeksi tai sitä voidaan jatkojalostaa väkevämmäksi. Separoitua mädätysjäännöstä on helpompi kuljettaa ja käsitellä. (Haapala et al. 2023)

Kun mädätettä käytetään maanparannusaineena, sen sisältämät ravinteet pääsevät takaisin kiertoon. Talvella mädätteen käyttö maanparannusaineena on vähäisempää, mutta esimerkiksi keväisin sitä käytetään pelloilla lannoitteena. Mahdollisia käyttökohteita ovat mm. viherrakentaminen, eroosion estäminen ja maisemointi. Viherrakentamiseen mädätettä käytetään esimerkiksi rakennusalueilla, kun uusien rakennusten pihalle istutetaan nurmea. Mädäte toimii hyvin nurmen ja erilaisten istutuskasvien kasvualustana. Mädätettä hyödynnetään maataloudessa lannoitevalmisteenä. Vuonna 2008 Suomessa noin 10 % lietteestä käytettiin maatalouskäyttöön. Mädäte esimerkiksi nostaa maaperän humuspitoisuutta sekä parantaa maaperän rakennetta. Mädäte sisältää runsaasti ravinteita, jonka vuoksi se on hyvä lannoite. (Lietteen käyttöä lannoitteena säätelee lannoitevalmistelaki sekä käyttöä maataloudessa valtioneuvoston päätös puhdistamolietteen käytöstä maanviljelyksessä (282/1994).) Mädätettä voidaan käyttää myös metsälannoitteena. Metsälannoitus voi olla kasvatuslannoitusta tai terveyslannoitusta. Terveyslannoituksessa lannoitteen avulla poistetaan kasvua rajoittava minimitekijä, jolloin metsä saa enemmän ravinnetta ja alkaa kasvaa paremmin. Kasvatuslannoituksen tavoitteena on tehostaa metsänkasvua ja näin saada suurempaa tuottoa nopeammin kasvavasta metsästä. Toisaalta nopeammin kasvava metsä lisää hiilen sitoutumista. (Seppänen 2011) Eroosion estämiseen ja maisemointiin käytettävä mädäte useimmiten kompostoidaan ennen käyttöä. Eroosion estämiseen mädätteestä saatua kompostia voidaan käyttää alueilla, joissa sadevesi aiheuttaa eroosiota. Komposti levitetään tällaiselle alueelle ja sen teho perustuu sen kykyyn imeä vettä ja kuljettaa sitä niin, ettei se muodosta noroja. Maisemointiin puhdistamolietteestä saatua kompostia käytetään esimerkiksi vanhoilla soranottoalueilla, jotka halutaan saada takaisin kasvien käyttöön. (Luostarinen et al. 2019)

Yksi mahdollinen käyttötapa mädätteelle on jatkojalostaa sitä biohiileksi. Mädätteen jatkokäsittely tapahtuu pyrolyysillä. Pyrolyysin avulla mädätteestä saadaan poistettua siinä olevat orgaaniset haitta-aineet ja mikromuovit. Biohiiltä voidaan käyttää esimerkiksi lannoitteena. Kun puhutaan puhdistamolietteestä jalostetusta biohiilestä, se poikkeaa koostumukseltaan puu- ja kasvibiomassaisesta hiilituotteesta. Lietebiohiilen hiilipitoisuus on 20 % ja tuhkapitoisuus 80 %, kun biohiilellä hiilipitoisuus on 70 % ja tuhkapitoisuus 30 %. Ravinteiden suhteen lietebiohiileen päätyi typestä 20–30 % ja fosforista 100 %. Tutkimustulokset lietebiohiilen lannoiteominaisuuksista vaikuttavat hyviltä, mutta lisää tutkimuksia tarvitaan. (Elo et al. 2020)

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Jätevesilietteitä syntyy Suomessakin vuosittain valtavia määriä ja niiden käsittelemättä jättäminen olisi mielestäni käytettävissä olevien resurssien hukkaan heittämistä. Jätevesiliete sisältää merkittäviä määriä kallisarvoisia ravinteita, joita voidaan hyödyntää maa- ja metsätaloudessa. Lisäksi jätevesilietteitä voidaan hyödyntää energiantuotannossa. Yhteiskuntamme kasvavan energiankulutuksen vuoksi on siis tärkeää hyödyntää saatavilla oleva energia. Jätevesilietteen käsittelyssä muodostuvan biokaasun avulla voidaan myös vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä liikennepolttoaineena, minkä vuoksi on erityisen tärkeää tutkia lietteiden tehokkaampaa hyödyntämistä.

