

Energiatehokas lietteenkäsittely

**Ari Kangas, Charlotta Lund, Saku Liuksia,
Mona Arnold, Elina Merta, Tuula Kajolinna,
Leena Carpén, Pertti Koskinen ja
Tapio Ryhänen**

YMPÄRISTÖN-
SUOJELU

Energiatehokas lietteenkäsittely

**Ari Kangas, Charlotta Lund, Saku Liuksia,
Mona Arnold, Elina Merta, Tuula Kajolinna,
Leena Carpén, Pertti Koskinen ja
Tapio Ryhänen**

Helsinki 2011

SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS



S Y K E

SUOMEN YMPÄRISTÖ 17 | 2011
Suomen ympäristökeskus
Kulutuksen ja tuotannon keskus

Taitto: Pirjo Lehtovaara

Kansikuva: Risto Saarinen

Julkaisu on saatavana vain internetistä:
www.ymparisto.fi/julkaisut

ISBN 978-952-11-3907-9 (PDF)
ISSN 1796-1637 (verkkokj.)

ALKUSANAT

Tämä tutkimusraportti on tuotettu SYKE:n ja VTT:n yhteisessä tutkimusprojektissa "TERMOS – Energiatehokas lietteenkäsittely", jossa selvitettiin jätevesilietteiden energiatehokkaita käsittelytapoja. Tutkimustyö suoritettiin vuosina 2008 - 2011 ja koostui sekä kokeellisesta työstä että järjestelmäanalyysistä.

Tutkimusraportin ovat laatineet SYKEltä Ari Kangas, Charlotta Lund ja Saku Liukka sekä VTT:ltä Mona Arnold, Elina Merta, Tuula Kajolinna, Leena Carpén (luku 7.4.7 sekä liite 1 ja liite 6), Pertti Koskinen (luku 7.4.7 sekä liite 1 ja liite 6) ja Tapio Ryhänen (luku 9). Tutkimustyöhön ovat osallistuneet SYKEltä lisäksi Matti Valve, Timo Laaksonen ja Taimi Määttä. Myös HSY:n Suomenojan jätevedenpuhdistamon henkilökunta on avustanut tutkimustyössä. FCG Finnish Consulting Group Oy:stä työhön ovat osallistuneet Ari Niemelä, Anna Kuokkanen ja Jussi Lindholm.

Tutkimusta ovat rahoittaneet Tekes, Maa- ja Vesitekniikan tuki ry (MVTT), Biovakka Suomi Oy, Ekokem Oy Ab, Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY (entiset Espoon Vesi ja Helsingin Vesi), Hämeenlinnan Seudun Vesi Oy, Kuopion Vesi, Lahti Aqua Oy, Mikkelin vesilaitos, Tampereen Vesi ja Vesihuoltolaitosten kehittämisrahasto.

Tutkimusprojektin johtoryhmään ovat kuuluneet projektin aikana Saijariina Toivikko (VVY, puheenjohtaja), Jyri Seppälä (SYKE), Jukka Lehtomäki (VTT), Outi Tuovila (Tekes/ELY-keskus), Eija Lehtinen (HSY), Tommi Fred (HSY), Petteri Jokinen (HSY), Mari Heinonen (HSY), Jorma Manninen (Ekokem Oy Ab), Jouni Lillman (Lahti Aqua Oy), Jyrki Heilä (Biovakka Suomi Oy), Pirjo Rantanen (Aalto-yliopisto), Heikki Sandelin (Tampereen Vesi), Petri Jokela (Tampereen Vesi), Timo Heinonen (Hämeenlinnan Seudun Vesi Oy), Tapani Sulin (Hämeenlinnan Seudun Vesi Oy), Jarmo Hiltunen (Kuopion Vesi), Markku Siitari (Mikkelin vesilaitos), Johanna Penttinen-Källroos (Ab Stormossen Oy) ja Liisa Rohweder/Satu Harkki, (Haaga-Helia AMK).

SISÄLLYS

Alkusanat	3
1 Johdanto	7
2 Taustaa	8
3 Projektin esittely	10
3.1 Tavoite.....	10
3.2 Projektin toteutustapa	10
3.3 Tehtävien jako	11
3.3.1 Yhteistyö	11
4 Liete energialähteenä	14
4.1 Energian tuotanto lietteestä mädättämällä	14
4.2 Energian tuotanto lietteestä polttamalla	15
5 Mädätyksen teoriaa lyhyesti	17
5.1 Mesofiilinen ja termofiilinen mädätysprosessi	18
5.2 Esikäsittelyt.....	19
5.3 Kaksivaiheinen mädätys	19
6 Mädätyksen koeajojen toteutus	20
6.1 Kokeellisen toiminnan tavoitteet.....	20
6.2 Koelaitteiston esittely	21
6.2.1 Lämmitys.....	23
6.2.2 Lietteen syöttö	23
6.3 Mittausmenetelmät.....	23
6.3.1 Kaasunkeruu ja -mittaus	25
6.3.2 Erytisselvitykset.....	26
6.4 Koeaikataulu.....	27
7 Koeajojen tulokset ja niiden tarkastelu	29
7.1 Käynnistysjaksot.....	29
7.1.1 Mesofiilinen käynnistys.....	29
7.1.2 Muutos termofiiliseksi.....	29
7.1.3 Käynnistysvaiheiden tulokset ja niiden tarkastelu	31
7.2 1. Kuormitusjakso	33
7.2.1 1. kuormitusjakson prosessiolosuhteet	34
7.2.2 1. kuormitusjakson tulokset ja tulosten tarkastelu.....	34
7.3 2. Kuormitusjakso	36
7.3.1 Esikäsittely	36
7.3.2 2. kuormitusjakson prosessiolosuhteet	38
7.3.3 2. kuormitusjakson tulokset ja niiden tarkastelu.....	38

7.4 Erityisselvitysten tulokset.....	39
7.4.1 Siloksaanit.....	39
7.4.2 Rikkivety ja muut pelkistyneet rikkiyhdisteet (TRS).....	40
7.4.3 Vetymittaus.....	42
7.4.4 Lietteiden hajuselvitykset.....	43
7.4.5 Lietteen kuivattavuus ja rejektit.....	44
7.4.6 Lietteen hygienisoituminen.....	45
7.4.7 Yhteenveto korroosiohavainnoista 12 kk:n koeajan jälkeen.....	45
8 Koeajojen tulosten tarkastelu.....	47
8.1 Käynnistysvaiheiden tulosten tarkastelu.....	47
8.2 Koejaksojen kuormitusvaiheiden tulosten tarkastelu.....	47
8.3 Mesofiilisen ja termofiilisen prosessin vertailu.....	48
9 Mädätyksen tehostaminen kaksivaiheisella prosessilla ja biovedyn tuotantopotentiaali.....	51
10 Lietteenkäsittelyketjujen energiatehokkuus.....	53
10.1 Tarkasteltavien käsittelyketjujen kuvaus.....	53
10.2 Laskentamenetelmät ja -oletukset.....	54
10.2.1 Kasvihuonekaasutaseet.....	59
10.2.2 Kustannuslaskenta.....	60
10.3 Tulokset.....	61
10.3.1 Mädätteen loppukäsittelyn vaikutus.....	61
10.3.2 Biokaasutuotannon tehostaminen: esisaostus ja termofiilimädätys.....	65
10.3.3 Polton ja mädätyksen vertailu.....	66
10.3.4 Kustannukset.....	67
10.4 Yhteenveto tasetarkasteluista.....	69
10.5 Lietteenkäsittelyn liiketoiminta.....	70
II Johtopäätökset ja jatkotutkimustarpeet.....	72
Lähteet.....	75
Liite 1. Betonikoemateriaalikappaleiden valmistus.....	78
Liite 2. Kuvaajat reaktoreiden olosuhteista ensimmäisen kuormitusjakson aikana.....	79
Liite 3. Ensimmäisen kuormitusjakson vuorokausitason kaasuntuotto.....	82
Liite 4. Kuvaajat reaktoreiden olosuhteista toisen kuormitusjakson aikana.....	83
Liite 5. Toisen kuormitusjakson vuorokausitason kaasuntuotto.....	85
Liite 6. Materiaalitestauksen tulokset.....	86
Liite 7. Energia- ja kasvihuonekaasutaseiden sekä kustannusten laskennassa käytettyjä lähtötietoja.....	92
Kuvailulehti.....	94
Presentationsblad.....	95
Documentation page.....	96

1 Johdanto

Jätevedenpuhdistamoilla syntyvä liete vaatii käsittelyä, jotta se voidaan hyödyntää – joko aineena tai energiana – ja loppusijoittaa. Hyödyntämistä aineena edustaa tyypillisesti käsittely kompostoimalla, hyödyntämistä energiana on taas tyypillisesti lietteen poltto – mädätyskäsittely yhdistää molempia hyödyntämistapoja. Yhtä kaikki, energiaa tuottavatkin hyödyntämismenetelmät ovat kokonaisuuksina energian ja muiden resurssien kuluttajia. Tämän tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli vertailla erilaisia käsittelyvaihtoehtoja energiatalousnäkökulmasta. Sekä aineena että energiana lietteen hyödyntämisen mahdollistava mädätys oli tutkimuksen erityistarkastelun kohteena. Suurin osa Suomessa toimivista puhdistamolietettä käsittelevistä mädätyslaitoksista toimii mesofiilillä lämpötila-alueella, mutta termofiilinen prosessi on suuremman tehokkuutensa ansiosta noussut mielenkiintoiseksi vaihtoehdoksi. Tässä tutkimuksessa oli tavoitteena tutkia mesofiilisen prosessin muuttamista termofiiliseksi sekä mesofiilisen ja termofiilisen prosessin kuormitettavuuseroja.

Tulevaisuudessa tullaan yhä enemmän kiinnittämään huomiota myös yhdyskuntajätevesilietteen käsittelyssä eri menetelmien energiataloudellisuuteen ja lietteiden hyötykäyttöön energian tuotannossa. Lietteenkäsittelyn kustannukset (sis. investoinnit, ylläpito- ja käyttökustannukset sekä henkilökustannukset) muodostavat yhdyskuntajätevedenpuhdistamoiden kustannuksista lähes yhtä suuren osan kuin itse jäteveden käsittely (Starberg ym. 2005), Lietteenkäsittelyn tehostamisessa on täten merkittävä säästöpotentiaali.

2 Taustaa

Anaerobinen mädätysprosessi on yleinen tapa niin Suomessa kuin muuallakin maailmassa käsitellä jätevesilietettä. Mädätysprosessin lopputuotteet ovat stabiloitunut liete, biokaasu sekä rejektivesi. Mädätys voi tapahtua joko mesofiilisessa lämpötilassa (35 - 37 °C) tai termofiilisessa lämpötilassa (50 - 55 °C). Nykyään Suomessa puhdistamolietteen vallitsevana käsittelymenetelmänä on isoilla jätevedenpuhdistamoilla mesofiilinen mädätys, sillä se on koettu helpommin hallittaviksi. Kirjallisuudessa esitetyistä ristiriitaisista arvioista huolimatta perusteet myös termofiilisen prosessin hallinnalle ovat olemassa. Merkittävänä termofiilisen prosessin etuina mesofiiliseen nähden pidetään mm. lyhyempää viipymäaikaa (nopeampi hajoamisreaktio), suurempaa biokaasun saantoa sekä mädätetyn lietteen hygienisoitumista. Etenkin viimeksi mainitun edun merkitys korostuu hygieenisten vaatimusten ollessa tiukkoja.

Termofiilisessa mädätyksessä reaktiot tapahtuvat nopeammin kuin mesofiilisessa. Näin voidaan päästä korkeampaan mädätysasteeseen. Sen seurauksena voidaan käyttää pienempiä reaktoreita ja mädätettyä lietettä syntyy vähemmän. Myös vaahtoamisongelmat vähenevät. Termofiilisen mädätyksen nopeiden prosessireaktioiden hallintaan tarvitaan parempia menetelmiä tarkempaan ohjaustarpeeseen prosessihäiriöiden hallitsemiseksi ja estämiseksi. (Dohányos ja Zábranská 2001; Schafer ym. 2002).

Lietteen hyödynnettävyyden kannalta termofiilinen mädätys riittää hygienisoimaan lietteen riittävässä määrin (Maa- ja metsätalousministeriö 2007). Mesofiilisesti mädätetty liete on lisäksi joko kompostoitava tai hygienisoitava muulla tavoin. Energiataloudellisesti on tarkoituksenmukaisempaa mädättää liete mahdollisimman pitkälle ja ottaa talteen energiaa kuin kompostoida se, jolloin energiahyötyä ei saada.

Myös lietteen terminen käsittely voi tietyin edellytyksin olla varteenotettava vaihtoehto lietteen käsittelylle, erityisesti alueilla, joilla esimerkiksi tiheän asutuksen, pitkien kuljetusetäisyyksien, lietteen laatuongelmien tai muiden syiden vuoksi lietteen käyttö maataloudessa tai maanrakennuksessa ei ole mahdollista. Polttamalla lietteen orgaaniset haitta-aineet saadaan tuhottua ja sen tilavuus pienenee oleellisesti. Riittävän kuiva-ainepitoisuuden saavuttamiseksi poltettava liete vaatii esikäsittelyn, joka tulisi toteuttaa mahdollisimman energiatehokkaalla tavalla. Tutkimuksessa polttoon perustuvien lietteenkäsittelyketjujen energiatehokkuutta vertaillaan ketjuihin, jotka perustuvat mädätysprosesseihin.

Jätevedenpuhdistamoilla kuluu huomattava määrä energiaa orgaanisen aineen hapettamiseen. Mikäli suurempi osa jäteveden orgaanisesta aineesta voitaisiin poistaa jo esiselkeytyksessä ennen ilmastusvaihetta, olisi ilmastusenergian kulutuksen pienentäminen mahdollista. Tutkimuksessa selvitettiin, miten suuri ilmastusenergian säästö voitaisiin saavuttaa, mikäli jäteveden puhdistuksessa siirryttäisiin Suomessa tyypillisimmin käytössä olevasta fosforin kemiallisesta rinnakkaissaostusprosessista esisaostusprosessiin. Esisaostuksessa suurempi osa fosforista saostettaisiin kemiallisesti jo esiselkeytyksessä, jolloin myös orgaanista ainetta saostuisi. Alustavan

arvion mukaan ilmastusenergian säästö voisi olla valtakunnan tasolla jopa 30 - 40 GWh/a. Esisaostusprosessissa myös syntyisi samalla enemmän raakalietettä, jonka energiantuottopotentiaali on suurempi kuin ilmastusprosessissa pitkälle hajonneen biolietteen. Nykyisissä jätevedenpuhdistamoissa esisaostuksen käyttöönottoa voi rajoittaa riittämätön mädätysreaktorikapasiteetti.

Haja-asutuksen talousjätevesiasetuksen seurauksena Suomessa tulee olemaan siirtymäajan jälkeen yli 300 000 pienpuhdistamo, joissa syntyy sakokaivo- ja ylijäämälietettä. Pienpuhdistamolietteiden termofiilinen mädätys yhdessä muiden maataloudessa ja elintarviketeollisuudessa syntyvien biojätteiden kanssa saattaa olla yksi varteenotettava menetelmä tämän lietemäärän käsittelemiseksi. Pienpuhdistamoiden yleistymisen lisäksi kunnalliset jätevedenpuhdistamot keskittyvät yhä suuremmiksi yksiköiksi ja lietemäärät kasvavat paikallisesti. On vaikeaa löytää sopivia kohteita ja alueita, joissa puhdistamon koko lietemäärä voidaan hyödyntää vain aineena. Puhdistamolietteelle tulee etsiä muitakin käyttötapoja kuin peltolevitys ja maanparannuskäyttö.

3 Projektin esittely

3.1

Tavoite

Koska lietteen käsittelykustannukset ovat korkeita muun muassa suuren energiankulutuksen vuoksi, on projektin tavoitteena ollut löytää keinoja alentaa näitä kustannuksia mahdollistamalla puhdistamolietteen nykyistä laajemman hyödyntämisen tehokkaita talteenotto- ja mädätysprosesseja käyttäen. Biokaasu tarjoaa paikallisesti tuotettuna kotimaisena polttoaineena ympäristöystävällisen vaihtoehdon hajautettuun energiatuotantoon. Tehostettu mädätysprosessi vaikuttaa positiivisesti myös kasvihuonekaasujen ja hajukaasujen päästöjen vähentämiseen. Koska suurin osa Suomessa toimivista puhdistamolietettä käsittelevistä mädätyslaitoksista toimii mesofiilisella lämpötila-alueella, oli tässä tutkimuksessa tavoitteena tutkia mesofiilisen prosessin muuttamista termofiiliseksi sekä mesofiilisen ja termofiilisen prosessin kuormitettavuuseroja.

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää puhdistamoiden lietteenkäsittelyä ja optimoida jätevedenpuhdistuksen energiantuotantoa ja -käyttöä. Projektissa selvitettiin mahdollisuuksia tehostaa puhdistamolle tulevan orgaanisen aineen talteenottoa ja käsittelyketjua, lietteenmädätysprosessia ja siitä saatavan energian hyötykäyttöä. Tavoitteena on ollut saada aikaan ratkaisu, jossa lietteet hyödynnetään aineena tai energiana mahdollisimman tehokkaasti, ympäristöystävällisesti ja kustannustehokkaasti. Tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli vertailla erilaisia käsittelyvaihtoehtoja energiatalouden, kasvihuonekaasupäästöjen ja kustannusten näkökulmasta.

Myös lietteen poltto voi tietyin edellytyksin olla varteenotettava vaihtoehto lietteen käsittelylle, mikäli lietteen esikäsittely tarvittavaan kuiva-ainepitoisuuteen pystytään toteuttamaan energiatehokkaasti. Tätä haluttiin vertailla mädätysprosesseihin.

3.2

Projektin toteutustapa

Tutkimus keskittyi mädätysprosessin muuttamiseen mesofiilisesta prosessista termofiiliseksi, lietteen käsittelyn energiakäytön optimointiin ja vaihtoehtoisten lietteen käsittelyketjujen (sis. kuljetuksen ja loppusijoituksen) energia- ja kasvihuonekaasutaseiden sekä kustannusten tarkasteluun. Tutkimus toteutettiin pilot-mittakaavan tutkimuksena sekä järjestelmäanalyysinä. Koeajoissa reaktoreiden toimintaa verrattiin keskenään vaihtelemalla syötettävän lietteen määrää ja laatua. Pilot-kokeiden perusteella oli tarkoitus saada perusteet prosessin mitoittamiselle, lisäksi tarkastelun kohteena oli prosessin käynnistyvyys ja stabiilisuus. Hankkeen lopputuloksena muodostui pilotoitu toimintamalli, jonka energia- ja ympäristötehokkuus on arvioitu alustavine kustannusarvioineen. Vedyn tuotantomahdollisuudet sekä termokemikaal-

lisen esikäsitteilyn vaikutus kaasuntuotantoon tutkittiin vielä erikseen laboratoriomittakaavassa yhteistyössä Danmarks Tekniske Universitetin kanssa.

3.3

Tehtävien jako

Tutkimus toteutettiin SYKEN ja VTT:n yhteistyönä. Tutkimustyöhön osallistuivat myös Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu, FCG Finnish Consulting Group Oy ja Haaga-Helia Ammattikorkeakoulu sekä kunnalliset puhdistamot ja yritykset. SYKEN ja VTT:n välillä toimenjako oli seuraava:

VTT	SYKE
Lietteen käsittelyketjujen energia- ja kasviuonekaasupäästötaseselvitys sekä niiden kustannukset	Projektin koordinointi
Kaasun laatumittaukset	Näytteenotto, kemialliset määritykset ja mittaukset
Lietteiden hajumääritykset ja vertailu	Meso- ja termofilisen mädätysprosessin vertailevat pilotmittakaavan koeajot
Mädätyslaitteiston materiaalitutkimus – korroosioselvitys	- kuormitus - viipymä
Lietteenkäsittelyn energiatehokkuuteen liittyvät liiketoimintamahdollisuudet	- lietteen esikäsitteily - lietteen hygienia - lietteen kuivattavuus
Tehostettu esikäsitteily sekä biovedyn tuotanto (laboratoriotutkimus)	- rejektivesien laatu

FCG Oy suoritti projektia varten esisaostustarkastelun SYKEN tilauksesta. Tarkastelussa selvitettiin esisaostuksen vaikutusta mädätykseen (lietteen määrä ja laatu), ilmastonenergiakulutukseen sekä typenpoistoon.

Materiaalien kestävyyskäyttämisen arvioinneista vastasi VTT:n lisäksi VTT Expert services.

Projektin puitteissa tehtiin myös seuraavat opinnäytetyöt:

Oppilaitos	Osasto	Tekijä	Aihe
Aalto-yliopisto, teknillinen korkeakoulu	Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos	Saku Liuksia	Jätevesilietteen mesofilisen mädätysprosessin muuttaminen termofiliseksi
Aalto-yliopisto, teknillinen korkeakoulu	Kemian ja materiaalitieteiden tiedekunta	Charlotta Lund	Mesofilisen ja termofilisen biokaasulaitoksen kuormitusvertailu ja optimointi
DTU Danmarks Tekniske Universitet / Aalto-yliopisto	Institute of Environment and Resources/ Faculty of Chemistry and Material Sciences	Tapio Ryhänen	Two stage anaerobic digestion of sewage sludge
Haaga-Helia ammattikorkeakoulu	Liiketalouden koulutusohjelma	Oskari Kosola	Jätevesilietteeteknologian kaupallistaminen
Haaga-Helia ammattikorkeakoulu	Liiketalouden koulutusohjelma	Viktoria Näppi	Energy consultancy in municipal sludge services and provision in Finnish and International markets

3.3.1

Yhteistyö

Projektiin osallistui harjoittelija Frédérique Psenica koulusta Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Limoges (ENSIL) kesällä 2009. Yhteistyössä DTU:n kanssa

projektissa toteutettiin opinnäytetyö. Tapio Ryhänen suoritti kaksivaiheista mädätysprosessia käsittelevän DI-työnsä kokeellisen osuuden DTU:n Environmental Engineering -osastolla ohjaajinaan Irini Angelidaki ja Dimitar Karakashev.

Tutkimusryhmä teki ekskursion seuraaviin kohteisiin:

- LTH Lunds tekniska högskola. Avdelning för Kemiteknik. Yhteyshenkilö professori Jes la Cour Jansen. Erikoisaloina etusaostuksen vaikutus puhdistamon energiankäyttöön, yhteismädätys ja anaerobiproessin lämpötilaoptimi, sekä prosessin lämpötilamuutoksen toteuttaminen.
- DTU Danmarks Tekniske Universitet. Institute of Environment and Resources. Yhteyshenkilö professori Irini Angelidaki. Yhteistyö aiheista biovety, yhteismädätys ja monivaiheinen mädätys.
- Lundin, Kävlingen ja Kalmarin puhdistamot Ruotsissa ja Lundtoften puhdistamo Kööpenhaminan lähellä Tanskassa

Hankkeeseen osallistuivat seuraavat kotimaiset organisaatiot

- HSY (entiset Espoon Vesi ja Helsingin Vesi)
- Tampereen Vesi
- Hämeenlinnan Seudun Vesi Oy
- Lahti Aqua Oy
- Kuopion Vesi
- Mikkelin vesilaitos
- VVY
- Biovakka Suomi Oy
- Ab Stormossen Oy
- Ekokem Oy Ab

Projektin puitteissa järjestettiin myös lietteen ja jätteiden mädätystä käsittelevä tiedonvaihtoseminaari 19.4.2010. Kutsuttuina esitelmöitsijöinä olivat prof. Jes la Cour Jansen, LTH (Co-digestion of sludge and biowaste), assoc. prof. Kanokwan Boe, DTU (Process control and optimization), PhD Prasad Karapaju, JYU (Future possibilities of sludge digestion), toimitusjohtaja Pauli Hyvärinen, ECO Environment Oy (Suomalainen State-of-Art -mädätyslaitos) ja tutkija Teija Paavola, MTT (Korkea-TS-pitoiset syötteet lietemädättämössä). Ari Kangas ja Elina Merta esittelivät lisäksi TERMOS-projektia seminaarissa.

Projektin tuloksia on julkaistu lisäksi seuraavissa artikkeleissa ja konferenssiesityksissä:

Kangas, Ari; Liuksia, Saku 2011. Mädätysprosessin muuttaminen mesofiilisestä termofiiliseksi, *Vesitalous* 1/2011.

Kangas, Ari; Lund, Charlotta 2011. Mesofiilisen ja termofiilisen mädätysprosessin vertailua, *Vesitalous* 1/2011.