Kiertotalous on talousmalli, jonka tavoitteena on hillitä luontokatoa, ilmastokriisiä ja luonnonvarojen ylikulutusta (Euroopan parlamentti 2023). Jätteen käsittely ja niiden mahdollinen jatko- ja hyödyntäminen on kiertotaloudessa oleellista, minkä vuoksi myös jätevesilietteiden onnistunut ja tehokas käsittely on kiertotalouden toteutumisen kannalta merkittävää. Mädätys on jätevesilietteen käsittelytapana edullinen ja tehokas, sillä se kuluttaa vähän energiaa. Koska menetelmän hiilijalanjälki on matala, menetelmän uskoisi säilyttävän paikkansa ihan jo hiilineutraaliustavoitteiden vuoksi.

Jätevesilietteen käsittelyyn on olemassa erilaisia tapoja, kuten esimerkiksi mädätys, kompostointi, poltto, terminen kuivaus ja pyrolyysi. Usein jätevesilietteen käsittelyssä joudutaan käyttämään hyödyksi useampaa käsittelytapaa, esimerkiksi mesofiilisesti mädätetty jätevesiliete täytyy jatkokäsittellä, jotta se täyttäisi puhtausstandardit. Jatkokäsittely voidaan toteuttaa esimerkiksi kompostoinnilla tai pyrolyysilla, mutta jatkokäsittely vaatii tietysti lisää resursseja ja lisää energiaa, mikä myös lisää käsittelyn aiheuttamaa ympäristökuormitusta ja näin ollen tuotteen hiilijalanjälki kasvaa. Termofiilisesti mädätetty liete taas on hygienisoitua eikä se vaadi jatkokäsittelyä.

Yksinkertaisempaa olisi siis käsitellä jätevesiliete termofiilisesti. Termofiiliseen mädätykseen liittyy kuitenkin tiettyjä haasteita. Termofiilisessä käsittelyssä lämpötila on korkeampi kuin mesofiilisessä käsittelyssä, jolloin ilmiö nimeltä ammoniakki-inhibitio yleistyy. Tämän seurauksena prosessin stabiilius heikkenee ja prosessi vaatii enemmän optimointia. (Dhar et al. 2020) Ammoniakin määrää voidaan vähentää esimerkiksi

strippauksella, mutta se tietysti monimutkaistaa prosessia ja tekee siitä myös taloudellisesti kalliimpaa. Tämän vuoksi mesofiilinen mädätys on edelleen huomattavasti yleisempää, kuin termofiilinen mädätys.

Pitkä käyttökokemus mädätyksestä menetelmänä helpottaa sen kehitystä tulevaisuudessa. Luultavasti tulevaisuuden yhtenä kehityskohtana on termofiilisen mädätyksen kehittäminen niin, että sen käyttö jätevesilietteiden käsittelyssä helpottuu. Jos termofiiliseen mädätykseen liittyvät ongelmat saataisiin ratkaistua, mädätyksen jo valmiiksi korkea soveltuvuus jätevesilietteiden käsittelyyn kasvaisi entisestään, koska termofiilisella mädätyksellä käsitellyttä lietettä ei tarvitse enää jatkokäsitellä. Haasteena termofiilisessä mädätyksessä kuitenkin on se, miten prosessi saadaan toimimaan mahdollisimman tehokkaasti ja niin, etteivät sen kustannukset nouse korkeiksi. Varmaa on, että mädätyksellä on tulevaisuudessakin merkittävä rooli jätevesilietteiden käsittelyssä.

LÄHDELUETTELO

Bonoli M., Caputo A., Salomoni C. Francioso O., Rodriquez-Estrada M.T., Palenzona D. 2011. Enchanged methane production in a two-phase anaerobic digestion plant, after CO₂ capture and addition to organic wastes. *Bioresource Technology*, 102 (11) S. 6443-6448. [Viitattu 28.4.2024] Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.079>

Chen Y., Cheng J., Creamer K. 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: Review. *Bioresource Technology*, 99 (10) S. 4044-4064. [Viitattu 26.4.2024] Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>

Devlin D.C., Esteves S.R.R., Dinsdale R.M., Guwy A.J. 2011. The effect of acid pretreatment on the anaerobic digestion and dewatering of waste activated sludge. *Bioresource Technology*, 102 (5) S. 4076-4082. [Viitattu 25.4.2024] Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.043>