Merta, Elina; Arnold, Mona; Niemelä, Ari; Kangas, Ari 2010. Energy balances, GHG emissions and related costs of municipal wastewater sludge treatment chains *Water and Energy* 2010, Amsterdam 10 - 12 November 2010. Conference Proceedings IWA Water and Energy 2010. International Water Association (IWA) (2010), 15 pp.

Merta, Elina; Arnold, Mona 2010. Optimised energy recovery from wastewater sludge. Venice 2010, Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venice 8-11 November 2010. Conference Proceedings. International Waste Working Group (IWWG) (2010), 11 pp.

Arnold, Mona; Merta, Elina 2011. Towards energy self-sufficiency in wastewater treatment by optimized sludge treatment. To be presented in Water Convention, Singapore 4-8 July 2011.

Merta, Elina 2011. TERMOS - Energiätehokas lietteenkäsittely. Esitys Vesihuoltopäivillä 18.-19.5.2011.

Merta, Elina; Kangas, Ari; Arnold, Mona; Saarinen, Risto 2011. Energy Efficient Management of Wastewater Sludge by Thermophilic Anaerobic Digestion. To be presented in Nordic Wastewater conference Helsinki 14.-16.11.2011.

4 Liete energialähteenä

Energian tuotanto lietteestä perustuu sen sisältämän orgaanisen aineen energiasisällön hyödyntämiseen. Yleisimpiä menetelmiä ovat biologinen käsittely mädättämällä ja terminen käsittely polttamalla.

4.1

Energian tuotanto lietteestä mädättämällä

Mädätyksessä osa jätevesilietteen orgaanisista yhdisteistä muunnetaan biokaasuksi, joka koostuu pääasiassa metaanista, hiilidioksidista ja pienestä määrästä muita kaasuja. Biokaasu voidaan käyttää energialähteenä sähkön ja/tai lämmöntuotannossa, ajoneuvopolttoaineena tai syöttämällä maakaasuverkkoon. Tuotettu sähkö ja lämpö voidaan hyödyntää joko jätevedenpuhdistamolla tai sen ulkopuolella.

Yksinkertaisin biokaasun hyödyntämismenetelmä on kaasun poltto kaasukattilassa yhdistettynä lämmön talteenottoon. Usein tuotetulle lämmölle ei kuitenkaan löydetä jatkuvaa kysyntää, jolloin merkittävä osa biokaasusta voi jäädä hyödyntämättä. Kaasukattila on kuitenkin investointina suhteellisen edullinen ja lisäksi kattila edellyttää vain vähän huolto- ja ylläpitotoimia. Näin ollen kaasukattila on laitosten kannalta hyvä hyödyntämismenetelmä (Tukiainen 2009).

Yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto (Combined Heat and Power, CHP) biokaasusta voidaan toteuttaa useilla eri menetelmillä, joista Suomessa tyypillisin on kaasumoottori. Moottori pyörittää generaattoria, jonka avulla tuotetaan sähköä. Savukaasuista ja jäähdytysvedestä on mahdollista myös ottaa talteen lämpöä. Kaasumoottorit soveltuvat hyvin suurten biokaasuvirtaamien hyödyntämiseen ja siten suuren mittakaavan energiantuotantoon. Tekniikan kehittymisen myötä uusimmat kaasumoottorit sietävät myös hyvin biokaasun sisältämiä epäpuhtauksia (Tukiainen 2009). Kuitenkin epäpuhtauksien, kuten siloksaanien, poistaminen biokaasusta ennen kaasumoottorille johtamista voi alentaa kaasumoottorin käyttökustannuksia huomattavasti (Arnold 2009). Muita yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon soveltuvia tekniikoita ovat mikroturbiinit, stirlingmoottorit ja polttokennot.

Ajoneuvopolttoaineeksi jalostettaessa biokaasusta poistetaan sen sisältämä hiilidioksidi sekä korroosiota ja ympäristö- ja terveyshaittoja aiheuttavia epäpuhtauksia. Jalostusprosessissa biokaasun metaanipitoisuus ja lämpöarvo nousevat maakaasuun verrattavalle tasolle, jolloin puhutaan biometaanista. Tämän jälkeen kaasu paineistetaan, jotta se voidaan tankata ajoneuvoihin. Tuotettu biometaani voidaan myös syöttää maakaasuverkkoon. Biokaasun jalostamiseen on tarjolla erilaisia tekniikoita, kuten vesipesu, PSA (Pressure Swing Absorption), kalvo- ja adsorptiotekniikat. Biokaasun jalostaminen sekä paineistaminen kuluttavat pienen osan kaasun energiasisällöstä. Puhdistustekniikat edellyttävät melko suuria investointeja ja myös käyttökustannukset ovat merkittävät. Biokaasun ajoneuvokäyttö edellyttää myös kaasun tankkausasemia sekä kaasukäyttöisiä ajoneuvoja. Tällä hetkellä julkisia maakaasun

tankkausasemia on Suomessa kuusitoista. Biokaasua voidaan käyttää polttoaineena maakaasuajoneuvoissa (Tukiainen 2009; Gasum 2011).

Mädätysprosessi vaatii toimiakseen lämmittämistä. Mädättämöön pumpattava liete tulee lämmittää mädätyslämpötilaan, ja reaktorin häviöiden kompensoimiseksi prosessia on lämmitettävä jatkuvasti tietyllä teholla. Prosessissa kuluu sähköä lietteen pumppauksessa, mädättämön sekoituksessa ja pumppauksessa lämmönvaihtimien läpi.

Vuoden 2009 lopussa Suomessa toimi kunnallisten jätevedenpuhdistamoiden yhteydessä 16 mädättämöä. Kunnallisilla jätevedenpuhdistamoilla tuotettiin noin 25 miljoonaa m³ biokaasua, jonka metaanipitoisuus vaihteli välillä 43 - 72 %. Kaasusta hyödynnettiin lämmön, sähkön ja mekaanisen energian tuottamiseen yhteensä noin 23 miljoonaa m³ (Kuittinen ym. 2010).

Mädätyksen taloudellinen kannattavuus riippuu usein tuotetun sähkön hinnasta. Työ- ja elinkeinoministeriö hyväksyi 24.3.2011 asetuksen, jonka seurauksena tuli kokonaisuudessaan 25.3.2011 voimaan laki uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön tuotantotuesta. Biokaasusta tuotetulle sähkölle maksetaan markkinaehtoista takuuhintaa, joka on 83,5€/MWh. Syöttötariffina maksetaan takuuhinnan ja markkinahinnan välinen erotus. Lisäksi laitos saa lisätukea 50 €/MWh (ns. lämpöpremio), jos se tuottaa myös lämpöä (laitoksen kokonaishyötysuhde vähintään 50 % tai 75 % jos sen generaattoreiden yhteenlaskettu nimellisteho on vähintään 1 MVA). Tukea maksetaan laitoksille, joiden generaattoreiden yhteenlaskettu nimellisteho on vähintään 100 kVA, ja tariffin kestoaika on 12 vuotta siitä, kun oikeus tariffiin alkaa. Biokaasuvoimaloita otetaan tukijärjestelmän piiriin, kunnes generaattorien yhteisteho ylittää 19 MW. Syöttötariffin voimaantulo parantaa olennaisesti myös uusien lietemädättämöjen kannattavuutta (Työ- ja elinkeinoministeriö 2011).

Sitran tilaamassa lietteenkäsittelymenetelmiä koskevassa selvityksessä (Sitra 2007) arvioidaan, että paras tuotto lietteestä tuotetulle biokaasulle saadaan liikennekäytössä. Toiseksi kannattavimmaksi hyödyntämisvaihtoehdoksi arvioidaan yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto.

4.2

Energian tuotanto lietteestä polttamalla

Lietteen energiasisältö voidaan ottaa hyötykäyttöön myös polttamalla, jolloin pyritään hapettamaan lietteen orgaaninen aine täydellisesti korkeassa lämpötilassa. Polttoa voidaan soveltaa joko mekaanisesti tai termisesti kuivatulle lietteelle. Muodostunut tuhka vaatii soveltuvan käsittelyn, sillä siihen konsentroituvat lietteen mahdollisesti sisältämät epäorgaaniset haitta-aineet (esim. raskasmetallit). Polttoprosessissa syntynyt energia voidaan hyödyntää lämpönä esimerkiksi lietteen kuivauksessa tai kaukolämpönä ja/tai sähkönä. Tuotettu energiamäärä riippuu voimakkaasti poltettavan lietteen vesipitoisuudesta, sen sisältämän orgaanisen aineen määrästä sekä polttoprosessin säädöistä (Rulkens 2008). Lietteen alemmaksi lämpöarvoksi on esitetty eri lähteissä erilaisia arvoja. Fytili et al. (2008) mukaan primäärilietteen lämpöarvot kuiva-ainekiloa vaihtelevat välillä 23 - 29 MJ aktiivilietteen lämpöarvon ollessa tasolla 16 - 23 MJ/kg TS. Mädätys pienentää lietteen lämpöarvoa (esim. primääriliettele 9 - 23 MJ/kg TS).

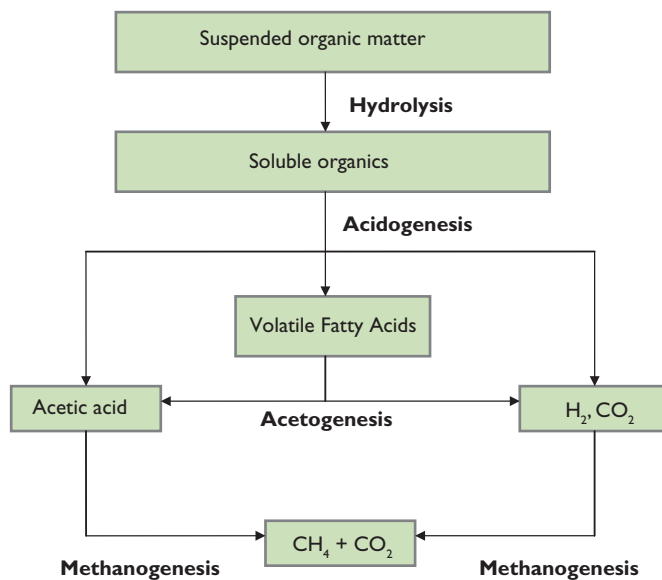
Lietteen poltto voidaan toteuttaa joko erillisessä lietteenpolttolaitoksessa, rinnakkaispolttolaitoksessa tai jätteenpolttolaitoksessa. Lietettä on mahdollista polttaa myös sementtikuuneissa tai teollisuuden polttolaitoksissa (Stasta ym. 2006). Tyypillisiä lietteenpolttotekniikoita ovat arina- ja leijupoltto.

Suomeen on parhaillaan suunnitteilla useita rinnakkaispolttolaitoksia sekä jätteenpolttolaitoksia, joissa voitaisiin polttaa myös yhdyskuntajätevesilietteitä. Ulkomailla

lietteen poltto on tietyissä maissa laajalti käytetty käsittelyratkaisu. EU komission tilaaman jätevesilietteen hyödyntämistä koskevan selvityksen (Salado ym. 2010) perusteella lietettä poltetaan erityisesti Alankomaissa (60 % tuotetusta lietteestä poltetaan), Belgiassa (62 - 76 %), Itävallassa (47 %), Tanskassa (43 %) ja Saksassa (38 %). Raportin tiedot perustuvat maasta riippuen tilanteeseen vuosina 2000 - 2006. Tulevaisuudessa lietteen polton arvioidaan kuitenkin lisääntyvän lähes kaikissa EU:n jäsenmaissa. Lietteen polttamiseen liittyy kuitenkin reunaehtoja, jotka tulee määrittää tapauskohtaisesti.

5 Mädätyksen teoriaa lyhyesti

Mädätys on biologinen monivaiheinen prosessi joka voidaan jakaa hydrolyysiin, happomuodostukseen sekä metaanimuodostukseen (kuva 1). Happomuodostuksessa välituotteena syntyy vetyä asetaattia, ja hiilidioksidia. Metaanin muodostuksessa taas mikrobit tuottavat asetaatista, vedystä ja hiilidioksidista metaania. Metanogeenien tärkeimmät substraatit ovat asetaatti, vety ja hiilidioksidi.



Kuva 1. Mädätysprosessin vaiheet (Appels ym. 2008).

Suomessa syntyvästä jätevesilietteestä noin 48 % mädätetään. Verrattaessa anaerobista mädätystä muihin lietteen stabilointimenetelmiin ovat tärkeimmät hyödyt seuraavia:

- **Biokaasun tuotto.** Useimmilla laitoksilla prosessi on nettoenergian tuottaja. Kun energiaa tuotetaan enemmän kuin sitä tarvitaan ylläpitämään mädättämöiden toimintaa, voidaan ylimääräenergia käyttää lämpönä ja/tai sähköinä joko jätevedenpuhdistamon omissa prosesseissa tai myydä laitoksen ulkopuolelle. Eräs mahdollisuus on myös biokaasun jalostaminen biometaaniksi ajoneuvokäyttöön tai maakaasuverkkoon syötettäväksi.
- **Lietteen massan ja tilavuuden reduktio.** Mädätyksessä hajonnut kiintoaine on usein 20 - 50 % syötetyn lietteen kiintoainemäärästä, mikä alentaa lietteen loppusijoituskustannuksia.
- **Stabiilisuus.** Mädätyksen lopputuote on stabiilia lietettä, jonka hajuhaitat ovat vähentyneet ja jota voidaan varastoida ilman vaaraa myöhemmästä mä-

tänemisestä. Liete sisältää typpeä, fosforia ja muita ravinteita sekä orgaanista ainetta, joten se voidaan hyödyntää lannoitteena ja maanparannusaineena.

- **Hygienia.** Mädätyksessä tapahtuu merkittävä patogeenisten eli tautia aiheuttavien mikrobin inaktivoituminen.

Lietteen mädätyksen olennaisimmat haitat ovat seuraavia:

- **Pitkä viipymä.** Metaanibakteerikanta edellyttää yli 10 päivän viipymää. Tyyppillisesti 15 - 20 d.
- **Suhteellisen korkeat investointikustannukset.** Tarvitaan suuria reaktoreita ja niihin laitteistoja (syöttö- ja kierrätyspumppuja sekä lämmönvaihtimia ja kaasunkäsittelylaitteita).
- **Väkevät rejektivedet.** Mädätetyn lietteen kuivauksesta tuleva rejektivesi sisältää kiintoainetta, liuennetta ja partikkelimuodossa olevia orgaanisia aineita, typpeä, fosforia sekä hajoamistuotteina runsaasti muita yhdisteitä. Rejektivedet on yleensä esikäsiteltävä ennen niiden johtamista yhdyskuntajätevedenpuhdistamolle (Dohányos ja Zábranská 2001).

5.1

Mesofiilinen ja termofiilinen mädätysprosessi

Puhdistamolietteen vallitsevana mädätysprosessina on mesofiilinen mädätys (lämpötila 35 - 37 °C), sillä se on koettu helpommin hallittaviksi kuin termofiilinen prosessi (lämpötila 50 - 55 °C), jota Suomessa pelkkään lietemädätykseen käyttää vain yksi laitos. Merkittävänä termofiilisen prosessin etuina mesofiiliseen nähden pidetään kuitenkin mm. lyhyempää viipymäaika (nopeampi hajoamisreaktio), suurempaa biokaasun saantoa sekä mädätetyn lietteen hygienisoitumista. Etenkin hygienian merkitys korostuu, kun sille asetetaan vaatimuksia lietteen hyötykäytössä.

Termofiilisessa mädätyksessä reaktiot tapahtuvat nopeammin kuin mesofiilisessa. Näin voidaan tietyssä tilavuudessa päästä korkeampaan mädätysasteeseen ja pienempään mädätetyn lietteen määrään. Toisaalta tästä syystä voidaan myös käyttää pienempiä reaktoreita. Myös vaahtoamisongelmat vähenevät. Nopeat prosessireaktiot edellyttävät tarkempaa ohjaustarvetta prosessihäiriöiden estämiseksi ja hallitsemiseksi.

Lietteen maaperähyödyntämisen kannalta termofiilinen mädätys hygienisoi lietteen riittävästi. Mesofiilisesti mädätetty liete on hygienisoitava muulla tavoin. Energiataloudellisesti on tarkoituksenmukaisempaa mädättää liete mahdollisimman pitkälle ja ottaa talteen energiaa kuin esim. kompostoida se, jolloin energiahyötyä ei saada.

Eri tutkimuksissa on kuitenkin saatu hyvin erilaisia ja ristiriitaisiakin tuloksia liittyen termofiilisen prosessin paremmuuteen mesofiiliseen verrattuna. Yhtä mieltä ollaan kuitenkin yleisesti siitä, että termofiilinen prosessi voi nopeampana prosessina nostaa laitoksen mädätyskapasiteettia (Sorensen ym. 1999; Zábranská ym. 2002).

Lähtökohtaisesti termofiilinen mädätys on kalliimpi toteuttaa kuin mesofiilinen mädätys sen vaatiman suuremman lämmitystarpeen johdosta. Oleellinen tekijä on kuitenkin kaasun tuotto. Jos se saadaan termofiilisella prosessilla riittävän suureksi, voivat muutkin kuin energiataloudelliset hyödyt olla huomattavat. Kohonnut kaasun tuotto merkitsee suurempaa orgaanisen aineen hajoamista, mikä taas tarkoittaa pienempiä lietemääriä, pienempiä polymeerimääriä mädätetyn lietteen kuivauksessa ja pienempiä kuljetusmääriä loppusijoitukseen.

Termofiilinen mädätys voisi siis olla ratkaisu paikallisesti kasvaviin lietemääriin sekä tiukentuviin hygieniavaatimuksiin. Ongelmana on termofiilisen prosessin vähäiset käyttökokemukset mesofiiliseen prosessiin verrattuna. Termofiilisen prosessin

nopeat reaktiot reagoivat herkemmin olosuhteiden muutoksiin ja siksi niiden hallinta vaatii erityistä tarkkaavaisuutta. Myös termofiilinen prosessi on silti hallittavissa.

5.2

Esikäsittelyt

Jätevesilietteen mädätysprosessin ensimmäinen vaihe on hydrolyysi, jossa lietteen orgaaninen aine ja solumassa hajoavat yksinkertaisimmiksi liuenneiksi aineiksi. Edistämällä tätä vaihetta voidaan mädätysprosessia tehostaa. Bakteerien soluseinämien tuhoutuessa koko solun sisältö vapautuu ja solut tulevat näin helpommin hajoavaan muotoon sekä vapauttavat joitakin hajoamisprosessia edistäviä entsyymejä (Zábranská ym. 2002). Esikäsittely myös homogenisoi mädätettävää ainetta ja näin ollen vältetään suuria vaihteluja ja prosessihäiriöitä. Hydrolyysin nopeuttamiseksi on erilaisia lietteen esikäsittelyvaihtoehtoja. Niitä ovat mm. kemiallinen, terminen ja mekaaninen esikäsittely sekä ultraäänikäsittely. Kaikki nämä esikäsittelyvaihtoehdot vaativat kuitenkin energiaa ja lisäävät kustannuksia, joten niiden soveltuvuus ja hyöty kannattaa aina määritellä tapauskohtaisesti.

Puhdistamolietteen mädätyksessä esikäsittelynä on tyypillisesti lietteen sakeutus kiintoainepitoisuuden nostamiseksi. Sakeutus voidaan toteuttaa gravitaatiosakeutuksena, flotaatiosakeutuksena tai mekaanisella tiivistyksellä. Kiintoainepitoisuus nousee sakeutuksessa noin 2 - 3 -kertaiseksi, ja lopullinen kuiva-ainepitoisuus on usein 4 - 5 %. Mikäli käytetään mekaanista tiivistystä, voidaan kuiva-ainepitoisuus nostaa tasolle 6 - 10 %. Kun liete väkevöidään, tilavuusvirta pienenee, jolloin samalla reaktoritilavuudella saadaan pitempi viipymä. Tämä voi parantaa kaasuntuotantoa. Lisäksi säästetään lämmityskustannuksista, kun ei lämmitetä ylimääräistä vettä. Uudiskohteissa voidaan myös säästää mädätysreaktorin investoinneissa. Toisaalta mekaanisen sakeutuksen energian- ja polyelektrolyytin kulutus voi olla merkittävä. Suomessa monet mädättämöt ovat tehostaneet prosessia investoimalla mekaanisiin tiivistimiin. Esimerkiksi Tampereen Viinikanlahdessa, Riihimäellä ja Lahden Ali-Juhakkalan sekä Kariniemen puhdistamoilla tiivistetään lietettä mekaanisesti ennen mädätystä. Nurmijärven puhdistamolla mädätettävä liete tiivistetään lingoilla ja mädätysprosessia ajetaan panostoimisena. Kiintoainepitoisuuden ylärajaa määrää prosessilaitteiston kestävyys, koska varsinkin liikkuvat osat esim. pumpuissa ja sekoittimissa kuluvat nopeasti jos kiintoainepitoisuus on korkea. Märkäprosessi on yleensä suunniteltu alle 15 % kiintoainepitoisuuksille. (Dohányos ja Zábranská 2001; Kiisto ja Fred 2007; Maa- ja metsätalousministeriö 2008; Latvala 2009).

5.3

Kaksivaiheinen mädätys

Erottamalla hydrolyysi ja happomuodostusvaihe metaanikäymisvaiheesta kaksivaiheisessa mädätyksessä on mahdollista ottaa talteen mikrobien tuottama vety ennen kuin mädätysprosessin mikrobit käyttävät sen aineenvaihduntaansa. Vety erotetaan tällöin ensimmäisessä vaiheessa, jolloin prosessin tuotteena on vedyllä rikastettu metaanikaasu, jonka energiasisältö on korkeampi kuin tavallisen biokaasun.

Kaksiosaisen mädätysreaktorisysteemien on laboratorio- ja pilot-kokoluokassa osoitettu parantavan hyötysuhdetta huomattavasti, mutta huoli kaksiosaisen mädätysprosessien toimivuudesta käytännössä on pitänyt niiden määrän alle 10 %:ssa kaikista mädättämöistä Euroopassa (De Baere 2000). Mahdollisuus käyttää ensimmäistä osareaktoria biologiseen vedyn tuotantoon ja samalla parantaa metaanin tuottoa toisessa vaiheessa yksiosaiseen prosessiin verrattuna tekee kaksiosaisesta mädätysprosessista erityisen kiinnostavan.

6 Määdätyksen koeajojen toteutus

6.1

Kokeellisen toiminnan tavoitteet

Kokeiluilla haluttiin selvittää, miten käytännössä prosessin lämpötilan nostaminen mesofiiliselta lämpötila-alueelta termofiiliselle tasolle onnistuu sekä lisäksi tutkia mesofiilisen ja termofiilisen prosessien välisiä eroja etenkin kuormitettavuuden ja kaasuntuotannon suhteen.

Kokeilujen aikana prosessin tilaa seurattiin tarkkailemalla prosessiparametreja, joita esitetään tarkemmin luvussa 6.3. Suuret ja äkilliset muutokset kaasun metaani- ja hiilidioksidipitoisuuksissa, lietteen pH:ssa ja alkaliteetissa tai orgaanisen aineen reduktiossa indikoivat yleensä prosessin epästabiilisuutta. Prosessin tehokkuuden mittana on tuotettu kaasumäärä sekä absoluuttisesti että suhteessa syötetyn lietteen orgaaniseen aineeseen.

Tuotetun biokaasun metaanipitoisuus vaikuttaa suoraan biokaasun energiasisältöön, joten metaanipitoisuutta mitattiin jatkuvatoimisesti koejaksojen aikana.

Biokaasun rikkivetyypitoisuudella on monesti negatiivista vaikutusta biokaasun hyötykäyttöön, prosessihenkilöstön työterveyteen ja joissain tapauksissa myös lähiympäristön hajuhaittoihin. Näiden syiden vuoksi rikkivetyypitoisuutta mitattiin sekä jatkuvatoimisesti että ajoittain tarkemmalla menetelmällä.

Biokaasun vetyypitoisuutta mitattiin, koska vetyypitoisuudesta ja sen vaihtelusta prosessiolosuhteiden muuttuessa ei juuri ole kirjallisuudessa raportoituja tietoja, vaikka yleisesti on jo tiedossa termofiiliprosessin teoreettisesti parempi vedyntuotopotentiaali. Vetyypitoisuus kasvattaa myös biokaasun energiasisältöä.

Biokaasun sisältämät siloksaanit haittaavat biokaasun hyötykäyttöä aiheuttamalla moottoririkkoja ja/tai kasvattamalla biokaasun puhdistuskustannuksia. Siloksaaneja käytetään yleisesti mm. pesuaineissa ja kosmetiikassa, joten niitä esiintyy jätevesissä ja sitä kautta myös jätevesilietteissä yhä enemmän. Mesofiilisen ja termofiilisen prosessin vaikutuksia biokaasun siloksaanipitoisuuteen selvitettiin.

Mädätetty liete yleensä kuivataan linkoamalla ja sen prosessin poistokaasut johdetaan tyypillisesti puhdistamattomana ulkoilmaan. Lietteiden hajupitoisuusmäärittämisellä selvitettiin kuinka termofiilinen prosessi vaikuttaa mädätetystä lietteestä vapautuvaan hajuun. Määritykset tehtiin simuloimalla täysmittakaavan laitoksen lietteen käsittelyä ennen linkousta. Lietteiden kuivauksesta tulevat rejektivedet ovat osoittautuneet useissa mädätyslaitoksissa ongelmallisiksi. Tämän takia haluttiin myös selvittää mesofiilisesti ja termofiilisesti mädätetyn lietteen kuivattavuutta ja millaisia syntyvät rejektivedet ovat laadultaan.

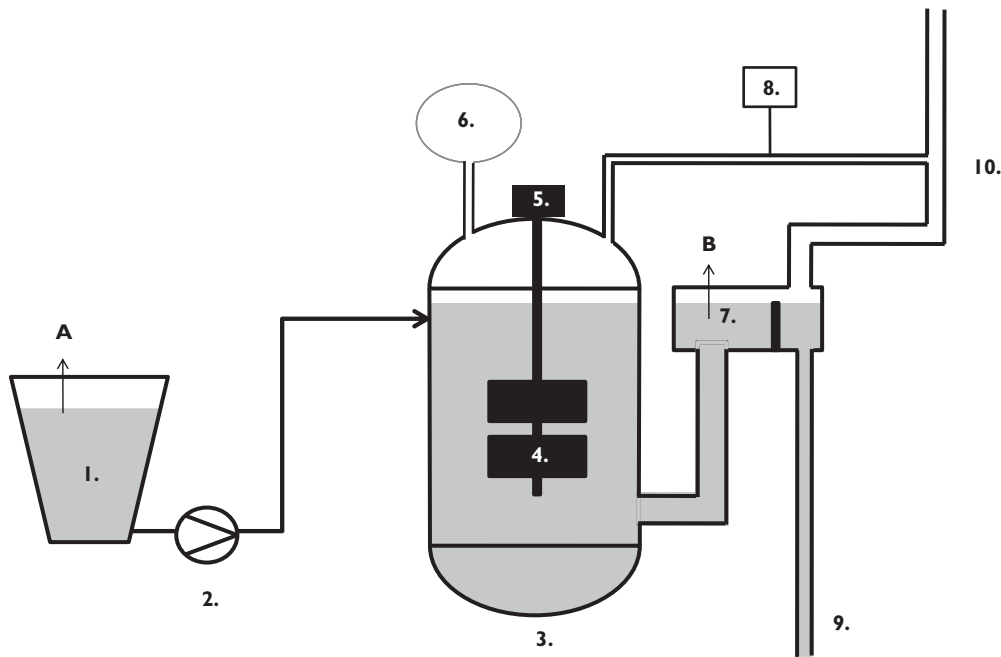
Mädätetyn lietteen jatkokäytön kannalta on tärkeää varmistaa, että taudinaiheuttajat on hävitetty lietteestä, joten mädätysprosessin lämpötilan ja viipymän vaikutusta lietteen hygienisoitumiseen selvitettiin.

Mädätysprosessissa käytettävien materiaalien on kestävä lietteen syövyttävää vaikutusta. Mädätyksen aiheuttamaa korroosiota testattiin eri materiaaleilla sekä mesofiilisessa että termofiilisessä prosessissa.

6.2

Koelaitteiston esittely

Tutkimus toteutettiin HSY:n Suomenojan jätevedenpuhdistamolla sijaitsevalla Suomen ympäristökeskuksen tutkimusasemalla Espoossa, jonne oli rakennettu kahdesta reaktorista sekä mittaus-, seuranta- ja ohjauksjärjestelmästä koostuva pilot-laitteisto. Reaktorit olivat identtisiä yhden kuutiometrin kokoisia kaksilapaisilla pystysekoittimilla varustettuja reaktoreita, joissa nestetilavuus oli 837 litraa ja kaasutilavuus noin 100 litraa (kuva 2). Reaktoreiden ohjauksessa, ajossa, kontrolloinnissa, mittauksissa ja huollossa ei ollut eroa. Ainoa ero reaktoreiden välillä oli prosessilämpötila, eli toinen reaktoreista saatettiin toimimaan termofiilisenä toisen ollessa mesofiilinen. Siemenliete mädätyksen käynnistykseen ja syöttöliete tutkimuskoeajojaksoja varten saatiin Suomenojan jätevedenpuhdistamolta.



Kuva 2. Molempien prosessien kaaviokuva. 1. Syöttösäiliö, 2. Syöttöpumppu, 3. Mädätysreaktori, 4. Sekoitin, 5. Sekoittimen moottori, 6. Kaasun puskuripussi, 7. Lietteiden ylivuotokaukalo, 8. Kaasun laatu- ja määrämittaus, 9. Lietteiden poistoletku, 10. Kaasun poistoletku A. Näytteenottoa syöttölietteelle, B. Näytteenottoa mädätetylle lietteelle

Muodostunut kaasu johdettiin reaktoreiden kaasutilasta muoviletkua pitkin tiiviiseen kylmävesikierron jäähdytetyyn kondenssivesiastiaan, jossa tiivistyi kaasussa ollut kosteus. Sieltä kaasu johdettiin virtaamamittarille ja poistoletkua pitkin tutkimushallin käytöstä poistettuun savupiippuun. Jatkuvatoimiseen pitoisuusmittarille kaasua kierrätettiin kondenssivesiastiasta pienitehoisen imun avulla. Myös reaktio-

reiden lietteen poiston ylivuotokaukaloista oli muodostuvalle kaasulle poistoletkut samaan ilmanvaihtokanavaan.

Koska yksi potentiaalinen turvallisuusongelma oli kaasun pääseminen työympäristöön, rakennettiin mädätysreaktorien ympärille palamattomasta kankaasta kohdeilmanvaihdolla varustettu suojateltta, jolla ehkäistiin mädätyskaasujen leviäminen muualle tutkimushallitiloihin. Teltta pidettiin puhaltimen avulla alipaineessa ja ilmanvaihtoilma johdettiin tutkimushallin käytöstä poistetun savupiipun kautta ulkoilmaan. Valokuvat reaktoreista sekä suojateltasta on esitetty kuvissa 3 ja 4.



Kuva 3. Reaktorit ilman suojatelttaa. Kuva: Ari Kangas



Kuva 4. Reaktorit suojateltan sisällä. Kuva: Ari Kangas

6.2.1

Lämmitys

Reaktoreita lämmitettiin sähköisellä saattolämmityksellä, jonka lämmitysvastuskaapeli oli kiinnitetty reaktoreiden ulkopintaan. Lämmitysteho oli $1,7 \text{ kW/m}^3$. Reaktorit olivat kauttaaltaan eristetty 50 mm paksulla vuorivillalla. Lämpötilaa mitattiin reaktoreista kolmesta pisteestä. Lämpötilan säädön tietokoneohjaukseen oli kytketty Pt100-lämpötila-anturit, joiden mittaustuloksen minuutin keskiarvoa verrattiin asetusarvoon. Tavoitelämpötilat olivat mesofiiliselle reaktorille $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ja termofiiliselle $53 \text{ }^\circ\text{C}$. Tietokoneohjaus käynnisti lämmityksen, kun mittauservo oli laskenut $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ asetusarvon alle ja pysäytti lämmityksen, kun mittauservo saavutti asetusarvon.

Lämpötilan säätöön käytettiin ensisijaisesti tietokoneohjausta, mutta varajärjestelmänä oli omiin mittauksiinsa perustuva epätarkempi termostaattisäätö. Termostaattisäädöllä lämpötilan vaihtelu oli noin $3 - 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Lisäksi käytössä oli manuaalimittaukset, joilla varmistettiin tietokonenäytön lukemat ja termostaatin säätöarvot.

6.2.2

Lietteen syöttö

Syöttölietteenä oli Suomenojan jätevedenpuhdistamon esisakeuttamosta saatu raakasekaliete, jota pumpattiin homogenisoivalla repijäpumpulla. Syöttöliete noudettiin koelaitteistolle eri koejaksoilla eri tavoin. Suomenojan puhdistamolla esisakeutukseen käytetään anionista polymeeriä, jota annostellaan $0,1 \%$ liuoksena keskimäärin $4,3 - 4,5 \text{ g/m}^3$ lietettä.

Syöttösäiliöinä käytettiin ensimmäisen koejakson aikana 200 litran saaveja, joita sekoitettiin aluksi säiliöihin asetetulla ajastetulla uppopumpulla, mutta ne tukkeutuivat nopeasti ja niiden käytöstä luovuttiin jo käynnistysvaiheen aikana. Jatkossa ensimmäisen koejakson aikana syöttösaaveissa ei varastoitu lietettä ja siellä ollutta lietettä sekoitettiin työpäivinä manuaalisesti. Toisen koejakson aikana siirryttiin käyttämään isoja yhteisiä syöttösäiliöitä, jotka toimivat myös syöttölietteen esikäsitteilyreaktoreina.

Lietteen syöttö reaktoreihin tehtiin epäkeskoruuvipumpuilla kello-ohjatusti puoli-jatkuvana. Reaktoriin syötetyn lietteen määrää ja mahdollisia syöttöpumppujen tukkeutumisia voitiin seurata karkeasti syöttösäiliöiden pinnanmuutoksista mittatikkua apuna käyttäen. Pumppujen tuotto määritettiin mitta-astian ja sekuntikellon avulla säännöllisesti koeajojen aikana.

6.3

Mittausmenetelmät

Taulukkoon 1 on kerätty kooste koejaksojen aikana säännöllisesti seuratuista parametreista ja niiden mittausmenetelmistä:

Taulukko 1. Prosessiparametrien säännöllinen seuranta.

Mitattu suure	Yksikkö	Mittausväli	Mittauslaite/menetelmä
Kaasun lämpötila	°C	1 min	Termoelementti
Kaasun tuotto, kumulatiivinen tilavuus	m ³	1 min	Kaasukello
Kaasun tuotto, flow speed	l/h	1 min	Kaasukello
Kaasun jatkuvatoiminen mittaus metaani hiilidioksidi happi rikkivety	til- % til- % til- % ppmv	30 min	Binder Combimass GA-m IR/ alue 0-100 til- % IR/ alue 0-100 til- % sähkökemiallinen, alue 0-25 til- % sähkökemiallinen, alue 0-2000 ppm
Kaasun paine	bar	Minuutin välein	Binder Combimass
Reaktoreiden lämpötilat	°C	Minuutin välein Viikoilla päivittäin	iFix-ohjelmisto Testo-lämpömittari (manuaali- mittaus)
Syöttölietteen määrä	min/vrk → l/vrk	-	Pumppujen ajastuksen ja ominais- pumppausmäärän perusteella laskettava
Syöttölietteen laatu (kuiva-aine TS, orgaaninen aine VS)	%	2-3 kertaa viikossa	SFS 3008:n mukainen sisäinen ohje
Mädätetyn lietteen laatu (kuiva-aine TS, orgaaninen aine VS)	%	2-3 kertaa viikossa	SFS 3008:n mukainen sisäinen ohje
Mädätetyn lietteen pH	-	2-3 kertaa viikossa	pH-elektrodi
Mädätetyn lietteen alkaliteetti (kokonais- ja VFA-alkaliteetit sekä suhde) reaktio- reissa	mmol/l	2-3 kertaa viikossa	SFS-EN ISO 9963-1:n mukainen sisäinen ohje

Prosessin viipymä (d) laskettiin kaavan 1 mukaan:

$$\theta = V_r / Q \quad (1)$$

missä θ on hydraulinen viipymä
 V_r on reaktorin tilavuus
 Q on syötön tilavuusvirta

Orgaaninen tilakuormitus (kgVS/m³d) laskettiin kaavan 2 mukaan:

$$\text{Orgaaninen tilakuormitus} = (TS * (VS- \% / 100) * Q) / V \quad (2)$$

missä TS on kiintoainepitoisuus kg/ m³
 $VS- \%$ on orgaanisen aineen prosenttiosuus kokonaiskiintoaineesta
 Q on syöttövirtaama m³/d
 V on reaktorin tilavuus m³

Orgaanisen aineen reduktio (kgVS/m³d) laskettiin syötetyn orgaanisen aineen ja mädätteen orgaanisen aineen erotuksena.

Lietteen alkaliteetti mitattiin sekä kokonaisalkaliteettina että haihtuvien rasvahap-
 pojen puskuroimiseen tarvittavana alkaliteettina (VFA-alk). Laskettiin myös VFA:n
 ja kokonaisalkaliteetin suhde, jota seuraamalla havaitaan muutokset prosessissa jo
 ennen kuin häiriintynyt prosessi vaikuttaa pH-tasoon. Hyvin toimivassa biokaasu-
 reaktorissa VFA/Alk. – suhde on noin 0,25 tai pienempi. (Latvala 2009)

SYKEN tutkimusaseman yhteydessä on käyttölaboratorio, jota käytettiin lietenäyt-
 teiden analysoimiseen. Käyttölaboratorio on Finasin tarkastama ilmoitettu laitos.

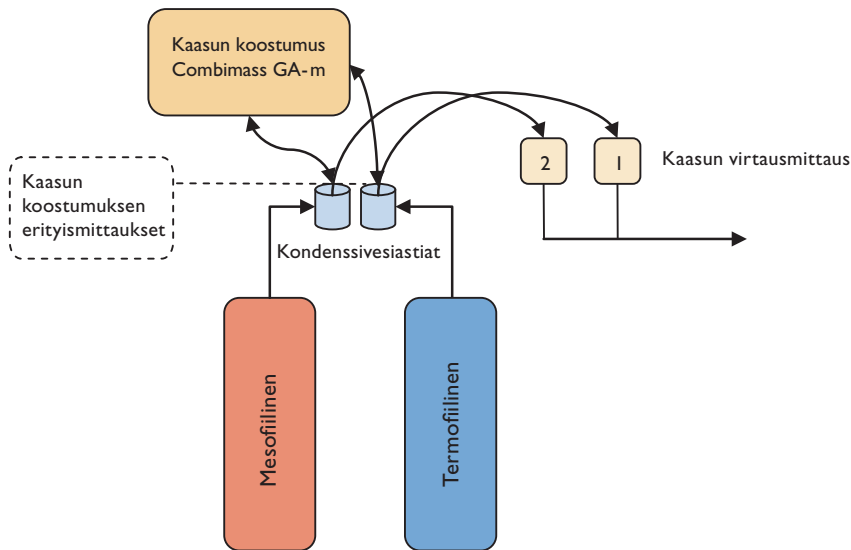
Kaasunkeruu ja -mittaus

Virtausmittaus suoritettiin kahdella identtisellä kaasukellolla, jotka mittasivat tilavuusvirtaa. Kaasukellot oli kytketty automaattiseen tiedonkeruuseen ja tiedot tallentuivat suoraan tietokoneelle.

Kaasun koostumusta mitattiin jatkuvatoimisesti Binder Combimass GA-m -monikomponenttianalyysaattorilla.

Pelkistyneitä rikkiyhdisteitä mitattiin kahdella eri tavalla; jatkuvatoimisesti Binder Combimass GA-m -monikomponenttianalyysaattorin H₂S-kennolla ja ajoittain kaasukromatografisesti Photovac Voyagerilla. Jatkuvatoiminen mittausmenetelmä reagoi kaikkiin pelkistyneisiin rikkiyhdisteisiin, kun taas kaasukromatografisesti saadaan mitattua eri pelkistyneet rikkiyhdisteet spesifisesti.

Mittausjärjestely on esitetty kaaviona kuvassa 5 ja valokuvana kuvassa 6.



Kuva 5. Mittausjärjestely TERMOS-projektissa Suomenojan koereaktoreilla vuosina 2009 - 2010.



Kuva 6. Kiinteästi asennetut kaasun virtaus- ja koostumusmittarit. Kuva: Tuula Kajolinna

Erityisselvitykset

Edellä mainittujen analyysien lisäksi koeajojaksojen aikana selvitettiin ajoittain seuraavia mädätyksen lopputuotteiden laatuun liittyviä tekijöitä (taulukko 2).

Kaasun hiilivety- ja siloksaanipitoisuuksia mitattiin aika-ajoin TenaxTA-adsorptioputkiin otetuista kerta-äytteistä, jotka otettiin samanaikaisesti Tedlar-kaasupussinäytteenoton kanssa. TenaxTA-adsorptioputkiin otettiin reaktoreiden tuottamaa kaasua 100 - 200 ml/putki. Näytteet analysoitiin ATD-GC-MS-menetelmällä VTT Expert Service Oy:ssä. Tuloksien hiilivety- ja trimetyylisilanolipitoisuudet ilmoitettiin tolueeniekvivalenttina. Siloksaanipitoisuudet ilmoitettiin puhdasainepitoisuutena.

Rikkivetypitoisuutta määritettiin jatkuvatoimisen analysaattorin yhteydessä olevalla sähkökemiallisella kennolla. Sähkökemialliset kennot eivät tyypillisesti ole spesifisiä mitattaville komponenteille, vaan ne toimivat lähinnä indikaattoreina, jotka reagoivat myös muihin samantyyppisiin komponentteihin. Toisella käynnistysjaksolla päätettiin mitata rikkivety ja muut pelkistyneet rikkiyhdisteet myös spesifisellä mittaumenetelmällä, kaasukromatografilla.

Pelkistyneitä rikkiyhdisteitä mitattiin ensimmäisen koejakson aikana kolme kertaa Tedlar-kaasupussinäytteistä. Kaasunäytteitä otettiin kolmen eri kuormitusvaiheen aikana; aloitusvaiheessa, 5. kuormitusvaiheessa ja ylikuormitusvaiheessa. Termofiiliprosessin pelkistyneiden rikkiyhdisteiden pitoisuuksia mitattiin toisella koejaksolla myös jatkuvatoimisesti mittaussyksössä, joka kattoi ensimmäisen kuormitusvaiheen.

Vetypitoisuuksia määritettiin ensimmäisellä koejaksolla mesofiilisesta prosessista kahdella eri kuormitusjaksolla ja termofiilisestä neljällä eri kuormitusjaksolla. Vetypitoisuus mitattiin toisen käynnistysjakson aikana kromatografisesti.

Poistettavan lietteen hajupitoisuutta ja hajua aiheuttavien hiilivety-yhdisteiden pitoisuuksia määritettiin olfaktometrisesti ja kaasukromatografisesti sekä MS GC:llä kaksi kertaa. Lietenäytteet otettiin ensimmäisellä koejaksolla (10/2009) ja toisella koejaksolla (9/2010). Lietenäytteenotossa termofiili- ja mesofiilireaktoreista otettiin 12 litraa lietettä, lisättiin polymeeriä ja sekoitettiin voimakkaasti, minkä jälkeen ämpärit

Taulukko 2. Ajoittain tehdyt erityisselvitykset.

Mitattu suure	Yksikkö	Mittausväli	Mittauslaite/menetelmä
Kaasun siloksaani-pitoisuus	µg/m ³	10/2009 ja 9/2010	TenaxTA + ATD-GC-MS
Kaasun pelkistyneet rikkiyhdisteet	ppmv	1 h	Photovac Voyager / kaasukromatografi
Kaasun vetypitoisuus	ppmv	1 h	Agilent 3000A µGC / kaasukromatografi
Mädätetyn lietteen hajuyhdisteet	µg/m ³	9/2010	TenaxTA + ATD-GC-MS
Mädätetyn lietteen haju	Haju-yksikköä/m ³ (ou _E /m ³)	10/2009 ja 9/2010	Olfaktometri, SFS-EN 13725
Mädätetyn lietteen kuivattavuus	-	6/2010-7/2010	CST
Erotusveden laatu, NH ₄ -N, COD _{Cr}	mg/l	6/2010-9/2010	NH ₄ -N: ISO 6778 (ionimittari, kahden tunnetun lisäyksen menetelmä) COD _{Cr} : ISO 15705 ja SFS 5504 perusteella (analyysiputkimenetelmä + titraus)
Mädätetyn lietteen hygieeniset ominaisuudet, <i>E. coli</i> , Salmonella	pmy/g	12/2009 ja 1/2010	<i>E. coli</i> : RapidEcoli-agar 44 °C, 24 h Salmonella: NMKL 71:1999, muunneltu
Lietteen aiheuttama korrosio	-	1 kk, 6 kk ja 12 kk	Silmämääräisesti ja mikroskoopilla

suljettiin. Käytetty polymeeriannos oli 4 kg/kuiva-ainetonni, joka on sama annostus kuin Suomenojalla linkouksessa käytettävä. Myös käytetty polymeeri oli sama kuin Suomenojan puhdistamolla. Laskeutumisen jälkeen molemmista ämpäreistä poistettiin 2 litraa nestettä ja annettiin seosten tasaantua kannet kiinni pidettynä 1,5 tuntia ennen hajanäytteiden ottoa.

Eri mädätysprosessien lietteiden kuivattavuutta selvitettiin CST-määrittäyksillä (Capillary Suction Time). Määrittäyksiä tehtiin neljänä näytteenottopäivänä kesän 2010 aikana, jolloin reaktoreissa viipymä oli 19,7 d ja kuorma 1,61 kgVS/m³d. CST-määrittäyksiä tehtiin aina 6 rinnakkaista kustakin näytteestä, koska menetelmän validoinnissa oli havaittu merkittävää hajontaa.

Rejektivesien eroa mesofiilisen ja termofiilisen mädätyksen välillä tutkittiin sentrifugoimalla lietenäytteet ja tekemällä määrittäykset supernatantista. Näytteitä otettiin 11 kertaa.

Ensimmäisenä kuormitusjaksona tehtiin erityisselvitys lietteen hygienisoitumisesta mädätyksessä kahdella eri viipymällä. Näytteet otettiin syöttölietteen lisäksi sekä termofiilisesta että mesofiilisestä mädätyksestä, joissa oli sama viipymä. Näytteistä määritettiin lannoitevalmistelainsäädännön hygieniaindikaattorit: *E.coli* (enintään 1 000 pmy/g) ja Salmonella (ei todettavissa). Ensimmäisellä näytteenottokerralla viipymä mädätysreaktoreissa oli 14,7 päivää ja toisella kerralla 13,1 päivää.

Lisäksi selvitettiin korroosiokysymyksiä pilot-reaktoreihin asetettujen koekappaleiden avulla. Tyypillisistä mädättämörakenteiden materiaaleista valmistetut koekappaleet asetettiin reaktoreihin niin, että osa kappaleesta oli kaasutilassa ja osa lietteessä. Koekappaleiden korroosiotarkastelut tehtiin määrävälein prosessikoeajojen edetessä. Materiaalien kestävyyskäyttäytymistä mädätysreaktoreissa ja prosessilämpötilan vaikutusta selvitettiin asentamalla kumpaankin mädätysreaktoriin betonista ja teräksestä valmistettuja koemateriaalikappaleita seuraavasti:

- Haponkestävää terästä, laatu AISI 316, 1-1 (mesofiiliseen reaktoriin) ja 1-2 (termofiiliseen reaktoriin). Tankojen halkaisijat 22 mm.
- Mustaa terästä, laatu Fe 37B, 2-1 (mesofiiliseen reaktoriin) ja 2-2 (termofiiliseen reaktoriin). Tankojen halkaisijat 22 mm.
- Epoksinnoitetut betonitangot 3-1 (mesofiiliseen reaktoriin), 3-2 (termofiiliseen reaktoriin) ja 3-vertailu. Tankojen halkaisija 36,2 mm, pituus 550 mm.

Betoninäytteiden raaka-aineet ja valmistusmenetelmä kuvataan liitteessä 1.

Näytekappaleet asennettiin reaktoreihin 3.9.2009 ja reaktori 2:n lämpötila nostettiin termofiilialueelle (55 °C:een) 7.9.2009. Näytteet asennettiin reaktoreihin siten, että materiaali oli osittain nestepinnan alapuolella, jotta pystyttäisiin arvioimaan erityisesti rajapinnan käyttäytymistä reaktoriolosuhteissa. Betoni- ja teräsnäytteiden tilanne tarkistettiin 1, 3 ja 6 kuukauden kuluttua kokeen alusta. Teräsnäytteet tarkastettiin silmämääräisesti ennen pesua ja pesun jälkeen sekä tarpeen vaatiessa myös stereomikroskoopilla. Pesu suoritettiin vesijohtovedellä kevyesti pehmeällä harjalla harjaten. Tarkastuksien jälkeen kaikki tangot palautettiin reaktoreihin jatkoaltistusta varten.