Dhar B.R., Al-Mamun A., Lin L., Ruye J., Kakar F.L., Elbeshbishy E. 2020. A critical review of conventional and emerging methods for improving process stability in thermophilic anaerobic digestion. *Energy for Sustainable Development*, 54 S.72-84. [Viitattu 27.4.2024] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.11.001>

Elo A., Kymäläinen M. 2020. Biohiilellä monia kytkentöjä biokaasun tuotantoon. *Suomen biokierto ja biokaasu* 1/2020 S. 8-9. [Viitattu 29.4.2024] Saatavissa: https://biokierto.fi/wp-content/uploads/2020/11/Biokierto-ja-Biokaasu_01_2020.pdf

Euroopan unionin neuvosto 2023. *Neuvostolta kanta uusiin sääntöihin yhdyskuntajätevesien tehokkaammasta käsittelystä*. Euroopan unionin neuvoston lehdistötiedote 756/23. [Viitattu 19.4.2024] Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2023/10/16/council-adopts-position-on-new-rules-for-a-more-efficient-treatment-of-urban-wastewater/>

Euroopan parlamentti 2023. *Mitä kiertotalous on ja miksi sillä on merkitystä?* [Viitattu 23.5.2024] Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20151201STO05603/mita-kiertotalous-on-ja-miksi-silla-on-merkitysta>

Fardin, J.F., de Barros, O., & Dias, A.P.F. 2018. *Biomass: some basics and biogas*. Teoksessa: Yahyaoui, I. (toim.) *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*. Amsterdam: Elsevier Science, S. 1-37. ISBN 978-0-12-813185-5.

Iivari P. 2010. *Yhteispuhdistamon lietteiden käsittely – vaihtoehtoselvitys* [verkkodokumentti] Helsinki: FCG OY. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Ylasavonpuhdistamo_arviointiselostus_Liite_5.pdf [Viitattu 13.4.2024]. 14 s.

Fjäder P., 2017. *Yhdyskuntajätevesilietteiden maatalouskäytön ja viherrakentamisen riskit* [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. 43/2016. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/8eb583d7-04a9-4ca2-8c58-f03d5bdee0fe/content> [Viitattu 23.4.2024]. 65 s.

Fonts I., Gea G., Azuara M., Abrego J., Arauzo J. 2012. Sewage sludge pyrolysis for liquid production: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (5) S. 2781–2805 [Viitattu 12.4.2024]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.070>

Forster C.F., Lafritte-Trouqué S. 2002. The use of ultrasound and γ -irradiation as pre-treatments for the anaerobic digestion of waste activated sludge at mesophilic and thermophilic temperatures. *Bioresource Technology* 84 (2) S. 113-118 [Viitattu 22.4.2024] Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00038-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00038-X)

Fytli, D., Zabaniotou A. 2008. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (1) S.116-140 [Viitattu 5.4.2024] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.014>

Haapala H., Luostarinen S., Tampio E., Lehtoranta S., Valve H., Laakso J., Rasi S., Pyykkönen V., Markkanen J., Heikkinen J., Winquist E., Lång K., Timonen K., Silfver T. 2023. *Kestävät käytännöt biokaasutuotannossa* [verkkodokumentti]. Helsinki: Valtioneuvosto. 32/2023. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164889/VNTEAS_2023_32.pdf?sequence=7&isAllowed=y [Viitattu 28.4.2024] 176 s.

Horn S., Seppänen A-M., Winquist E., Lehtoranta S., Luostarinen S. 2020. *Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen hyödyntämismuutokset - vaihtoehtojen ilmastovaikutukset ja taloudellisuus* [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen Ympäristökeskus. 42/2020. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/5cf956be-b620-43de-9c12-86e0d84b574e/content> [Viitattu 29.4.2024] 44 s.

Inguanzo M., Dominguez A., Menendez J.A., Pis J.J., Blanco C.G. 2002. On the pyrolysis of sewage sludge: the influence of pyrolysis conditions on solid, liquid and gas fractions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 63 (1) S. 209-222. [Viitattu 24.4.2024] Saatavilla: [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(01\)00155-3](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(01)00155-3)

Kangas A., Lund C., Liuksia S., Arnold M., Merta A., Kajolinna T., Carpen L., Koskinen P., Ryhänen T. 2011. *Energiätehokas lietteenkäsittely* [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen Ympäristökeskus. 17/2011. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/db26108a-48f5-4bfe-b2f9-1eaa13ad0137/content> [Viitattu 20.4.2024] 93 s.