6.4

Koeaikataulu

Pilot-reaktoreiden koeajot kestivät kaiken kaikkiaan yhteensä noin 15 kuukautta. Koeajot jakaantuivat kahteen koeajojaksoon, jotka kumpikin koostuivat mesofiilisestä käynnistyksestä, toisen reaktorin siirtymisestä termofiiliseen prosessiin ja vaiheittai-

sesta kuormituskokeesta. Ensimmäinen koejakso suoritettiin 25.8.2009 – 14.2.2010 ja toinen 28.4.2010 – 17.9.2010. Koejaksojen osat sekä erityisselvitysten ajoittuminen käyvät ilmi taulukoista 3 ja 4.

Taulukko 3. Ensimmäinen koeajojakso.

JAKSO I		2009 / viikko													2010 / viikko												
Pvm	Vaihe	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	1	2	3	4	5	6
25.8.2009 - 6.9.2009	Käynnistysvaihe			●																							
7.9.2009 - 28.9.2009	Siirtymävaihe, stabilointi																										
29.9.2009 - 18.10.2009	Stabiili välivaihe							●	●	●																	
19.10.2009 - 8.11.2009	Kuormitusvaihe 1																										
9.11.2009 - 29.11.2009	Kuormitusvaihe 2																										
30.11.2009 - 20.12.2009	Kuormitusvaihe 3																										
21.12.2009 - 3.1.2010	Stabiili välivaihe																										
4.1.2010 - 24.1.2010	Kuormitusvaihe 4																										
25.1.2010 - 14.2.2010	Kuormitusvaihe 5																										
Erityisselvitykset				1.	2.			3.	4.	5.						6.	7.		8.					9.			

Ensimmäisen jakson erityisselvitysten selitykset (punaiset merkit):

1. Materiaalisauvojen asennus reaktoreihin korroosioselvitystä varten 3.9.2009
2. Vetymittaus tuotetusta kaasusta 14.9.2009 - 1.10.2009
3. Näytteenotto tuotetusta kaasusta analyysijä varten 2.10.2009
4. Materiaalisauvojen poistaminen reaktoreista välitarkastusta varten 7.10.2009
5. Näytteenotto lietteen hajumääritystä varten 14.10.2009
6. Syöttölietteen laadunmuutoksen analysointi 27.11.2009 vs. 30.12.2009
7. Syöttölietteen laadunmuutoksen analysointi 4.12.2009 vs. 7.12.2009
8. Lietteen hygienianalyysi 15.12.2009
9. Lietteen hygienianalyysi 20.1.2010

Taulukko 4. Toinen koeajojakso.

JAKSO 2		2010 / viikko																							
Pvm	Vaihe	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36				
28.4.2010 - 25.5.2010	Käynnistysvaihe																								
25.5.2010 - 9.6.2010	Siirtymävaihe, stabilointi																								
10.6.2010 - 23.7.2010	Kuormitusvaihe 1																								
24.7.2010 - 24.8.2010	Kuormitusvaihe 2																								
25.8.2010 - 17.9.2010	Kuormitusvaihe3																								
Erityisselvitykset		10.								11.	12.	13.	14.												

Toisen jakson erityisselvitysten selitykset (punaiset merkit):

10. Vetymittaus R2 28.4 - 1.7.2010
11. Lietteen kuivattavuuskokeet 17.6.2010
12. Lietteen kuivattavuuskokeet 1.7.2010
13. Lietteen kuivattavuuskokeet 8.7.2010
14. Lietteen kuivattavuuskokeet 15.7.2010

7 Koeajojen tulokset ja niiden tarkastelu

7.1

Käynnistysjaksot

7.1.1

Mesofiilinen käynnistys

Siemenliete kumpaankin reaktoriin haettiin Suomenojan puhdistamon mädättämöstä. Kun nouto ja siirto tehtiin ripeästi 1 m³:n lietekontilla, ei mihinkään erityisjärjestelyihin ollut syytä. Reaktorit täytettiin ja kun sekoitus ja lämmitys laitettiin päälle, tuottivat reaktorit stabiilisti kaasua ja prosessi oli valmiudessa lietteen syötön aloitukseen.

Syöttöliete haettiin 1 m³:n lietekontilla, johon puhdistamon esisakeuttamosta pumpattiin lietettä. Kontista täytettiin sitten reaktorien noin 200 litran syöttösäiliöt aina tarvittaessa. Kontti käytiin täyttämässä aluksi kerran viikossa, mutta kokeiden loppupuolella lietettä haettiin kontilla kaksi kertaa viikossa, koska lietteessä näytti alkavan tapahtua käymisreaktioita jo kontissa. Tällä epäiltiin olevan vaikutusta reaktorien kaasuntuottoon ja aiheuttavan päivittäisessä kaasuntuotossa suuriakin vaihteluita. Lietekontin siirtoon käytettiin pientä peräkärnyllistä traktoria.

Ennen siirtymää termofiiliseen prosessiin ajettiin kumpaakin reaktoria lähes 2 viikkoa mesofiilisenä, jotta varmistuttiin prosessin vakaudesta ja että saatiin referenssimittaustietoja.

7.1.2

Muutos termofiiliseksi

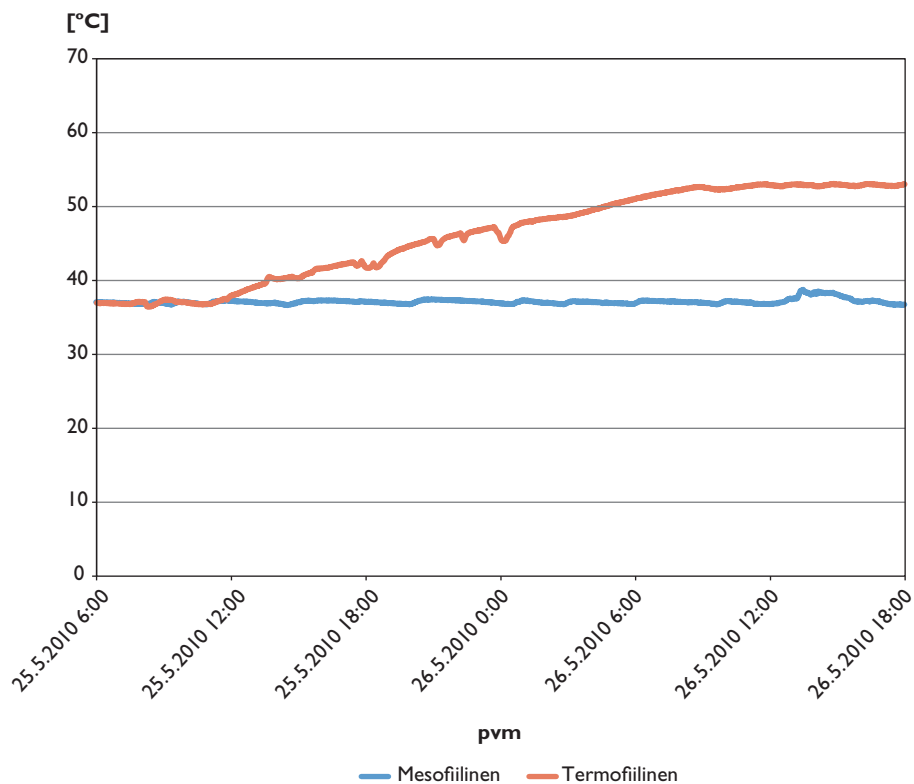
Anaerobisen mädätysprosessin lämpötilan nosto mesofiiliselta (35 - 37 °C) tasolta termofiiliselle (50 - 55 °C) voidaan toteuttaa joko hitaasti asteittain antamalla prosessin stabiloitua jokaisen lämpötilan noston jälkeen, tai vaihtoehtoisesti nopeasti, jolloin lämpötila nostetaan suoraan halutulle tasolle ja annetaan prosessin sen jälkeen stabiloitua. Molemmista lämmönnostotavoista on raportoitu sekä positiivisia että negatiivisia kokemuksia.

TERMOS-hankkeessa syksyllä 2009 prosessimuutoksessa mesofiilisestä termofiiliseksi lämpötila päätettiin nostaa mahdollisimman nopeasti. Tärkeimpiä perusteita valitulle menettelylle olivat, että vaiheittaisesta lämpötilannostosta ei ole raportoitu huomattavia hyötyjä prosessin stabiiliuteen ja että lämpötila-alue 43 - 50 °C on osoittautunut epästabiiliksi (Garber 1982; Iranpour ym. 2002; de la Rubia ym. 2005).

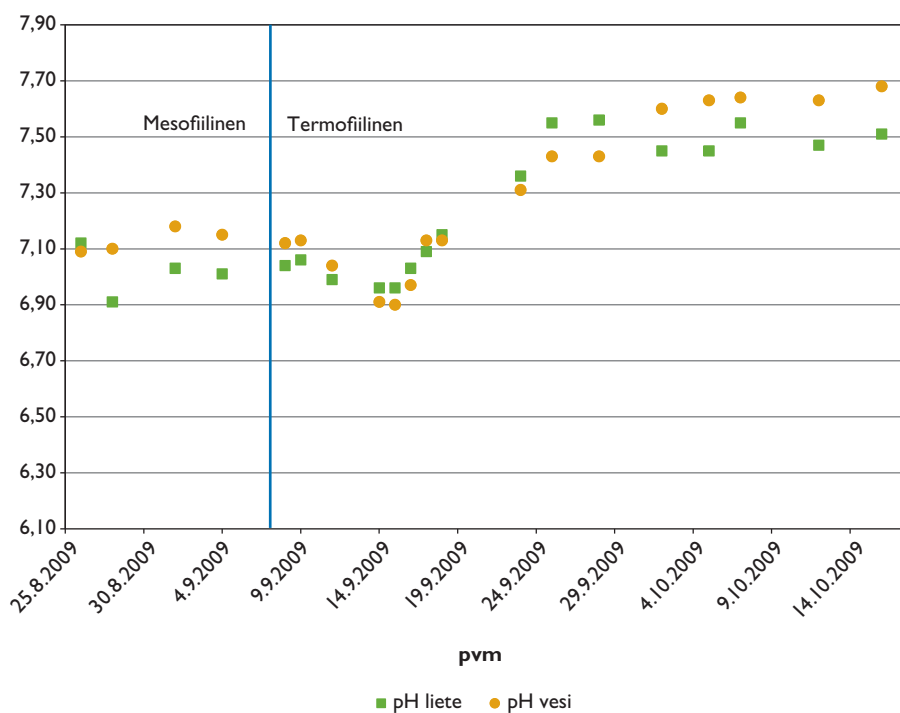
Lietettä pumpattiin reaktoreihin sekä käynnistys- että siirtymävaiheen aikana koko ajan sama määrä, 40,8 l/d, jolloin viipymä reaktoreissa oli 20,5 d. Kuorman vaihtelut tulivat lietteen kuiva-aineen ja orgaanisen aineen pitoisuuksien vaihtelusta. Orgaaninen kuormitus vaihteli välillä 1,9 - 2,2 kgVS/m³d, mikä on tyypillinen kuormitustaso Suomen lietemädättämöissä.

Termofiilinen lämpötila reaktorissa 2 saavutettiin vuorokaudessa (kuva 7). Reaktori 1 jätettiin toimimaan mesofiilisella tasolla. Heti lämpötilan lähdettyä nousuun alkoivat muutokset kaasun laadussa ja määrässä.

Kuvassa 8 on esitetty reaktorissa 2 termofiiliseen prosessiin siirtymisen seurauksena tapahtunut pH:n vaihtelu ensimmäisenä käynnistysjaksona. pH-arvo nousi reaktorissa noin 0,5 yksikköä.



Kuva 7. Toisen käynnistysvaiheen lämpötilan nosto; lämpötilat mesofiilisessa ja termofiilisessa reaktorissa.

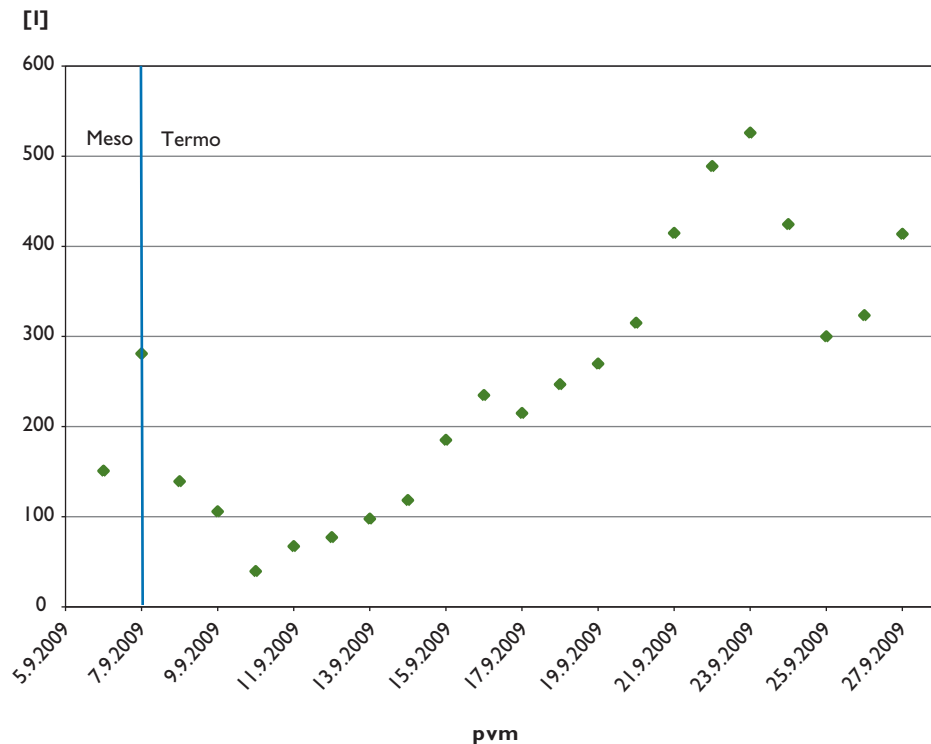


Kuva 8. pH:n vaihtelu termofiilisessa reaktorissa lämpötilan noston seurauksena.

7.1.3

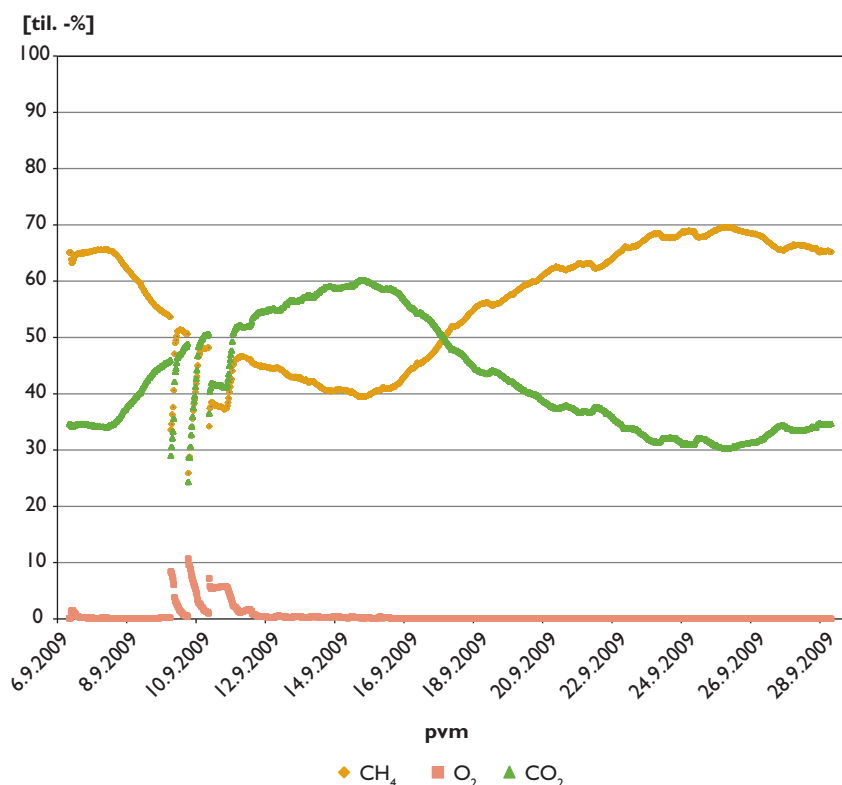
Käynnistysvaiheiden tulokset ja niiden tarkastelu

Välittömästi lämpötilannoston jälkeen biokaasuntuotto termofiilireaktorissa lähti hetkellisesti jyrkkään nousuun, mikä voidaan todeta kuvasta 9. Kyse ei liene siitä, että hieman normaalia mesofiilistä lämpötilaa korkeammassa lämpötilassa (noin 40 °C) kaasuntuotto olisi suurempi kuin tavanomaisessa mesofiilisessä lämpötilassa (35 - 37 °C) vaan todennäköisempi selitys on se, että hiilidioksidi reaktorin sisällä ei enää pysynyt liukoisena ja kasvatti näin ollen kaasuntuottolukemaa. Tätä oletusta tukee myös kuvassa 10 esitettävä kaasun pitoisuuskuvaaja, josta ilmenee kaasumittareiden havaitsema samanaikainen hiilioksidipitoisuuden nousu.



Kuva 9. Kaasuntuotto muutoksessa mesofiilisestä termofiiliseksi.

Lämpötilannoston jälkeisen hetkellisen kaasumittareiden havaitseman kaasuntuoton piikin jälkeen tuotto romahti, mutta palautui takaisin ennen lämpötilannostoa vallinneeseen tilanteeseen noin 8 päivässä. Sen jälkeen kaasuntuotto jatkoi kasvuaan saavuttaen huippuarvonsa 24.9.2009, eli 17 päivää lämpötilannoston jälkeen. Kaasuntuoton huippuarvon (525 l/d) jälkeen käyrä lähti laskuun, pysähtyi noin 300 litraan päivässä ja lähti sen jälkeen uudestaan nousuun. Kaasuntuoton korkeat arvot osuvat samaan ajankohtaan haihtuvien rasvahappojen (VFA) pitoisuuden pienenemisen kanssa. Suureen kaasuntuottoon saattaa olla selitys siinä, että reaktorissa kumuloituneet rasvahapot hajoavat kerralla suuressa määrin pois ja aiheuttavat siten suuren kaasuntuottolukeman. Asetaatti ja propionaatti hajoavat tyypillisesti eri aikaan, mutta tässä tutkimuksessa niiden pitoisuuksia ei mitattu erikseen.



Kuva 10. Biokaasun laatu muutoksessa mesofiilisestä termofiiliseksi (Kuvaajassa olevat poikkeamat johtuivat kaasun vastavirtauksista mittaussyksikössä).

Vaihtelevia kaasuntuottoarvoja voi selittää myös sisään syötettävän lietteen laadun vaihtelu. Samaa lietettä mädätysprosesseissaan käytävällä Suomenojan puhdistamolla havaitaan yleisesti jopa 30 % eroja päivittäisissä kaasuntuottolukemissa.

Kirjallisuuteen verrattaessa käyttäytyi biokaasuntuotto tässä kokeessa samalla lailla. Bouskován ym. (2005) suorittamassa kokeessa biokaasuntuotto romahti minimiarvoonsa kahden päivän sisällä lämpötilannostosta, kaasuntuotto lähti parantumaan 8 päivää lämpötilannoston jälkeen ja saavutti selvästi normaalia suuremman arvon 17 päivän jälkeen. Myös tässä kokeessa voidaan havaita kaasuntuoton piikki 17 päivää lämpötilannoston jälkeen.

Biokaasun koostumuksen osalta (kuva 10) havaitaan metaanipitoisuuden lasku välittömästi lämpötilannoston jälkeen ja minimipitoisuus 39,5 % saavutettiin 7 päivää lämpötilannoston jälkeen. Biokaasun hiilidioksidipitoisuus käyttäytyi käänteisesti metaanipitoisuuden kanssa. Hiilidioksidipitoisuus lähti lämpötilannoston jälkeen nousemaan ja saavutti maksiminsa 60,2 % samaan aikaan kun metaanipitoisuus miniminsä.

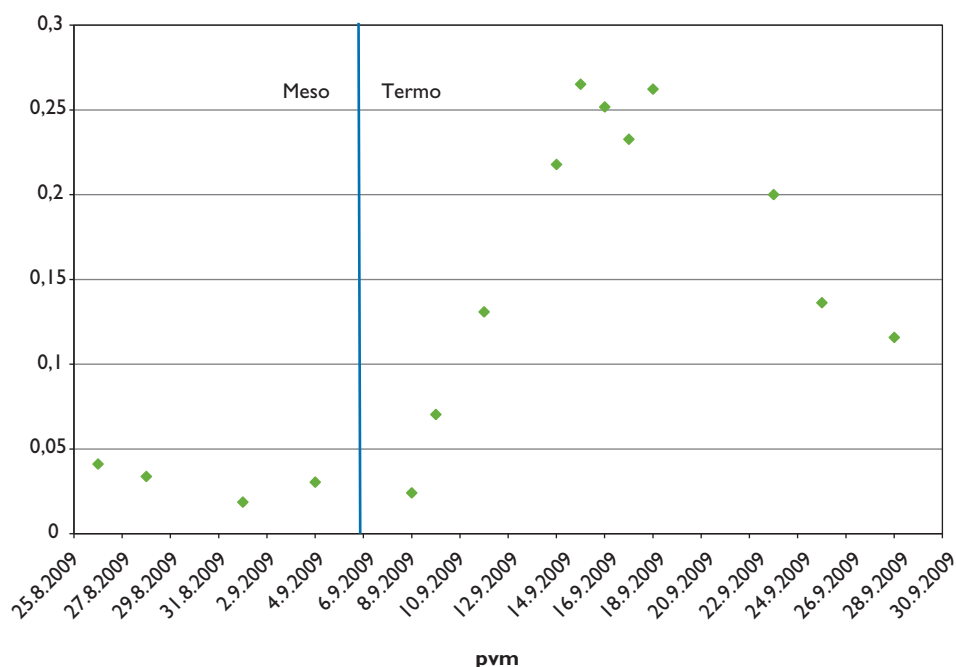
Pitoisuudet palautuivat vähitellen lämpötilan nostoa edeltäneen stabiilin tilanteen tasolle, missä kaasujen pitoisuudet olivat luokkaa 64 - 65 % CH₄ ja 34 - 35 % CO₂. Kaasun laadun suhteen termofiilisen prosessin katsottiin saavuttaneen stabiilin tilan kolme viikkoa lämpötilan nostamisen jälkeen, jolloin metaani- ja hiilidioksidipitoisuuksien vaihtelut olivat pysyneet vähäisinä (< 10 %) viikon ajan.

Biokaasun metaanipitoisuus käyttäytyi samalla lailla kuin Bouskován ym. (2005) kokeessa. Heillä metaanipitoisuus saavutti minimiarvonsa (32 %) 11 päivää lämpötilannoston jälkeen, mutta lähti nopeasti nousemaan ja palautui viikossa aikaisemmalle tasolle.

Biokaasun rikkivetyypitoisuudet lähtivät termofiiliseen lämpötilaan siirryttäessä jyrkkään nousuun noin 4 päivää lämmönoston jälkeen. Rikkivetyypitoisuus saavutti maksimiarvonsa 129 ppm alle viikossa, minkä jälkeen pitoisuudet lähtivät nopeasti laskuun. Tämä on tarkemmin kuvattu luvussa 7.4.2.

Alkaliteettisuhde (haihtuvien happojen alkaliteetin, VFA suhde kokonaisalkaliteettiin, TA) nousi vastaavasti siirryttäessä termofiiliseen prosessiin (kuva 11.). Alkaliteettisuhde oli viikon kuluttua korkeimmillaan ylittäen stabiilin prosessin raja-arvon 0,25 ja vaihdellen välillä 0,21 - 0,26. Suhdeluku laski kuitenkin kolmessa viikossa arvoon 0,10 - 0,15 ilman, että reaktorin syöttöön olisi puututtu. Vastaavia tuloksia saivat myös Iranpour ym. (2001), mutta he keskeyttivät syötön kokonaan VFA- pitoisuuden lähtiessä nousuun reaktorissa. Heidän tutkimuksessaan VFA/TA suhde nousi jopa suuremmaksi kuin 0,50, mutta laskeutui ajan myötä tasolle 0,1.

Toisella koejaksolla muutos mesofiilisesta mädätysprosessista termofiiliseksi toteutettiin samalla tavoin kuin ensimmäisellä koejaksolla. Tulokset olivat hämmästyttävän samanlaisia. Kaasuntuotannon ja laadun muutokset olivat identtisiä, alkaliteettisuhteen muutos ja rikkivetypitoisuuden nousu olivat jonkin verran lievemmät, mutta täsmälleen samanaikaiset. Myös prosessin stabiloituminen tapahtui ajallisesti samalla lailla. Käynnistysjaksojen identtisyys vuoksi tuloksia ei esitetä erikseen toiselle käynnistykselle.



Kuva 11. Alkaliteettisuhde (VFA/kok. alk.) muutoksessa mesofiilisestä termofiiliseksi.

7.2

I. kuormitusjakso

Kuormituskokeiden tavoitteena oli selvittää termofiilisen ja mesofiilisen mädätysprosessin kuormitettavuus ja kuormituserojen vaikutus prosessiin. Ensimmäisessä jaksossa käytettiin suoraan Suomenojan jätevedenpuhdistamon mädättämöiden syöttölietettä. Orgaaninen kuorma eri jaksoiden eri kuormitusvaiheille määritettiin etukäteen olettaen, että syöttölietteen kuiva-ainepitoisuus TS on keskimäärin 6 % ja kuiva-aineen orgaanisen aineen osuus on keskimäärin 65 %. Ensimmäisessä jaksossa oli viisi kuormitusvaihetta, joista jokainen kesti noin kolme viikkoa. Tarkoituksena oli lopulta kuormitusvaiheiden jälkeen ylikuormittaa prosessi, jolloin sen sietokyky

selviäisi. Ensimmäisen kuormituskoejakson toteutuneet kuormitusvaiheet käyvät ilmi taulukosta 5. Korkein saavutettu keskimääräinen kuormitustaso ei ollut niin suuri mitä olisi haluttu.

Taulukko 5. Ensimmäisen kuormituskoejakson vaiheet.

	I. Kuormituskoejakso	Viipymä	Orgaaninen kuorma
	aika	[d]	[kgVS/m ³ d]
1. vaihe	19.10.2009–8.11.2009	19,4	2,36
2. vaihe	9.11.2009–29.11.2009	16,7	2,56
3. vaihe	30.11.2009–20.12.2009	14,7	2,70
4. vaihe	4.1.2010–24.1.2010	13,1	3,30
5. vaihe	25.1.2010–14.2.2010	11,2	4,35

7.2.1

I. kuormitusjakson prosessiolosuhteet

Liitteessä 2 on esitetty kuvaajat reaktoreiden lämpötilasta, pH:sta ja alkaliteetista sekä syötetyn ja mädätetyn lietteen kiintoaineen ja orgaanisen aineen pitoisuudesta. Reaktoreiden lämpötila pysyi suurin piirtein oikealla tasolla koejakson aikana vaikka lämpötilaohjaus pettikin useamman kerran (kuva 32). "Sahaamista" esiintyy koska tietokoneohjauksen kytketyessä pois päältä turvauduttiin termostaattiohjaukseen, joka oli varmempi mutta karkeampi. Lämpötilavaihtelut eivät kuitenkaan näyttäneet heikentävän prosessin toimintaa. Mädätetyn lietteen pH pysyi vakaana koko koejakson aikana molemmissa reaktoreissa (kuva 33). Alkaliteetti laski viipymän lyhentyessä ja kuormituksen lisääntyessä, mutta pysyi hyvällä tasolla koko ajan (kuva 34). Syöttölietteen kiintoainepitoisuus vaihteli paljon (4 % ja 9 % välillä) (kuva 36). Kiintoaineen orgaaninen osuus pysyi melko tasaisena (noin 70 %) (kuva 37).

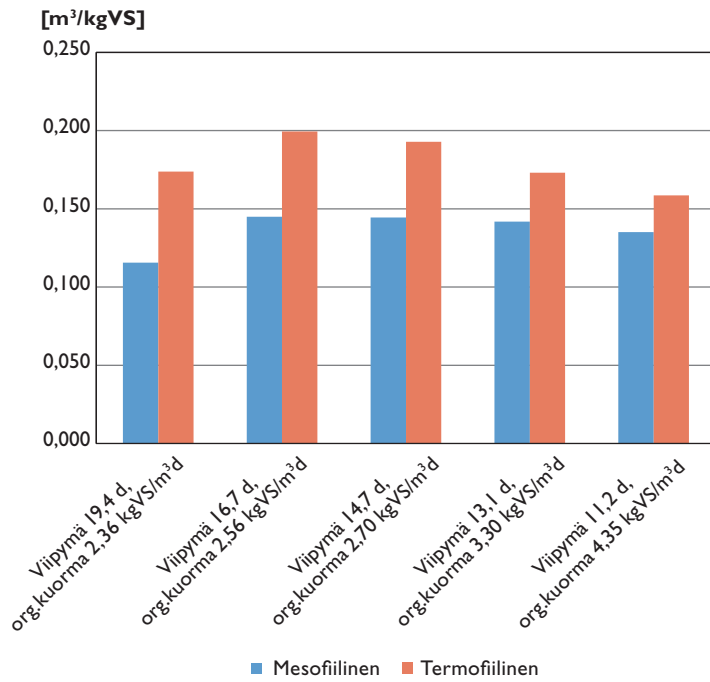
7.2.2

I. kuormitusjakson tulokset ja tulosten tarkastelu

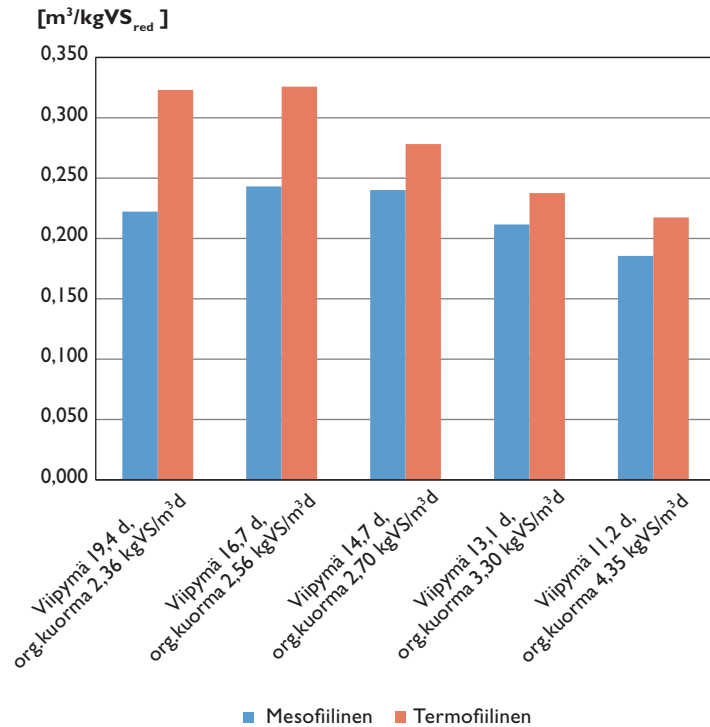
Termofiilinen prosessi tuotti ensimmäisen kuormituskoejakson aikana sekä absoluuttisesti että lietteen syöttöön tai orgaanisen aineen hajoamiseen suhteutetusti enemmän kaasua kuin mesofiilinen prosessi. Ero pienentyi viipymän lyhenemisen myötä (kuvat 12 ja 13). VS-reduktio oli molemmissa reaktoreissa melkein samalla tasolla, neljänä ensimmäisinä vaiheina termofiilisessa reaktorissa reduktio oli hieman korkeampi. Koejakson alussa VS-reduktio oli keskimäärin runsaat 50 % ja sen lopussa keskimäärin yli 70 %. Suuremmalla kuormituksella saatiin siis aikaisiksi suurempi reduktio.

Kirjallisuudessa esitettyjä tyypillisiä arvoja kaasuntuotannolle hajonnutta orgaanista ainetta kohti ovat esimerkiksi 0,75 - 1,12 m³/kgVS_{red} (Tchobanoglous ym. 2003) sekä 0,8 - 1,1 m³/kgVS_{red} (Vesilind ja Rooke 2003). Ensimmäisen kuormituskoejakson aikana oli keskimääräinen kaasuntuotanto hajonnutta orgaanista ainetta kohti suurimmillaan termofiilisessa reaktorissa toisessa kuormitusvaiheessa (0,33 m³/kgVS_{red}), minkä jälkeen se hiipui tasaisesti. Mesofiilisessa reaktorissa vastaava suurin arvo (0,24 m³/kgVS_{red}) saavutettiin toisessa kuormitusvaiheessa. Luvut ovat merkittävästi kirjallisuudessa esitettyjä pienempiä.

Koska suhteellinen kaasuntuotanto ensin kasvaa ja sitten pienenee, voisi päätellä että optimaalinen viipymä, eli mahdollisimman pieni viipymä jolla tuotetaan mahdollisimman suuri määrä kaasua, löytyisi käännepisteestä. Tämä tarkoittaisi että optimaalinen viipymä mädätysprosessille suhteutetun kaasuntuotannon perusteella olisi noin 15 päivää.



Kuva 12. Kaasuntuotto syötetystä orgaanisesta aineesta ensimmäisen kuormituskoekajakson aikana (m³/kgVS).



Kuva 13. Kaasuntuotto hajonneesta orgaanisesta aineesta ensimmäisen kuormituskoekajakson aikana (m³/kgVS_{red}).

Tarkemmat kuvaajat päivittäisestä kaasuntuotosta on esitetty liitteessä 3. Kaasuntuotossa on havaittavissa päiväkohtaisesti suuriakin vaihteluita vastaavasti kuin samaa lietettä mädätysprosesseissaan käyttävällä Suomenojan puhdistamolla. Vaihtelevia kaasuntuottoarvoja voi selittää syöttölietteen laadun vaihtelu.

7.3

2. kuormitusjakso

7.3.1

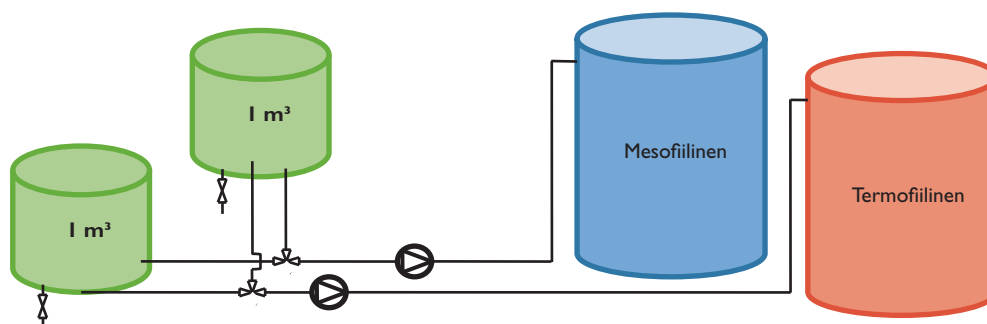
Esikäsitteily

Ensimmäisellä kuormitusjaksolla huomattiin, että lietteessä vaikutti tapahtuvan käymisreaktioita sen seistessä syöttösäiliöissä viikonloppujen yli. Näitä laadunmuutoksia selvitettiin ylimääräisillä laboratorionkokeilla ennen ja jälkeen viikonloppua kaksi kertaa (ajankohdat merkitty aikajanaan, taulukko 3). Tulokset osoittivat että lietteessä tapahtuu parissa päivässä sakeutumista flotaatiolla sekä myös laadullisia muutoksia. Tulokset on esitetty taulukossa 6.

Toisessa kuormituskoejaksossa edellä kuvattua fermentoitumisilmiötä haluttiin hyödyntää ja syöttölaitteisto järjestettiin sellaiseksi, että käytettiin kahta syöttösäiliötä. Liete pumpattiin Suomenojan puhdistamon sakeuttamosta ja se sai vuorotellen fermentoitua toisessa säiliössä 2 - 3 päivää, minkä jälkeen erottunut lietevesi johdettiin pois ja fermentoitunut, flotaatiolla sakeutunut ja sekoitettu liete syötettiin kooreaktoreihin sillä aikaa kun toinen syöttösäiliö vuorostaan toimi esikäsitteilyreaktorina (kuva 14).

Taulukko 6. Sakeuden ja alkaliteetin muutos esifermentaatiassa.

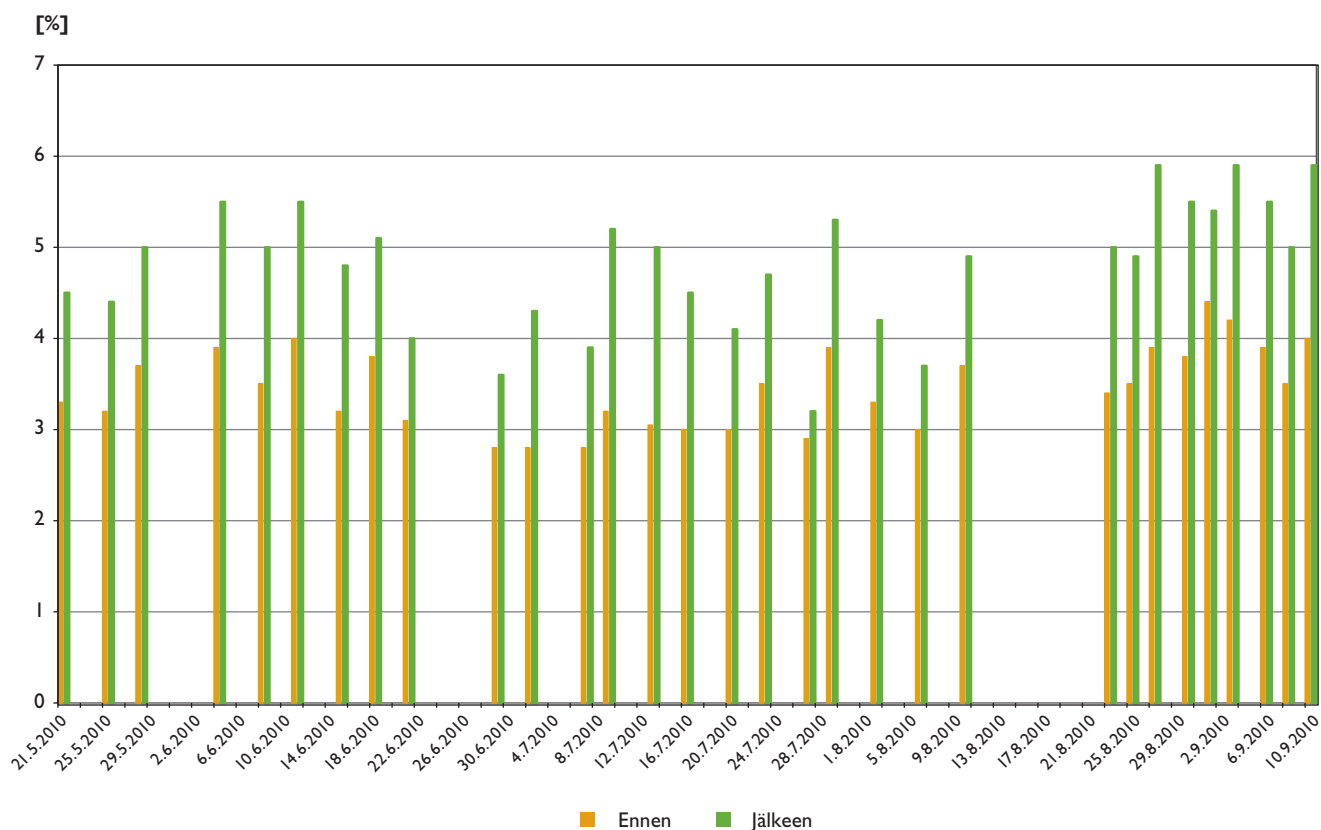
	TS [%]	alk. [mmol/l]	VFA [mmol/l]	pH
ennen	5,2	13,49	3,62	6,83
jälkeen	8,3	34,82	15,98	6,52
ennen	4,1	12,88	4,5	6,93
jälkeen	6,6	32,88	15,34	6,60



Kuva 14. Toisen kuormituskoejaksosyöttöjärjestelyt.

Fermentoituminen sai aikaan orastavan kaasunmuodostuksen, joka aiheutti floataatioilmiön syöttösäiliössä. Näin syöttölietteestä erottui lietevettä ja liete saatiin sakeutettua. Sakeutumista tapahtui jokaisella esifermentointikerralla ja keskimäärin syöttölietteen sakeus nousi 1,4 prosenttiyksikköä (kuva 15).

Toisen kuormituskoejakson aikana tavoitteena oli pyrkiä korkeampiin kuormituksiin sen avulla, että syöttöliete sakeutui esikäsitteilyn aikana, kun erottunutta lietevettä poistettiin. Toisen jakson kuormitusvaiheet on esitetty taulukossa 7 ja siitä huomataan, että sakeutumisesta huolimatta kuormituksissa ei päästy ensimmäistä koejaksoa korkeammille tasoille (taulukko 5). Tämä voisi johtua vuodenaikojen mukaan tapahtuvasta lietteen sakeuden vaihtelusta; yleensä liete on sakeampaa kylminä kuukausina. Toisen kuormitusjakson sijoittuminen kesäkuukausille siis voisi selittää odottamattoman alhaiset sakeudet.



Kuva 15. Lietteen sakeutuminen esifermentaatioissa autofloataatiolla toisen kuormituskoejakson aikana (TS).

Taulukko 7. Toisen kuormituskoejakson vaiheet.

	2. Kuormituskoejakso	Viipymä	Orgaaninen kuorma
	aika	[d]	[kgVS/m ³ d]
1. vaihe	10.6.2010–23.7.2010	19,7	1,61
2. vaihe	24.7.2010–24.8.2010	17,5	1,76
3. vaihe	25.8.2010–17.9.2010	15,0	2,58

7.3.2

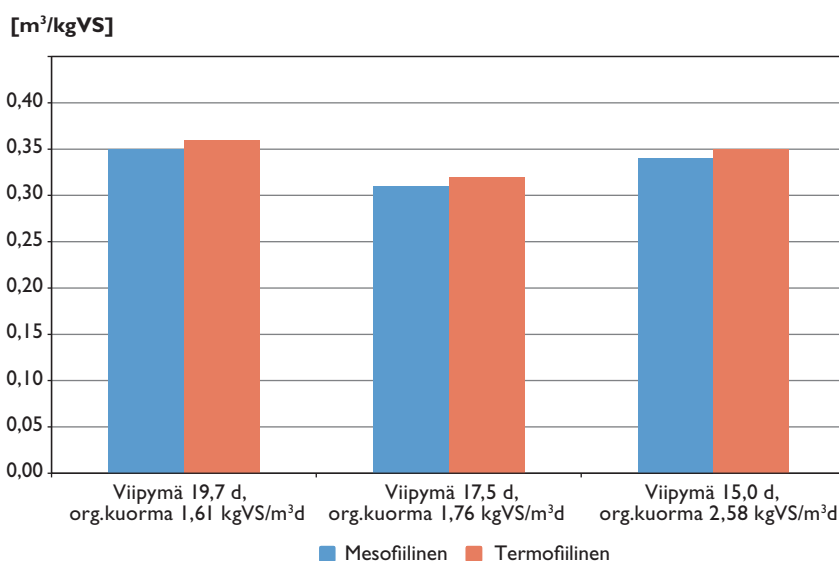
2. kuormitusjakson prosessiolosuhteet

Liitteessä 4 on esitetty kuvaajat reaktoreiden lämpötilasta, pH:sta ja alkaliteetista sekä syötetyn ja mädätetyn lietteen kiintoaineen ja orgaanisen aineen pitoisuudesta. Lämpötila pysyi vakaalla tasolla vaikka "sahaamista" esiintyi kuten ensimmäisenäkin kuormitusjaksona (kuva 40). Mädätetyn lietteen pH oli stabiili koko koejakson aikana (kuva 41). Alkaliteetissa tapahtui vaihteluja molempiin suuntiin, kaiken kaikkiaan se pysyi koko ajan korkealla tasolla (kuva 43). Noudettu liete oli kiintoainepitoisuudeltaan noin 3 - 4,5 %, ja esifermentaatiolla saavutettiin noin 3,5 - 6 % kiintoainepitoisuus (kuva 44). Kiintoaineen orgaaninen osuus pysyi melko tasaisena (noin 70 %) (kuva 45).

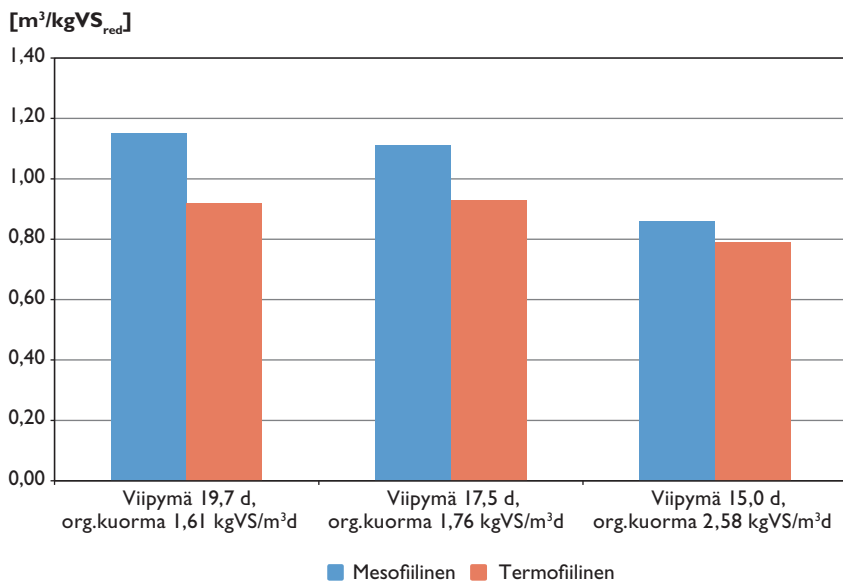
7.3.3

2. kuormitusjakson tulokset ja niiden tarkastelu

Toisen kuormituskoejakson aikana kaasuntuotto hajonnutta orgaanista ainetta kohti oli vastaavalla tasolla kuin kirjallisuudessa, mutta termofiilinen prosessi ei enää tuottanutkaan enempää kaasua kuin mesofiiliprosessi. Kaasuntuotannossa syötettyä orgaanista ainetta kohti ei saatu tuloksissa näkyviin viipymän vaikutusta samalla lailla kuin ensimmäisen kuormituskoejakson aikana. Sen sijaan kaasuntuotanto hajonnutta orgaanista ainetta kohti kääntyi laskuun, kun viipymä reaktorissa oli alle 17,5 d. (Kuva 16 ja 17).



Kuva 16. Kaasuntuotto syötetystä orgaanisesta aineesta ensimmäisen kuormituskoejakson aikana ($m^3/kgVS$).



Kuva 17. Kaasuntuotto hajonneesta orgaanisesta aineesta ensimmäisen kuormituskoejakson aikana ($\text{m}^3/\text{kgVS}_{\text{red}}$).

VS-reduktio oli edelleen termofiilisessa reaktorissa jatkuvasti hieman korkeampi kuin mesofiilisessa. Kuormitusjakson alussa se oli keskimäärin noin 50 % ja sen loppussa vain noin 35 %. Reduktioaste siis tässä tapauksessa laski viipymän lyhentyessä.

Lietteen sakeutumisen lisäksi esifermentaatiossa tapahtui myös lietteen laatu-muutoksia (taulukko 6). Kun lietteen kiintoaineprosentti saatiin nousemaan auto-flotaatiolla, pH laski ja haihtuvien happojen määrä lietevedessä nousi merkittävästi. Fermentoitunut liete sisälsi näin ollen enemmän helposti hajoavia orgaanisia yhdisteitä. Tämä voi olla selitys siihen, miksi termofiilisella mädätyksellä ei saatukaan samanlaista etua kuin ensimmäisen kuormituskoejakson aikana.

Tarkemmat kuvaajat toisen koejakson päivittäisestä kaasuntuotosta on esitetty liitteessä 5. Kaasuntuotossa havaitaan edelleen päiväkohtaisesti suuriakin vaihteluita johtuen syöttölietteen laadun vaihtelusta.

7.4

Erityisselvitysten tulokset

7.4.1

Siloksaanit

Taulukossa 8 on esitetty siloksaanipitoisuudet mitattuna MS-GC-menetelmällä.