Karttunen, E. 2004. RIL 124-2 Vesihuolto II. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto, RIL R.Y. 684 s.

Kayhanian, M. 1999. Ammonia Inhibition in High-Solids Biogasification: An Overview and Practical Solutions. *Environmental Technology*, 20 (4) S. 355–365. [Viitattu 15.4.2024] Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/09593332008616828>

Kayhanian, M. 1994. Performance of high-solids anaerobic digestion process under various ammonia concentrations. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 59 (4) S. 349-352. [Viitattu 26.4.2024]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1002/jctb.280590406>

Kiviluoma-Leskelä 2010. *Biokaasun tuottaminen ja hyödyntäminen Lappeenrannassa*. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/63152/nbnfi-fe201006212074.pdf?sequence=3> [Viitattu 25.4.2024]

Kustnetsov J., Pitkänen T., Vieno N., Sarvi M., Salo T., Rämö S., Ylivainio K. 2018. *Puhdistamolietteen sisältämien haitta-aineiden aiheuttamat riskit lannoitekäytössä*. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 58/2018. Saatavissa: https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/543281/luke-luobio_58_2018.pdf?isAllowed=y&sequence=1 [Viitattu 12.4.2024] 129 s.

Kymäläinen, M., Pakarinen, O. 2015. *Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen*. [verkkodokumentti] Suomen Biokaasuyhdistys ry. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/104180/HAMK_Biokaasun_tuotanto_2015_ekirja.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Viitattu 29.4.2024] 204 s.

Latvala M. 2009. *Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) – Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä* [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen Ympäristökeskus. 24/2009. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/2a5c5d06-add0-4eb9-89d9-7de9bcd7d7c0/content> [Viitattu 27.4.2024] 111 s.

Li Y., Chen Y., Wu J. 2019. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. *Applied Energy*, 240 S. 120-137. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.243>

Liu T., Sung S. 2002. Ammonia inhibition on thermophilic aceticlastic methanogenes. *Water Science & Technology* 45 (10) S. 113-120. Saatavissa: <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0304>

Liu R., Zhu X., Yellezuome D., Wang Z. 2022. Mitigation of ammonia inhibition in anaerobic digestion of nitrogen-rich substrates for biogas production by ammonia stripping: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 157. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112043>

Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous G., Stensel H.D., Tsuchihashi R., Burton F.L. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4. painos, New York: McGraw-Hill Education, 1819 s. ISBN: 978-0073401188

Myllymaa T., Moliis K., Tohka A., Rantanen P., Ollikainen M., Dahlbo H. 2008. *Jätteiden kierrätyksen ja polton käsittelyketjujen ympäristökuormitus ja kustannukset* [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. 28/2008. Saatavissa:

<https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/0c1bf200-e9c0-4d6c-a913-5be7cc1a0d6b/content> [Viitattu 12.4.2024] 79 s.

Palmio A. 2019. *Anaerobinen mädätys – arvon luominen jätteestä*. Vaisala. Saatavissa: <https://www.vaisala.com/fi/blog/2023-08/anaerobinen-madatys-arvon-luominen-jatteesta> [Viitattu 18.4.2024]

Pang L., Ge L., Yang P., He H., Zhang H. 2018. Degradation of organophosphate esters in sewage sludge: Effects of aerobic/anaerobic treatments and bacterial community compositions. *Bioresource Technology* 255 S. 16-21. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.104>

Pelto-Huikko A., Vieno N. 2009. *Vesikoulu – Tietopaketti jätevedestä, sen puhdistuksesta ja ympäristövaikutuksista Suomessa* [verkkodokumentti]. Rauma: Vesi-Instituutti WANDER/Prizztech Oy. Saatavissa: https://www.vesikoulu.fi/assets/docs/vesikoulu_tietopaketti_jatevedesta.pdf [Viitattu 8.4.2024] 16 s.

Pöyry Environment Oy 2007. *Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukyky- selvitys* [verkkodokumentti]. Helsinki: Sitra. Saatavissa: <https://media.sitra.fi/app/uploads/2017/02/LietteenkC3A4sittely-2.pdf> [Viitattu 9.4.2024]. 52 s.

Ruuhela S. 2017. Puhdistamolietteen käsittelyn hankinnan laatukriteerien kehittäminen [verkkodokumentti]. Helsinki: Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus 18/2017. Saatavissa: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/136226/Raportteja_18_2017.pdf?sequence=10&isAllowed=y [Viitattu 28.4.2024]. 70 s.

Ramboll Finland Oy, 2023. *Yhdyskuntien jätevesien ravinteiden talteenoton menetelmäselvitysraportti* [verkkodokumentti]. Espoo: Ramboll Finland Oy. Saatavissa: https://ym.fi/documents/1410903/73050749/Yhdyskuntien+j%C3%A4tevesien+ravinteiden+talteenoton+menetelm%C3%A4selvitys_raportti+28.4.2023.pdf/07a08a7f-713b-3160-2534-fa65c8d65f6c/Yhdyskuntien+j%C3%A4tevesien+ravinteiden+talteenoton+menetelm%C3%A4selvitys_raportti+28.4.2023.pdf?t=1683646440065. [Viitattu 24.4.2024]. 89 s.

Rasi, S., 2009. *Biogas Composition and Upgrading to Biomethane*. Thesis (PhD). Jyväskylän yliopisto. Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/20353/9789513936181.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Seppänen, A-M; Luostarinen, S., Pesonen, L. 2019. *Kierrätyslannoitus – Suunnittelu, käytännöt ja mahdollisuudet tulevaisuudessa*. Helsinki: Luonnonvarakeskus (Luke). Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-759-6>

Seppänen, J., 2011. *Metsänlannoitus -Tuottava sijoitus*. Opinnäytetyö. Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsätalouden koulutusohjelma. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/28124/Valmis%20oppari.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Viitattu 23.4.2024]

Smith, S. R. 2009. Organic contaminants in sewage sludge (biosolids) and their significance for agricultural recycling. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 367 (1904). S. 4005-4041. [Viitattu 15.4.2024] Saatavissa: <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0154>

Säylä, J., 2003. *Yhdyskuntien jätevesien puhdistus* [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen Ympäristökeskus. 35/2015. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/17dda8b9-4644-413f-89c2-41930f1533a2/content> [Viitattu 19.4.2024] 26 s.

Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, Ph. & Zurbrügg, C., 2014. *Compendium of sanitation systems and technologies*. 2. painos. Dübendorf: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). Dübendorf, Switzerland. 176 s. ISBN 9783906484570.

Tontti, T., Kangas A. & Högnäsbacka M., 2012. *Yhdyskuntajäteperäiset orgaaniset lannoitevalmisteet ravinnelähteenä – tuloksia syys- ja kevätiljan peltokokeilta* [verkkodokumentti]. Espoo: Suomen Maataloustieteellinen seura ry, 28. Saatavissa: <https://journal.fi/smst/article/view/75650/37050>. [Viitattu 30.4.2024]

Vilpanen, M., Toivikko, S. 2017. *Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus* [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen vesilaitosyhdistys ry. 46/2017.

Saatavissa: https://www.vvy.fi/site/assets/files/1621/yhdyskuntalietteen_ka_sittelyn_ja_hyo_dynta_misen_nykytilannekatsaus_26092017.pdf [Viitattu 28.4.2024]

Wan, J., Yuhang J., Rao, Y., Zhang S., Luo, G. 2018. Thermophilic Alkaline Fermentation Followed by Mesophilic Anaerobic Digestion for Efficient Hydrogen and Methane Production from Waste-Activated Sludge: Dynamics of Bacterial Pathogens as Revealed by the Combination of Metagenomic and Quantitative PCR Analyses. *Applied and Environmental Microbiology*, 84 (6).

Saatavissa: <https://journals.asm.org/doi/full/10.1128/aem.02632-17> [Viitattu 23.4.2024]

Wang, L.K., Tay, J-H., Tay, S.T.L., Hung, Y-T. 2010. *Environmental bioengineering. Handbook of environmental engineering, 11*. New Jersey: Humana press. 867 s.

Wellinger, A., Murphy, J D., Baxter, D., Braun, R. 2013. *The biogas handbook: Science, production and applications*. Woodhead Publishing in Energy, 52. 476 s.

Yu, Z., Xu, X., Li, L., Yang, F., Zhang, S., 2018. Enhancing methane production from *U. lactuca* using combined anaerobically digested sludge (ADS) and rumen fluid pre-treatment and the effect on the solubilization of microbial community structures. *Biosource Technology*, 254. S. 83–90. [Viitattu 29.4.2024]