Tulosten perusteella termofiilisesta mädätysprosessista biokaasuun vapautuva siloksaanimäärä on noin 50 - 65 % suurempi kuin mesofiilisesta vapautuva. Määrällisesti eniten esiintyi D4-, D5- ja D6-siloksaaneja. Kuormitusjaksojen eroavat siloksaanitulokset eivät välttämättä johdu pelkästään syöttömäärän noususta, vaan pitoisuuksiin vaikuttaa myös syötteen koostumus, joka vaihtelee jätevesilietteissä. Syötteen sisältämiä siloksaaneja ei määritetty. Biokaasun hyötykäyttöä ajatellen suurimmat siloksaanipitoisuudet aiheuttavat lisäkustannuksia lisääntyvän kaasunpuhdistustarpeen vuoksi.

Taulukko 8. Siloksaanipitoisuudet MS-GC-menetelmällä.

		Mesofiilinen		Termofiilinen	
		2.10.2009	9.2.2010	2.10.2009	9.2.2010
		aloitusjakso	5. kuormitusjakso	aloitusjakso	5. kuormitusjakso
Heksametyylidisiloksaani (L2)	µg/m ³	nd	< 50	nd	<50
Heksametyylisyklotrisiloksaani (D3)	µg/m ³	59	1000	210	130
Oktametyylitrisiloksaani (L3)	µg/m ³	97	86	120	130
Oktametyylisyklotetrasiloksaani (D4)	µg/m ³	1900	3100	2600	3100
Dekametyylitetrasiloksaani (L4)	µg/m ³	55	73	99	140
Dekametyylisyklopentasiloksaani (D5)	µg/m ³	50000*	72000*	70000*	120000*
Dodekametyylisykloheksasiloksaani (D6)	µg/m ³	2700**	5300*	8000*	11000*
Ei tunnistettu siloksaani	µg/m ³		55**	375**	50**
Trimetyylisilanoli	µg/m ³		200	260	400
Summa	µg/m³	54800	81800	81700	135000
		*lineaarisen alueen ulkopuolella			
		**laskettu tolueenin vasteen avulla			

7.4.2

Rikkivety ja muut pelkistyneet rikkiyhdisteet (TRS)

Mittaukset indikoivat pelkistyneiden rikkivetyjen nousua ensimmäisen käynnistysjakson aikana. Pelkistyneiden rikkiyhdisteiden mittaukset toisessa käynnistysvaiheessa on esitetty kuvassa 18 kaasukromatografitulosten kanssa.

Kaasukromatografimittauksissa rikkivetypitoisuus ei juuri noussut toisen käynnistysvaiheen aikana (kuva 18), mutta sen sijaan metyylimerkaptania ja dimetyylisulfidia esiintyi. Kyseiset pelkistyneet rikkiyhdisteet ovat kemiallisesti hyvin lähellä rikkivetyä, joten niiden esiintyminen kaasussa aiheutti todennäköisesti nousset rikkivetytulokset jatkuvatoimisessa analysaattorissa. Tämän ristikkäisvaikutuksen vuoksi raportin tässä kappaleessa käytetään termiä ”pelkistyneet rikkiyhdisteet” jatkuvatoimisen analysaattorin rikkivetymittaustuloksista.

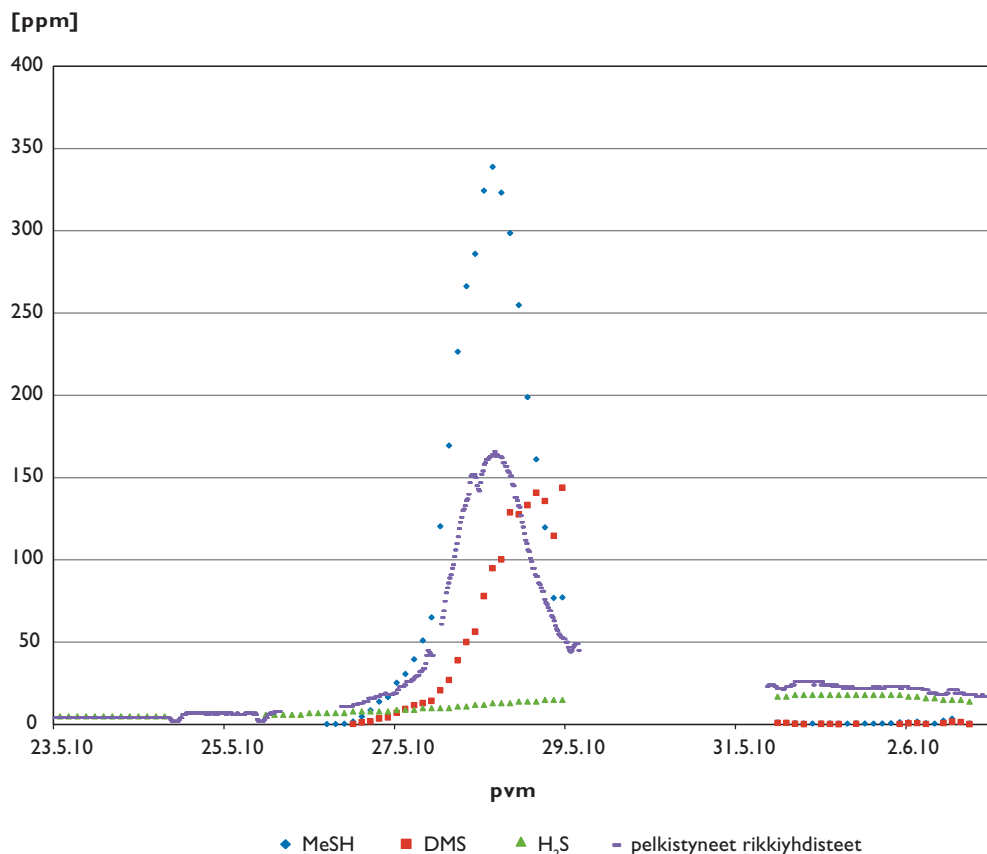
Kaasukromatografimittauksen tulokset kuvassa 18 osoittavat, että metyylimerkaptania (MeSH) ja dimetyylisulfidia (DMS) esiintyi samaan aikaan kun jatkuvatoimisen analysaattorin pelkistyneiden rikkivetyjen pitoisuus oli koholla.

Pelkistyneiden rikkiyhdisteiden havaittiin lähtevän nousuun vajaa kaksi päivää lämpötilannoston jälkeen. Ensimmäisessä käynnistysjaksossa pelkistyneiden rikkivetyjen maksimipitoisuus saavutettiin 4 päivää lämpötilannoston jälkeen ja toisessa se saavutettiin 3 päivää lämpötilannoston jälkeen. Kaasukromatografimittausten perusteella rikkivetypitoisuus nousi vähitellen uudelle hieman kohonneelle tasolle, jääden kuitenkin alle 20 ppm:n pitoisuuteen. Myös jatkuvatoimisen analysaattorin näyttämä pelkistyneiden rikkivetyjen pitoisuus laski vähitellen tasoittuen alle 20 ppm:n pitoisuuteen. Koska käynnistysjakson alussa ja lopussa muita pelkistyneitä rikkiyhdisteitä ei esiintynyt, ja molemmat rikkivetymittaukset tasoittuivat osoittamaan alle 20 ppm:n pitoisuuksia, voidaan jatkossa olettaa jatkuvatoimisen analysaattorin mittaaman rikkivetypitoisuuden edustavan todellista rikkivetypitoisuutta.

Pelkistyneiden rikkiyhdisteiden mittausten tulokset ensimmäiselle koejaksolle on esitetty taulukossa 9.

Tulosten mukaan mesofiilisen prosessin kuormitustasot eivät vaikuttaneet pelkistyneiden rikkiyhdisteiden pitoisuuksiin. Myös termofiilisen prosessin pitoisuudet pysyivät samalla tasolla aloitusjakson ja viidennen kuormitusjakson aikana. Vasta ylimääräisessä ylikuormitusvaiheessa pitoisuudet nousivat.

Pelkistyneiden rikkiyhdisteiden pitoisuudet termofiiliprosessissa toisen koejakson aikana olivat kaiken kaikkia pieniä. Rikkivetypitoisuudet olivat koko mittaustuloksen ajan alle määritysrajan (5 ppm), metyylimerkaptaanin keskiarvolla 4 ppm ja dime-



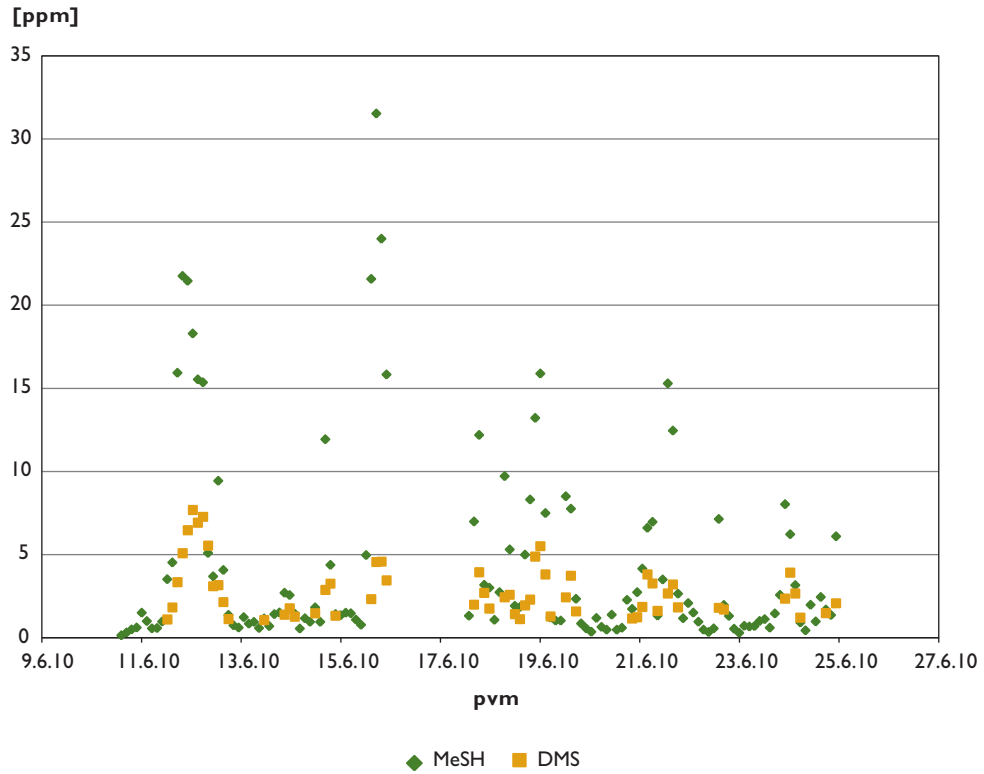
Kuva 18. Jatkuvatoimisen analyysoittorin pelkistyneiden rikkivetyjen pitoisuus sekä kaasukromatografimittauksen rikkivety-, metyylimerkaptani- ja dimetyylisulfidipitoisuudet toisen käynnistysjakson ajalta. (Puuttuvat arvot johtuvat teknisistä ongelmista mittalaitteiden sähkösaannissa).

Taulukko 9. Pelkistyneiden rikkivetyjen pitoisuudet kaasupussinäytteistä I. koejaksoilla.

Kuormitusjakso		Mesofiilinen			Termofiilinen		
		2.10.2009	9.2.2010	3.3.2010	2.10.2009	9.2.2010	3.3.2010
		aloitusjakso	5. kuormitusjakso	ylikuormitus	aloitusjakso	5. kuormitusjakso	ylikuormitus
Rikkivety, H ₂ S	ppm	7	< 5	< 5	7	5	25
Metyylimerkaptani, MeSH	ppm	ei havaittu	ei havaittu	0,2	0,43	1	40
Dimetyylisulfidi, DMS	ppm	0,2	ei havaittu	0,3	1,7	0,3	59
Summa	ppm	7,2	< 5	< 5,5	8,1	6,3	124

tyylisulfidin 3 ppm. MeSH- ja DMS- pitoisuustuloksien ajalliset vaihtelut on esitetty kuvassa 19. Keskiarvillisesti kuormitusjakson aikana esiintyi metyylimerkaptania 4 ppm ja dimetyylisulfidia 3 ppm.

Pelkistyneiden rikkivetyjen pitoisuudet vaihtelivat kuormitusjakson alkupuolella enemmän kuin loppupuolella. Pitoisuuksien vaihtelut esiintyivät 3 - 4 päivän "aalloissa". Kuvassa näkyvät huiput osuvat yhteen niiden päivien kanssa jolloin syöttösäiliö on vaihtunut ja prosessiin on alettu syöttää uutta esifermentoitua lietettä. Tämä olisi todennäköinen selitys "aaltoilulle".



Kuva 19. Metyylimerkaptani- ja dimetyylisulfidipitoisuudet 2. koejakson I. kuormitusvaiheessa.

7.4.3

Vetymittaus

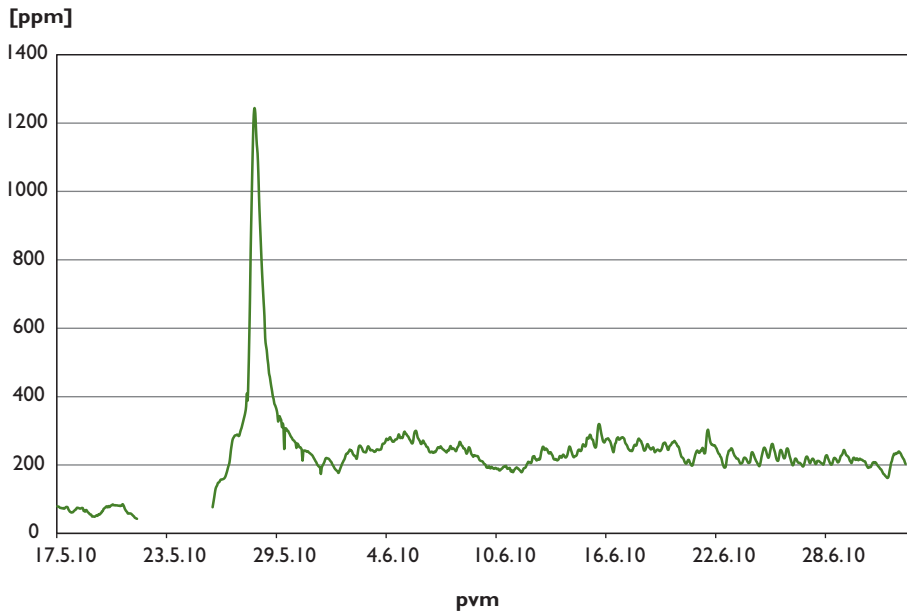
Vetypitoisuustulokset kuormitusjaksoittain on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Vetypitoisuustulokset I. koejakson eri kuormitusjaksoilla (tyhjä solu = ei mitattu).

	Mesofiilinen	Termofiilinen
	ppm	ppm
Ensimmäinen koejakso		
aloitusjakso	88	250
1. kuormitus		109
2. kuormitus		
3. kuormitus		
4. kuormitus	37	173
5. kuormitus		161
Toinen koejakso		
1. kuormitus		229
2. kuormitus		218
3. kuormitus		213

Tulosten mukaan termofiilinen prosessi tuottaa 3 - 4 kertaa enemmän vetyä kuin mesofiilinen prosessi.

Mitatut vetypitoisuudet toisen käynnistysjakson aikana on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Vetypitoisuus toisen käynnistysjakson ajalta.

Vetypitoisuus mesofiilisessa olosuhteessa oli 60 ppm:n tasolla. Lämpötilan noston jälkeen vetypitoisuus lähti nousemaan saavuttaen maksimipitoisuuden 1250 ppm kolmen päivää päästä, jonka jälkeen vetypitoisuus laski kahdessa päivässä tasoittuen noin 220 ppm:n tasolle.

7.4.4

Lietteiden hajuselvitykset

Hajuselvitysten tulokset on esitetty taulukossa 11.

Taulukko II. Poistolietteen haju- ja kaasupitoisuus määritysten tulokset.

			Mesofiilinen		Termofiilinen	
		näyte pvm.	14.10.2009	8.9.2010	14.10.2009	8.9.2010
	menetelmä		aloitusjakso	3. kuormitusjakso	aloitusjakso	3. kuormitusjakso
Hajupitoisuus	olfaktometri	h.y./m ^{3*}	620	980	2300	20000
Dimetyylisulfidi (DMS)	Photovac GC	ppm	<0,2	ei havaittu	I	ei havaittu
Metyylimerkaptaani (MeSH)	Photovac GC	ppm	ei havaittu	<0,01	ei havaittu	0,01
Tolueeni	ATD-GC-MS	µg/m ³	ei analysoitu	333	ei analysoitu	45
Rikkihiili	ATD-GC-MS	µg/m ³	ei analysoitu	11	ei analysoitu	ei havaittu
Fenoli	ATD-GC-MS	µg/m ³	ei analysoitu	332	ei analysoitu	389
Limoneeni	ATD-GC-MS	µg/m ³	ei analysoitu	122	ei analysoitu	22

* h.y./m³ = hajuyksikköä/m³ = ou_e/m³

Tuloksien mukaan ensimmäisen koejakson aloitusvaiheessa termofiiliprosessin lietteen hajupitoisuus oli noin neljä kertaa suurempi kuin mesofiilisen prosessin liete. Vastaavasti toisen koejakson suurimmalla kuormitustasolla otettujen näytteiden hajupitoisuus oli noin 20-kertainen mesofiilisen prosessin lietteeseen verrattuna. Ensimmäisellä koejaksolla otetusta näytteestä havaittiin dimetyylisulfidiä (DMS), joka voisi selittää termofiilisen lietteen suuremman hajupitoisuuden.

Toisella koejaksolla otetuista näytteissä ei havaittu DMS:ää, mutta havaittiin pieniä määriä metyyliimerkaptaania (MeSH). Havaittu pitoisuus oli kuitenkin matala. Vahvemman hajun aiheuttivat todennäköisesti matalan hajukynnyksen omaavat orgaanisten yhdisteet. Tällaisten yhdisteiden vaikutus hajuun voi olla merkittävä vaikka mitattu pitoisuus on pieni.

Koelaitoksen käyttökäytökunnan subjektiivisen mielipiteen mukaan termofiilinen prosessi haisi selvästi erilaiselta, muttei välttämättä pahemmalta. Sen sijaan termofiilisen prosessin käynnistysvaiheessa haju oli niin paha, että lietteen TS-määrityksessä käytetty kuivausuuni jouduttiin siirtämään laboratorion prosessitiloihin.

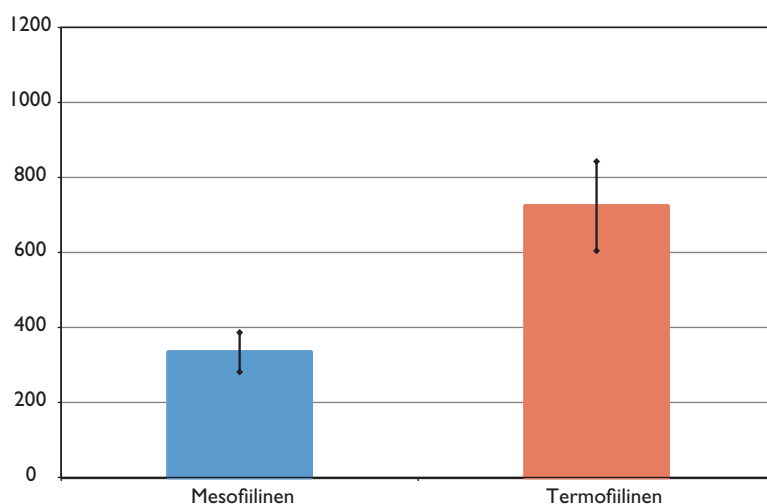
7.4.5

Lietteen kuivattavuus ja rejektit

Lietteen kuivattavuuden tutkimusmenetelmän toistettavuudessa oli hajontaa, mutta tulokset mesofiilisen ja termofiilisen lietteen osalta erosivat niin paljon toisistaan, että tämä hajonta ei haitannut tulosten tulkintaa. Nämä tulokset on esitetty kuvassa 21.

CST-mittaukset tulosten arvot olivat vähintään kaksinkertaiset termofiilisesti mädätetylle lietteelle. Pienet CST-arvot tarkoittavat, että lietteet vapauttavat nesteen helpommin, joten ne ovat helposti kuivautuvia. Vastaavasti vaikeasti kuivautuvilla lietteillä CST-arvot ovat korkeita. Huolimatta CST-mittausten toistettavuusongelmista, on esitetty, että sen tulokset edustavat parhaiten nykyisin yleisimmin käytettyä linkokuivausmenetelmää. (Pan ym. 2003)

Rejektivesianalyysien mukaan oli termofiilisen lietteen rejekteissä johdonmukaisesti 30 % suurempi ammoniumtyppipitoisuus kuin mesofiilisen lietteen rejekteissä (1 300 mg/l vs. 1 000 mg/l). COD_{Cr}-arvo oli puolestaan termofiilisen lietteen rejektivedessä 3,4-kertainen verrattuna mesofiilisen lietteen rejektin COD_{Cr}-arvoon (5 660 mg/l vs. 1 670 mg/l). Lietteen viipymällä reaktorissa ei ollut vaikutusta. Silmämääräisesti termofiilisen lietteen sentrifugoinnin supernatantti oli lähes läpinäkymättömän mustaa verrattuna mesofiilisen lietteen sentrifugoinnin supernatantin kirkkaaseen ruskeaan väriin.



Kuva 21. CST-mittaukset mesofiilisesti ja termofiilisesti mädätetystä lietteestä, keskiarvot ja -hajonnat.

7.4.6

Lietteen hygienisoituminen

Lietteen hygieenisten ominaisuuksien selvitysten tulokset on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Lietteen hygienisoituminen mädätyksessä.

	Syöttö- liete	Mesofiilinen	Termofiilinen	Vaatus lannoitevalmiste- asetuksen mukaan (Maa- ja metsätalousministeriö 2007)
viive 14,7 d				
<i>E.coli</i> [pmy/g]	510 000	6 400	5	enintään 1000
Salmonella	todettu	todettu	ei todettu	ei todettavissa
viive 13,1 d				
<i>E.coli</i> [pmy/g]	270 000	3 500	36	enintään 1000
Salmonella	todettu	todettu	todettu	ei todettavissa

Tulosten mukaan termofiilinen prosessi ja 15 päivän viipymä osoittautui lietteen hygienisoitumisen kannalta riittäväksi, mutta aineisto on hyvin rajallinen.

7.4.7

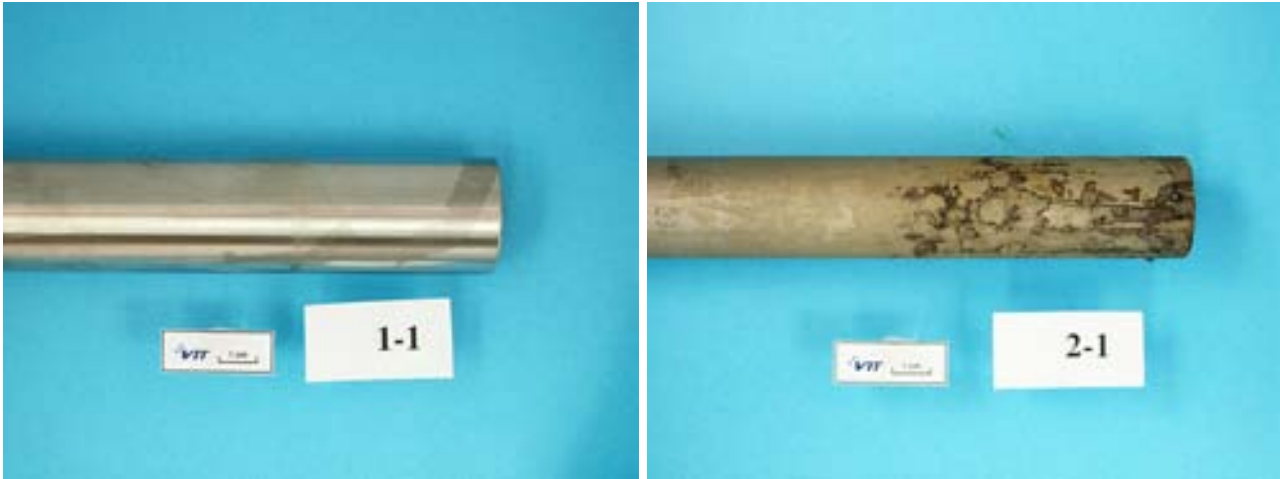
Yhteenveto korroosiohavainnoista 12 kk:n koeajan jälkeen

Haponkestävästä ruostumattomasta teräksestä tehdyissä koetangoissa ei havaittu teknisesti merkittävää syöpymistä kummassakaan ympäristössä. Pientä alkavaa pistesyöpymistä todettiin reaktorin 2 ympäristössä olleessa näytteessä, mutta tämän koeajan puitteissa ei voida puhua merkittävästä syöpmisestä. Lämpötila termofiilissä reaktorissa on korkeampi ja mikäli myös ruostumattomille teräksille paikallisen korroosion kannalta merkityksellisen kloridin määrä on suurempi ja erityisesti kloridin ja sulfaatin suhde on epäedullisempi kuin mesofiilireaktorissa, voi tämä selittää sen, että korroosion määrä oli hieman suurempi termofiili- kuin mesofiilireaktorissa. Klorideja ja sulfaatteja ei määritetty reaktoreista.

Hiiliteräksestä valmistetut koetangot syöpyivät molemmissa reaktoriympäristöissä, mutta tässä tapauksessa korkeampi lämpötila reaktorissa 2 ei aikaansaanut voimakkaampaa korroosiota hiiliteräksessä verrattuna reaktorissa 1 olleeseen näytteeseen. Hiiliteräksen korroosion kannalta voi olla olennaisempaa esimerkiksi se, että mikrobiologinen toiminta metallin pinnalla saattaa olla aktiivisempaa matalammassa lämpötilassa. Myös pH ja alkaliteetti olivat vähän alhaisemmat reaktorin 1 olosuhteissa kuin reaktorin 2 olosuhteissa.

Betoninäytteen epoksinnoitteeseen muodostui koeaikana mesofiilireaktorissa rakkuloita, joita oli erityisesti nesteen rajapinnan alapuolisella alueella. Rajapinnan alapuolisella alueella osa rakkuloista oli irronnut, ja betonipinta paljastunut, joskaan ei silminnähdessä syöpynyt. Tarkastuksen perusteella ei voida ottaa kantaa siihen, mistä syystä betoninäytteiden epoksinnoite oli vaurioitunut. Vaikuttaa luultavalta, että se on ollut seurausta epoksin riittämättömästä kestävydestä vallinneissa olosuhteissa. Vaurioiden esiintymistapa, yksittäiset rakkulat pinnoitteessa, voisi kuitenkin viitata myös siihen, että pinnoitteessa on jo alun perin ollut pieniä reikiä tai halkeamia, joiden kautta on kulkeutunut kosteutta betonin ja epoksin rajapintaan. Tankobetoni ei tarkastuksen mukaan ollut rapautunut pinnoitteesta paljastuneilla alueilla. Voidaan kuitenkin pitää todennäköisenä, että pitempiaikainen altistus reaktoriolosuhteissa syövyttää suojaamattoman betonin. Termofiilireaktorin osalta tulosten tulkintaa vaikeuttaa näytetangon katkeaminen kahdesti koeaikana, minkä vuoksi altistus aika jäi lyhyemmäksi kuin mesofiilireaktorissa (6 kk).

Korroosioselvityksen tuloksia on tarkemmin selostettu liitteessä 6.



Kuva 22. A) Näytekappale 1-1 (haponkestävä ruostumaton teräs) ja B) näytekappale 2-1 (hiiliteräs) peittauksen jälkeen, koeaika 12 kk mesofilireaktorissa.



Kuva 23. A) Näytekappale 1-2 (haponkestävä ruostumaton teräs) ja B) 2-2 (hiiliteräs) peittauksen jälkeen, koeaika 12 kk termofilireaktorissa.

8 Koeajojen tulosten tarkastelu

8.1

Käynnistysvaiheiden tulosten tarkastelu

Tämän tutkimuksen perusteella mesofiilinen mädätysprosessi voidaan onnistuneesti muuttaa termofiiliseksi lyhyessä ajassa ilman, että syöttöpumppausta vähennetään. Nopea lämpötilannosto osoittautui hyväksi valinnaksi ja sillä oletetusti vältettiin termotoleranttisen mesofiilisen bakteerikannan muodostuminen. Termofiilisen prosessin stabiloitumiseen meni kolme viikkoa: yksi viikko huononemista, yksi viikko paranemista ja yksi viikko stabiloitumista.

Termofiilisen bakteerikannan muodostuminen ja toimiminen kooreaktorissa osoittautui myötäilevän sitä linjaa, jota aiemmissa tutkimuksissa on raportoitu. Haihtuvien rasvahappojen pitoisuus nousee lämpötilan noston jälkeen, mutta ei aiheuta reaktorin liiallista happamoitumista vaan prosessi saavuttaa tasapainon asidogeenisten ja metanogeenisten bakteerien välillä. Tilanteessa, jolloin VFA/TA- suhde nousi huolestuttavan korkealle (yli 0,25), harkittiin lietteen syötön vähentämistä. Reaktorin happamoitumiselta kuitenkin vältyttiin vaikka kuormitusta ei siirtymävaiheessa muutettu. VFA-pitoisuus sekä VFA/TA-suhde ovat tärkeitä parametreja, joita seuraamalla tiedetään bakteerien välisestä tasapainosta ja voidaan reagoida mahdollisen reaktorin happamoitumisen ehkäisemiseksi. VFA/TA- suhteen kohotessa pitää alkaliteettititraus pystyä suorittamaan mahdollisimman usein.

Seurantaan ja näyteanalyysien tekemiseen riittivät reaktorien lämpömittarit, kaasun pitoisuus- ja määrämittarit sekä titrausvälineistö. Haihtuvien rasvahappojen tarkempi seuranta esim. automaattisesti näytteitä ottavalla puolijatkuvalla kaasukromatografilla on epäilemättä tulevaisuutta mädättämöiden ohjauksessa.

8.2

Koejaksojen kuormitusvaiheiden tulosten tarkastelu

Kuormitusvaiheet etenivät hyvin stabiilisti ja muutokset prosessiin tehtiin ainoastaan muuttamalla syöttöpumppausten kestoja. Syöttöpumppauksen rytmi pysyi samana ja pumppujen tuotto määritettiin useasti kuormituskokeen aikana. Näytteenotossa noudatettiin ohjelmaa, johon tehtiin tarvittaessa muutoksia resurssien ja tutkimusaseman muun toiminnan puitteissa.

Suurimmat ongelmat muodostuivat jatkuvatoimisten mittauksien ylläpidosta. Jo ensimmäisen kuormituskokeen aikana kaasun laatumittaus osoittautui epävarmaksi. Sinänsä mittaus oli tarkka ja luotettava, mutta ohjausohjelman virheiden vuoksi mittaus meni luvattoman usein pois päältä. Korjausta asiaan haettiin molempien kuormituskokeiden keston ajan. Toisen kuormituskokeen aikana myös kaasun määrämittaus alkoi juuttua paikoilleen syystä, jota ei täysin aukottomasti kyetty selvittämään. Riittävien huoltojen avulla kokeet saatiin kuitenkin ajettua loppuun asti.

Syöttölietteen pumppauksessa oli tukoksia muutamaan otteeseen koejaksojen aikana, mutta ei siinä määrin, että se olisi muodostunut ongelmaksi.

Toisen koejakson aikana reaktoreiden kuormitusta oli tarkoitus lisätä verrattuna ensimmäiseen koejaksoon kohottamalla syöttölietteen sakeutta. Vaikka syöttöliettä saatiin sakeutettua esikäsitteilyllä, jäivät kuormitustasot kuitenkin toisella koejaksolla samalle tasolle kuin ensimmäisessä ja jopa hieman alemmaksi. Siten koejaksojen välinen ero on esikäsitteily eikä kuormitus.

Vaikka esifermentaatiolla ei lietteen sakeutta kyettykään nostamaan merkittävästi, on se silti mielenkiintoinen jatkotutkimuskohde, koska se voidaan toteuttaa ilman käyttökustannuksia. Esifermentaatio parantaa kaasun tuottoa ja siinä erotettu lietevesi sisältää helposti hajoaavia orgaanisia yhdisteitä esim. käytettäväksi typenpoiston hiilenlähteenä, mutta sen ammoniumtyppipitoisuus on vain enintään 1,5-kertainen tulevaan jäteveteen verrattuna.

8.3

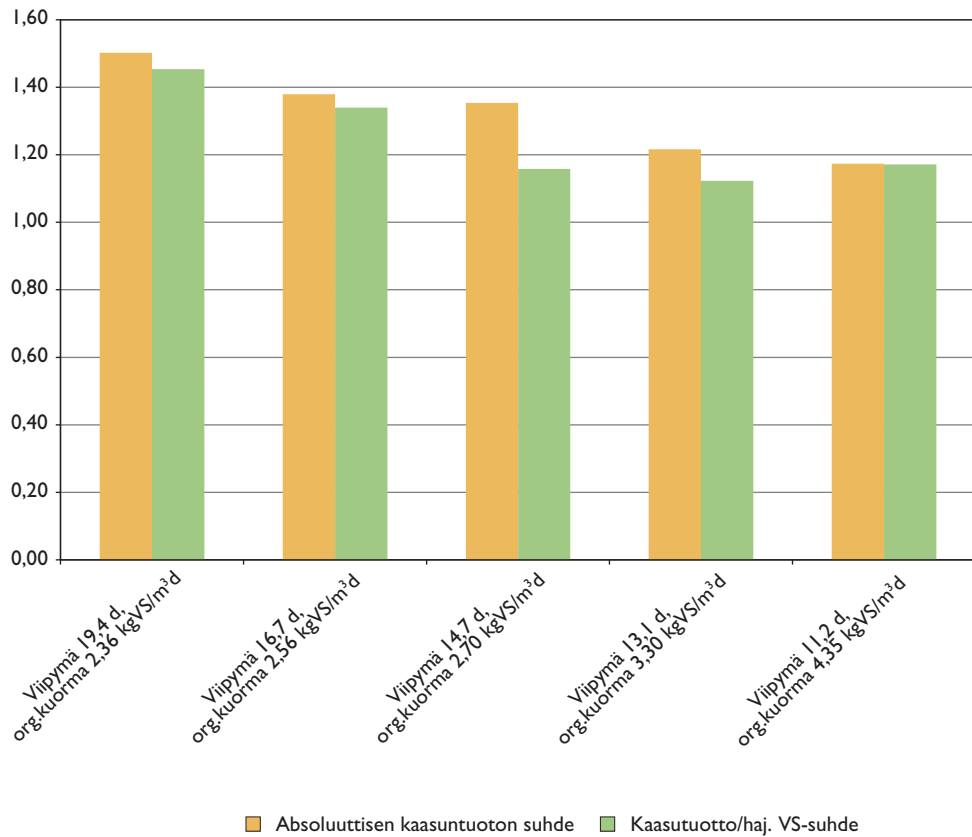
Mesofiilisen ja termofiilisen prosessin vertailu

Kuvassa 24 on vielä tarkasteltu kaasuntuoton suhdetta termofiilisen ja mesofiilisen mädätyksen välillä ensimmäisellä kuormitusjaksolla. Tuottosuhte on laskettu sekä absoluuttisesta kaasuntuotosta että kaasuntuotosta hajonnutta orgaanista ainetta kohti.

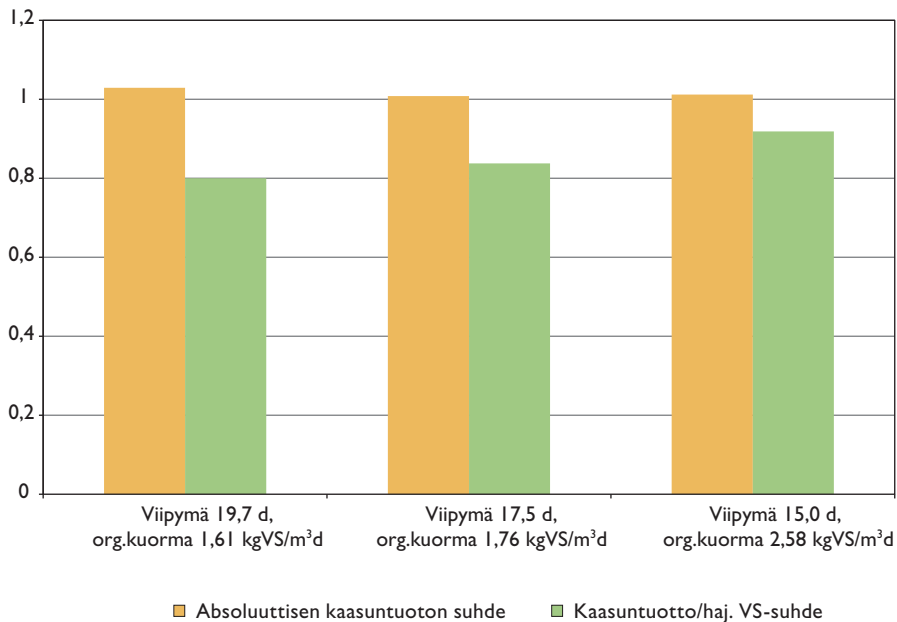
Ensimmäisen koejakson perusteella termofiilinen prosessi tuotti keskimäärin 1,3-kertaisesti enemmän kaasua kuin mesofiilinen prosessi. Siten termofiilinen prosessi hajotti myös orgaanista ainetta mesofiilistä tehokkaammin (enimmillään 14 % suurempi reduktio). Yleisesti ottaen optimaaliseksi viipymäksi prosessissa saatiin lämpötila-alueesta riippumatta noin 15 päivää. Ero prosessien välillä pieneni viipymän lyhentyessä, mikä havaitaan kuvasta 24.

Kuvassa 25 on esitetty vastaavat suhdeluvut toisen kuormituskoejakson aikana ja siitä huomataan, että termofiilisen ja mesofiilisen prosessin välillä ei ollut enää eroa koskien absoluuttista kaasuntuottoa. Sen sijaan kaasuntuotto suhteessa hajonneeseen orgaanisen aineen määrään oli tällä koejaksolla termofiilisessa prosessissa huonompaa (80 - 90 % mesofiilisesta). Toisella kuormituskoejaksolla orgaanisen aineen reduktiossa noin 15 % ero termofiilisen eduksi säilyi mutta se ei näkynyt kaasuntuoton lisääntymisenä, mikä oli ristiriidassa kaasuntuottotulosten kanssa ja saattoi johtua kaasumittausten ja lietenäytteenoton häiriöistä ja epätarkkuuksista. Toisella koejaksolla toinen kaasun virtausmittari juuttui useaan kertaan eikä ongelmaa pystytty selvittämään tai ratkaisemaan aukottomasti. Tämä antoi aiheita epäillä, että kaasun virtausmittauksissa oli epävarmuutta, kun niitä käytettiin pitkä aika yhtäjaksoisesti. Lisäksi lietenäytteenottoa suoritti useampi henkilö toisen koejakson aikana jolloin niissä saattaa esiintyä tavallista enemmän vaihtelua.

Kaasun yksikkötuotot olivat molemmissa prosesseissa toisella koejaksolla merkittävästi paremmat (termofiilinen prosessi $0,92 \text{ m}^3/\text{kgVS}_{\text{red}}$; mesofiilinen prosessi $1,15 \text{ m}^3/\text{kgVS}_{\text{red}}$) kuin ensimmäisellä (termofiilinen prosessi $0,33 \text{ m}^3/\text{kgVS}_{\text{red}}$; mesofiilinen prosessi $0,24 \text{ m}^3/\text{kgVS}_{\text{red}}$) ja ne vastaavat kirjallisuuden laitosmittakaavan tuloksia. Ainoana erona kuormituskoejaksojen välillä oli lietteen hydrolyysiesikäsitteily, joka osoittautui mielenkiintoiseksi fermentaation, flotaatiosakeutuksen ja hiilipitoisen lieteveden tuottamisen yhdistelmäksi. Esikäsitteily paransi kaasun yksikkötuottoa, mutta enää ei termofiiliprosessi ollut mesofiiliprosessia tuottoisampi. Aikaisemmissa tutkimuksissa ja selvityksissä (EnerNet; Climent ym. 2007; Ferrer ym. 2008; Hanjie 2010) on käynyt ilmi, että esikäsitteilyllä ei kyetä lisäämään termofiilisen prosessin kaasuntuottoa yhtä paljon kuin mesofiilisen prosessin kaasuntuottoa. TERMOS-projektin tutkimustulosten mukaan suoralla vertailulla osoitettiin, että hydrolyysiesikä-



Kuva 24. Kaasuntuottosuhte termofiilisen ja mesofiilisen mädätyksen välillä ensimmäisen kuormituskoejakson aikana (suhdeluku termofiilinen / mesofiilinen).



Kuva 25. Kaasuntuottosuhte termofiilisen ja mesofiilisen mädätyksen välillä toisen kuormituskoejakson aikana (suhdeluku termofiilinen / mesofiilinen).

sittely söi kokonaan termofiilisen prosessin kaasuntuottoedun. Tämän mukaan mesofiilisen mädätyksen kaasuntuoton parantamiseksi kannattaa siirtyä termofiiliseen prosessiin tai alkaa käyttää lietteen esihydrolyysiä – mutta ei molempia.

Termofiilisella prosessilla kyettiin hygienisoimaan liete, kun viipymä oli vähintään 15 d. Termofiilisesti käsitellyn lietteen kuivattavuus osoittautui käytetyn testin perusteella mesofiilista huonommaksi ja myös rejektin laatu oli merkittävästi huonompaa.

Erityisselvitystulosten mukaan termofiilisen prosessin muutostilassa pelkistyneiden rikkiyhdisteiden pitoisuudet biokaasussa kasvavat, ja spesifisemmällä jatkuvatoimisella mittauksella sitä voitaisiin käyttää metaanin ja hiilidioksidin ohella prosessin ajoparametrina.

Vedyn tuotto on termofiilisessä prosessissa noin nelinkertainen mesofiiliseen verrattaessa. Kuten pelkistyneiden rikkiyhdisteiden kohdalta, pitoisuus nousi prosessin muutostilassa.

Lietteen hajupitoisuusmäärityksien mukaan termofiilinen liete haisee moninkertaisesti mesofiilista enemmän, kuitenkin selvää syytä tähän ei tarkasteluissa löydetty. Hajua aiheuttivat todennäköisesti pienissä pitoisuuksissa esiintyvät orgaaniset yhdisteet, joiden hajukynnys on hyvin matala.

Haponkestävässä ruostumattomassa teräksessä ei 12 kk koeaikana havaittu merkittävää syöpymistä kummassakaan reaktoriympäristössä, joskin pientä alkavaa pistesyöpymää havaittiin termofiilireaktorissa olleessa näytteessä. Sakkaa muodostui lähinnä nestepinnan alapuolisille alueille. Hiiliteräs syöpyi molemmissa reaktoreissa erityisesti näytetankojen alaosissa, jotka olivat nesteen rajapinnan alapuolella. Samoilta alueilta myös sakan kertyminen oli voimakasta. Betoninäytteen epoksipinnoite vaurioitui mesofiilireaktorissa koeaikana, ja kauttaaltaan tangon pinnalle epoksiin muodostui rakkuloita. Nesteen rajapinnan yläpuolisella alueella rakkuloita oli kuitenkin vähemmän kuin alapuolella, jossa myös likaantuminen oli voimakkaampaa. Sen sijaan varsinaisessa näytebetonissa ei silmämääräisessä tarkastuksessa havaittu korroosiota.

9 Määdätyksen tehostaminen kaksivaiheisella prosessilla ja biovedyn tuotantopotentiaali

Tutkimus suoritettiin Danmarks Tekniske Universitetin ympäristötekniikan osastolla. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää mahdollisuudet tuottaa vetyä yhdyskuntalietteestä määdätyksellä, vertailla yksiosaisen termofiilisen (55 °C) ja kaksiosaisen hypertermofiilisen-termofiilisen (70 °C ja 55 °C) määdätysprosessin metaanintuottoa yhdyskuntalietteestä sekä tutkia happo-höyry- ja pelkän höyryesikäsitteilyn vaikutuksia vedyn- ja metaanin tuotantoon yhdyskuntalietteestä. Koejärjestelyt jakautuivat panoskokeisiin ja reaktorikokeisiin yksi- ja kaksiosaisella järjestelmällä.

Panoskokeiden tavoitteena oli hypertermofiilisen (70 °C) vetyä tuottavan mikrobikannan esikasvattaminen, mikrobikannan sopeuttaminen yhdyskuntalietteeseen ja yhdyskuntalietteeseen sopeutuneen kannan koon kasvattaminen reaktorikokeita varten. Lisäksi panoskokeita käytettiin selvittämään happo-höyry- ja pelkän höyryesikäsitteilyn vaikutuksia vedyn- ja metaanin tuotantoon. Mikrobikanta kokeisiin, joissa oli tarkoitus tuottaa vetyä lietteestä, saatiin laboratorion aikaisemmasta, biovedyn tuottamista kotitalousjätteistä käsittelevästä tutkimuksesta (Karakashev D. ym. 2009).

Reaktorikokeilla oli tarkoitus selvittää pystytäänkö vetyä tuottamaan merkittäviä määriä jatkuvatoimisen kaksiosaisen määdätysprosessin ensimmäisessä reaktorissa sekä vertailla yksiosaisen ja kaksiosaisen järjestelmän metaanintuottoa suhteutettuna syötettyyn substraattiin.

Reaktorikokeet suoritettiin kolmella jatkuvatoimisella sekoitusreaktorilla, jotka jaettiin kahteen koejärjestelyyn: yksiosaiseen termofiiliseen (55 °C) kontrollireaktoriin ja kaksiosaiseen hypertermofiiliseen-termofiiliseen (70 °C ja 55 °C) koejärjestelmään. Kaikkien reaktorien tilavuus oli 3,5 litraa ja niiden lämmittäminen hoidettiin vesikierron avulla. Yksiosainen reaktori käytti yhdyskuntaliettä suoraan substraattina. Mikrobikanta oli saatu termofiilisesta määdätyslaitokselta. Kaksiosaisen järjestelmän ensimmäinen reaktori käytti yhdyskuntaliettä substraattina ja sai mikrobikantansa panoskokeissa kasvatetusta kannasta. Kaksiosaisen järjestelmän toinen reaktori käytti substraattina ensimmäisen reaktorin poistumaa ja sai mikrobikantansa termofiilisestä määdätyslaitoksesta. Kontrollireaktorin hydraulinen viipymä (hydraulic retention time, HRT) oli 15 päivää, kaksiosaisen järjestelmän ensimmäisen reaktorin 3 päivää ja kaksiosaisen järjestelmän toisen reaktorin 12 päivää. Yhteensä kummankin järjestelmän hydraulinen viipymä oli 15 päivää vertailukelpoisten tulosten aikaansaamiseksi.

Paras tulos vedyn tuottoon esikäsittelemättömästä yhdyskuntalietteestä oli 6,1 millilitraa vetykaasua lisättyä haihtuvaa kiintoainegrammaa kohden. Paras tulos vedyn tuottoon yhdyskuntalietteestä saatiin höyryesikäsitteilyistä näytteistä ilman happokäsittelyä: 15 millilitraa vetykaasua lisättyä haihtuvaa kiintoainegrammaa kohden. Kummatkin tulokset saavutettiin panoskokeilla. Reaktorikokeissa vedyn tuotanto jäi mitättömäksi (maksimi 0,4 ml H₂ tuotettu/g lisättyä haihtuvaa kiintoainetta). Vedyntuotanto yhdyskuntalietteestä jäi yleisesti alhaiseksi todistaen yhdyskuntalietteen yksinään käytettynä huonoksi substraatiksi biologiseen vedyntuotantoon. Syitä ovat todennäköisesti yhdyskuntalietteen pieni hiilihydraattipitoisuus, sillä hiilihydraatit ovat paras substraatti biologiselle vedyn tuotolle, koostumuksen jaksottainen

vaihtelu, sillä vetyä tuottavat mikrobit ovat herkkiä ympäristön muutoksille, sekä yhdyskuntalietteen sisältämät toksiinit.

Yksiosainen järjestelmä tuotti keskimäärin 340 millilitraa metaania yhtä grammaa lisättyä haihtuvaa kiintoainetta kohden ja kaksiosainen järjestelmä 490 millilitraa metaania lisättyä haihtuvaa kiintoainegrammaa kohden. Kaksiosainen järjestelmä tuotti metaania 44 prosenttia enemmän yksiosaiseen verrattuna. Tulos todistaa hypertermofiilisen esimädätyksen parantavan huomattavasti metaaniin tuotantoa jälkimmäisessä termofiilisessä metaania tuottavassa vaiheessa.

Energiataselaskelmat Suomenojan jätevedenpuhdistamolta saatujen tietojen perusteella osoittavat kaksiosaisen järjestelmän tuottavan 2,3 kertaa enemmän ylimääräenergiaa verrattuna yksiosaiseen todellisen mittakaavan laitoksessa. Sähköksi muutettuna 35 prosentin hyötysuhteella ja Suomen vuoden 2009 keskimääräisen sähkönhinnan (Energiateollisuus ry 2010) perusteella kaksiosainen prosessi tuottaisi 48 000 euroa vuodessa enemmän kuin yksiosainen prosessi.

10 Lietteenkäsittelyketjujen energiatehokkuus

TERMOS-hankkeen yhtenä päämääränä oli arvioida ja vertailla termofiiliseen ja mesofiiliseen mädätysprosessiin perustuvien lietteenkäsittelyketjujen energia- ja kasvihuonekaasutaseita ja kustannustehokkuutta. Lisäksi tarkoituksena oli arvioida, voisiko jätevedenkäsittelyprosessissa rinnakkaissaostuksen korvaaminen esisaostuksella parantaa puhdistamon energiatehokkuutta. Mädätykseen perustuvien ketjujen vertailukohtana tarkasteltiin lietteen polton käsittelyketjun vastaavia taseita. Tavoitteena oli laskennan lopputulosten perusteella arvioida ketjujen kestävyyttä energiankulutuksen, kasvihuonekaasupäästöjen ja kustannusten valossa. Käsittelyketjujen tasetarkastelut suoritettiin VTT:ssä.

10.1

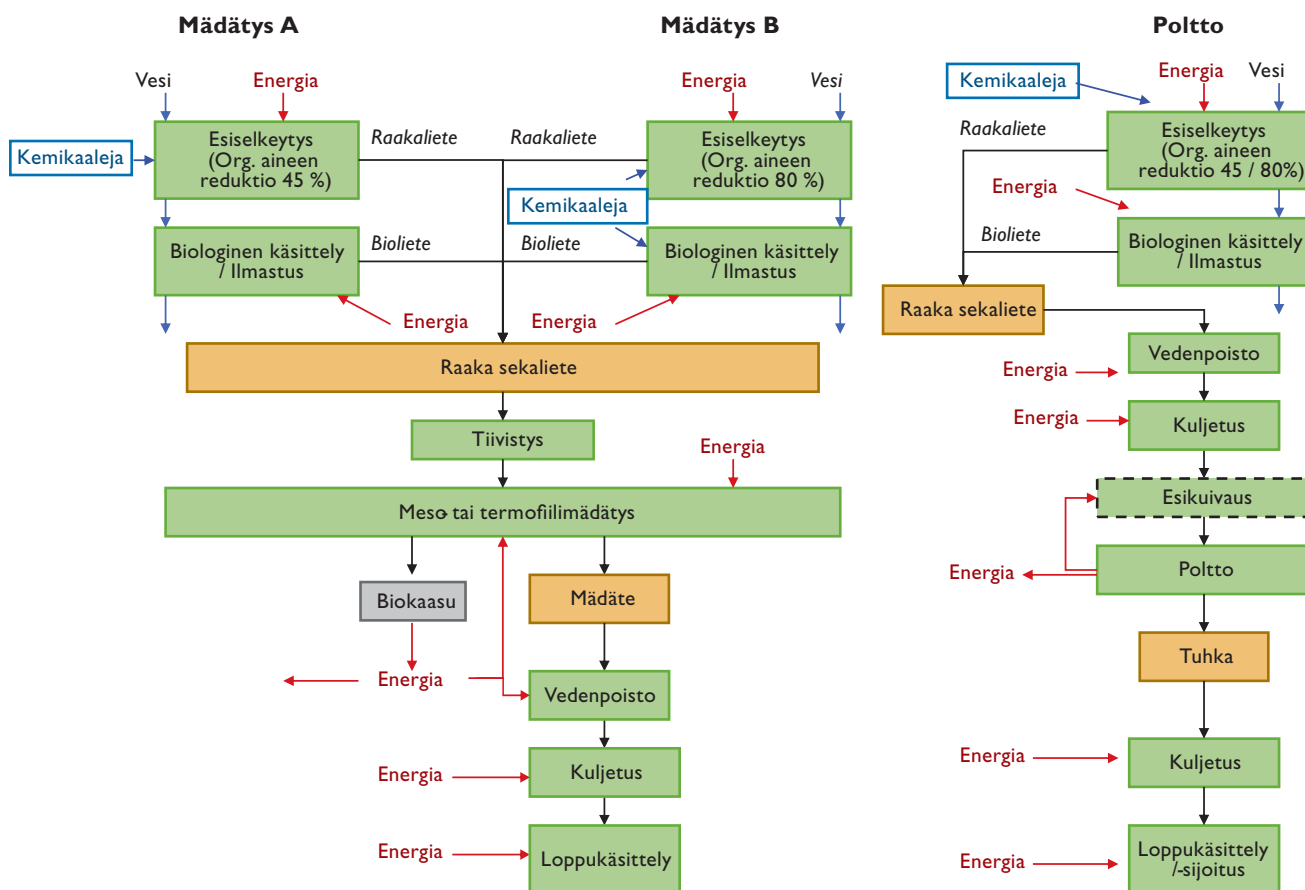
Tarkasteltavien käsittelyketjujen kuvaus

Tarkasteltavat lietteenkäsittelyketjut määriteltiin yhteistyössä projektiryhmän ja hankkeen johtoryhmän asiantuntijoiden kanssa. Jätevedenpuhdistusprosessin sekä mädätyksen osalta ketjujen ja niihin liittyvien parametrien määrittelyssä asiantuntijapua saatiin erityisesti HSY Veden henkilökunnalta. Lietteen polton käsittelyketjussa puolestaan hyödynnettiin Ekokem Oy Ab:n asiantuntemusta.

Termo- ja mesofiilimädätyksen vertailemisen lisäksi projektissa oli tavoitteena arvioida vaihtoehtoisen jätevedenkäsittelyprosessin, esisaostuksen, vaikutusta puhdistamolla syntyvän lietteen määrään ja ominaisuuksiin sekä energiataseeseen. Nykyisin Suomen jätevedenpuhdistamoilla fosforin poisto tapahtuu pääosin rinnakkaissaostuksella, jossa fosfori saostetaan kemiallisesti suurimmaksi osaksi ilmastusaltaassa ja poistetaan ylijäämälietteen mukana. Esisaostusprosessissa suurempi osa fosforia saostetaan jo esiselkeytyksessä, ja orgaanisen aineen reduktio esiselkeytyksessä kasvaa samalla huomattavasti verrattuna rinnakkaissaostusprosessiin. Raakalietteen suhteellinen osuus kokonaislietemäärästä kasvaa, mikä saattaa lisätä biokaasun tuottoa. Samalla myös biologisen osan kuormitus pienenee, mikä puolestaan potentiaalisesti voi vähentää ilmastusenergian tarvetta ja mahdollistaa ilmastusaltaan kapasiteetin hyödyntämisen nitrifikaation tarpeisiin. Näiden hypoteesien tutkimiseksi mädätykseen perustuvat lietteenkäsittelyketjut jaettiin kahteen päähaaraan sen mukaisesti, onko käytössä rinnakkais- vai esisaostus.

Lietteenkäsittelyketjut pyrittiin valitsemaan siten, että ne kuvaisivat mahdollisimman hyvin suomalaisia toimintaolosuhteita. Tarkastelun case-kohteeksi ja lähtökohdaksi valittiin HSY Veden Suomenojan jätevedenpuhdistamo, jossa käsitellään yli 310 000 asukkaan jätevedet kemiallis-biologisessa prosessissa (HSY Vesi 2010). Laskennassa sovellettiin mahdollisimman pitkälle case-kohteen tietoja. Tietoja täydennettiin pääasiassa TERMOS-hankkeessa toteutettujen pilot-koeajojen sekä FCG:n tekemän esisaostus selvityksen (FCG 2010) tuloksilla. Lietteen esikuivauksen ja polton osalta tietoja projektin käyttöön toimitti Ekokem Oy Ab.

Kaikkiin tarkasteltuihin lietteenkäsittelyketjuihin sisältyy jäteveden esiselkeytys, ilmastus, lietteen erotus, varsinainen lietteenkäsittely, kuljetukset ja tuotetun lieteperäisen energian hyödyntäminen. Kuvassa 26 esitetään kootusti kaikki tarkastellut lietteenkäsittelyketjut, niihin liittyvät vaiheet sekä energiapanostusta vaativat ja energiaa tuottavat kohteet. Ketjujen eri vaiheisiin sisältyvien prosessien tarkemmat kuvaukset esitetään jäljempänä laskentaoletusten yhteydessä.



Kuva 26. Lietteenkäsittelyketjujen vaiheet.

10.2

Laskentamenetelmät ja -oletukset

Luvussa kuvataan laskennassa käytetyt menetelmät sekä oleelliset oletukset. Keskeiset lähtötiedot, kertoimet ja tietolähteet esitetään liitteessä 7.

Energiataseiden määrittämiseksi laskettiin lietteenkäsittelyketjujen massataseet sekä sovellettiin energiainventaarimenetelmää. Kaikki ketjuissa esiintyvät energiaa kuluttavat tai tuottavat vaiheet inventoitiin eli selvitettiin kunkin vaiheen lämpö- ja sähköenergian kulutus. Tämän jälkeen koko ketjun energiataase laskettiin summaamalla erikseen kaikki lämpö- ja sähköenergiajakheet. Taulukossa 13 on yhteenveto vaiheista, joissa kulutetaan tai tuotetaan sähköä sekä kuljetustarpeesta. Energiataseiden tulosyksikkönä käytettiin kWh/d Suomenojan puhdistamolla.

Ilmastuksen sähkönkulutus käytettäessä rinnakkaissaostusta tai esisaostusta mallinnettiin FCG:n selvityksessä (2010) käyttäen tarkastelukohteena HSY Veden

Taulukko 13. Sähkön ja lämmön kulutus- ja tuotantokohteet sekä kuljetustarve lietteenkäsittelyketjuissa.

Ketjun nimi	Sähköä kuluttavat vaiheet	Sähköä tuottavat vaiheet	Lämpöä kuluttavat vaiheet	Lämpöä tuottavat vaiheet	Kuljetustarve
Mädätys A ja B	Ilmastus Mädättämön sekoitus ja pumpput Linkous Kompostointi Terminen kuivaus	Biokaasun hyödyntäminen	Mädättämön lämmitys Terminen kuivaus	Biokaasun hyödyntäminen	Mädätteen kuljetus loppukäsittelyyn Kompostin kuljetus loppusijoitukseen
Poltto	Ilmastus Linkous Tuhkan loppukäsittely	Poltto	Terminen esikuivaus	Poltto	Lietteen kuljetus polttolaitokselle Tuhkan kuljetus loppukäsittelyyn

Suomenojan puhdistamo. Selvityksessä tuleva jätevesikuormitus vastasi tilannetta Suomenojan puhdistamolla vuonna 2006 (asukasvastineluku 260 000). Mädätyksen rejektivesien aiheuttama sisäinen kuormitus sisältyi mallinnukseen. Myös muussa laskennassa käytettiin FCG:n selvityksessä määritetyjä lietteen määrä- ja laatutietoja.

Mädättämön sähkönkulutukseen laskettiin mukaan syöttö- ja kierrätyspumput sekä sekoittimet, joiden kulutus laskettiin Suomenojalla käytössä olevien laitteiden tehon perusteella. 15 % sekoittimen sähkötehosta oletettiin muuttuvan lämpöenergiaksi, mikä vähentää hieman mädättämön lämmitystarvetta.

Mädättämön päivittäinen lämmönkulutus laskettiin kaavalla 3. Lisäksi otettiin huomioon lämmönvaihtimen hyötysuhde, jonka arvo (97,2 %) perustuu Suomenojan puhdistamolta saatuihin tietoihin (Sundberg 2009).

$$E_{th, mädättämö} = E_{th, liete} + E_{h, häviöt} \quad (3)$$

Lietteen lämmittämiseen tarvittava lämpöenergiämäärä laskettiin kaavalla 4

$$E_{th, liete} = c_{vesi} \cdot m \cdot \frac{(100 - TS\%)}{100} \cdot \Delta T + c_{liete} \cdot m \cdot \frac{TS\%}{100} \Delta T \quad (4)$$

missä

c_{vesi} = veden ominaislämpökapasiteetti, 4,19 kJ/kg K

m = lietteen massa aikayksikössä, kg/d

$TS\%$ = lietteen kuiva-ainepitoisuus

ΔT = lämpötilan muutos: mädätyslämpötila 37 °C, syöttölietteen lämpötilaksi oletettu Suomenojan mädättämöön syötettävän lietteen lämpötila 11 kk keskiarvona.

c_{liete} = lietteen kuiva-aineen ominaislämpökapasiteetti, 1,05 kJ/kgK

Reaktorien seinämien läpi tapahtuvien lämpöhäviöiden laskemiseksi reaktorit oletettiin lieriöiksi, joiden korkeuden ja säteen suhde on 5. Reaktorien yhteenlaskettu tilavuus on 12 000 m³ (a' 6000 m³). Yhden reaktorin lämpöhäviöt laskettiin kaavalla 5 (Zupancic ja Ros 2003). Mädättämön oletettiin olevan rakenteeltaan betonia, betoni-seinämien paksuudeksi oletettiin 600 mm ja eristepaksuudeksi 100 mm. Laskennassa kaavaan 5 sijoitettiin tätä rakennetta vastaavat vakioiden arvot.

$$E_{th, häviöt} = k_{out} \cdot A_{out} \cdot (T_{mädätys} - T_{out}) + k_{cgrs} \cdot A_{gr} \cdot (T_{mädätys} - T_{grs}) + k_{cgrw} \cdot A_{gr} \cdot (T_{mädätys} - T_{grw}) \quad (5)$$

missä

$$\begin{aligned} k_{out} &= \text{lämmönsiirtokerroin ilmaan } 0,265 \text{ W/m}^2\text{K} \\ A_{out} &= \text{mädättämön ilmaan kosketuksissa oleva pinta-ala, m}^2 \\ T_{mädätys} &= \text{mädätyslämpötila, mesofiilimädätyksessä } 37 \text{ }^\circ\text{C}, \\ &\text{termofiilimädätyksessä } 55 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_{out} &= \text{ulkolämpötila, vuoden keskilämpötila Helsingissä } 5,5 \text{ }^\circ\text{C} \\ k_{cgrs} &= \text{lämmönsiirtokerroin maahan, } 0,235 \text{ W/m}^2\text{K} \\ A_{gr} &= \text{mädättämön maata vasten oleva pinta-ala, m}^2 \\ T_{gr} &= \text{maan lämpötila, } 0 \text{ }^\circ\text{C} \\ k_{cgrw} &= \text{lämmönsiirtokerroin pohjaveteen, } 0,181 \text{ W/m}^2\text{K} \\ T_{grw} &= \text{pohjaveden lämpötila, } 10 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

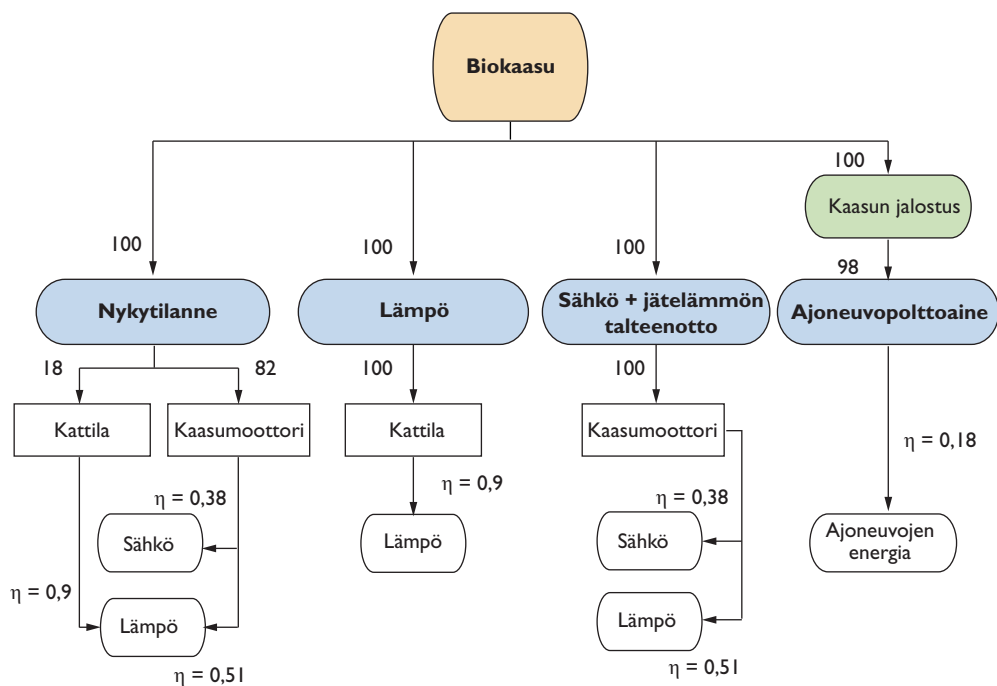
Vedenpoistomenetelmänä Suomenojan puhdistamolla on linkous. Linkouksen sähkönkulutus saatiin HSY Veden käyttötiedoista (Sundberg 2009) ja se normeerattiin laskelmia varten kuiva-ainekiloa kohti.

Laitosmainen kompostointi kuluttaa sähköä lähinnä ilman puhaltamisen muodossa. Kompostoinnin tonnikohtaiset sähkönkulutustiedot saatiin Vapo Biotechnin Nurmijärven kompostointilaitokselta, jossa käsitellään Suomenojan puhdistamon mädätteet (Lahtinen 2010). Sen sijaan kompostoinnin tuottamien jätevesien käsittelyn energiankulutus rajattiin tarkastelun ulkopuolelle.

Lietteen termisen kuivauksen sähkönkulutustiedot perustuvat Joensuun Veden termiseen kuivauslaitokseen, jonka energia- ja massatase on kuvattu POLKU-hankkeessa (Myllymaa ym. 2008). Joensuun Veden laitokseen verrattuna Suomenojan lietteiden käsittelemiseksi tarvittaisiin kapasiteetiltaan noin 3,5-kertainen laitos. Muita kotimaisia referenssejä lietteen termisestä kuivauksesta ei kuitenkaan ollut käytettävissä. Muihin kaupallisiin termisiin kuivaimiin (esim. Gea höyrykuivuri, (GEA Barr-Rosin 2010)) verrattuna Joensuun Veden kuivauslaitoksen prosessisähkön kulutus on Myllymaan ym. (2008) perusteella varsin suuri (noin kaksinkertainen). Termisen kuivauksen jätevesien käsittelyn energiankulutus rajattiin tarkastelun ulkopuolelle. Termisen kuivauksen lämpöenergiankulutus riippuu olennaisesti halutusta kuivaustuloksesta ja syötettävän lietteen kuiva-ainepitoisuudesta. Termisen kuivauksen öljynkulutuksen määrittämiseen käytettiin Myllymaan ym. (2008) arviota, minkä perusteella laskettu lämmönkulutus on suhteellisen lähellä teoreettista, veden höyrystymislämpöön perustuvaa lämmönkulutusta.

Biokaasun hyödyntämiseksi tarkasteltiin neljää eri vaihtoehtoa, jotka esitetään hyötysuhteineen kuvassa 27. Vaihtoehto "Nykytilanne" vastaa HSY Veden Suomenojan puhdistamon tämänhetkistä biokaasun hyödyntämistä, jossa suurin osa biokaasusta johdetaan kaasumoottorille ja pienempi osa kattilaan. Jokaisessa vaihtoehdoissa oletettiin, että kaikki tuotettu kaasu hyödynnetään eli kaasua ei johdeta soihtuun. Vaihtoehdossa "Ajoneuvopolttoaine" kaasu jalostetaan biometaaniksi jätevedenpuhdistamon yhteydessä ja hyödynnetään kaasukäyttöisten bussien polttoaineena. Kaasun jalostusmenetelmäksi oletettiin vesipesu, jonka avulla biokaasusta poistetaan sen sisältämä hiilidioksidi, rikkivety, siloksaanit, halogenoidut hiilivedyt ja vesi. Tuotteena saadaan biometaan (metaanipitoisuus 97 %).

Mädätysketjuihin sisältyvät prosessivaiheet sekä niihin liittyvät keskeisimmät oletukset kuvataan taulukossa 14.



Kuva 27. Biokaasun hyödyntämismahdollisuudet.

Taulukko 14. Mädätykseen perustuvien lietteenkäsittelyketjujen prosessivaiheet.

Prosessivaihe	Kuvaus	Oletukset	Lähde
Jätevedenkäsittelyn prosessivaihtoehdot			
Rinnakaissaostus	Saostuskemikaali: ferrosulfaatti	Raaka- ja biolietteen suhde raakasekalietteessä: 62/38	(FCG 2010)
Esisaostus	Saostuskemikaali: ferrisulfaatti	Raaka- ja biolietteen suhde raakasekalietteessä: 80/20	(FCG 2010)
Tiivistys	Gravitaatiotiivistys	TS 2,4 % → 3,4 %, orgaanisen aineen osuus säilyy muuttumattomana. Energiankulutus mitätön.	(Sundberg 2009)
Mädätysprosessit			
Mesofilimädätys	Mädätyslämpötila 37 °C. Prosessin lämmitysenergian tarve koostuu mädättämöön menevän lietteen lämmitysenergiasta sekä mädättämön seinämien läpi tapahtuvien häviöiden kompensoimisesta.	Syöttölietteen VS/TS-suhde: 0,67- 0,70 riippuen sovellettavasta jätevedenkäsittelyn prosessivaihtoehdosta. VS-vähennelmä raakalietteelle 50 % ja bioliettele 30 %. Metaanintuotto raakalietteelle 0,315 m ³ /kg VS _{in} ja bioliettele 0,196 m ³ /kg VS _{in} . Biokaasun metaanipitoisuus 63 %.	(Pérez-Elvira ym. 2008; FCG 2010)
Termofilimädätys	Mädätyslämpötila 55 °C. Prosessin lämmitysenergian tarve koostuu mädättämöön menevän lietteen lämmitysenergiasta sekä mädättämön seinämien läpi tapahtuvien häviöiden kompensoimisesta.	Kaasuntuotto/kg VS _{in} termofiliprosessissa 1,41-kertainen mesofiliprosessiin verrattuna. Biokaasun metaanipitoisuus 63 %.	SYKE:n pilot-kokeet TERMOS-hankkeessa

Prosessivaihe	Kuvaus	Oletukset	Lähde
Biokaasun hyödyntämismuutokset			
Nykytila	Tuotettu biokaasu syötetään kaasumoottorille ja polttimelle suhteessa 82/18	Polttimen hyötysuhde $\eta_{th} = 0,90$. Kaasumoottorin hyötysuhteet: $\eta_e = 0,38$, $\eta_{th} = 0,51$ (jätelämmön talteenotto)	Perustuen lähteeseen (Sundberg 2009)
Lämpö	Tuotettu biokaasu syötetään polttimelle.	Polttimen hyötysuhde: $\eta_{th} = 0,90$.	Perustuen lähteeseen (Sundberg 2009)
Sähkö + jätelämmön talteenotto	Tuotettu biokaasu syötetään kaasumoottorille.	Kaasumoottorin hyötysuhteet: $\eta_e = 0,38$, $\eta_{th} = 0,51$ (jätelämmön talteenotto).	Perustuen lähteeseen (Sundberg 2009)
Ajoneuvokäyttö	Tuotettu biokaasu jalostetaan ajoneuvopolttoaineeksi (biometanisaatio) ja käytetään bussien polttoaineena.	Biokaasun jalostukseen käytetään vesipesuria, joka kuluttaa sähköä noin 5 % biokaasun energiasta sähköä ja aiheuttaa noin 2 % metaanihäviöt. Ajoneuvokäytössä 18 % biometaanin energiasta muuntuu ajoneuvon liike-energiaksi.	(Persson 2003; Lappalainen 2010; Laurikko 2010)
Mädätteen vedenpoisto	Linkous	TS 2,5 → 29 %	(Sundberg 2009)
Kuljetukset	Maakuljetus rekka-autoilla.	Mädäte kuljetetaan täysissä kuormissa täysperävaunurekalla (40 t).	(VTT 2010)
Loppukäsittelyvaihtoehdot			
Kompostointi	Tunnelikompostointi.	Kompostointi kuluttaa sähköä 71,9 kWh/t lietettä. Jätevedenpuhdistamon ja kompostointilaitoksen välinen etäisyys on 50 km, maantieajoa 95 %, kaupunkiajtoa 5 %.	(Lahtinen 2010)
Terminen kuivaus	Suoralämmitteinen kaksoislamellikuivain, joka lämmitetään biokaasulla ja kevyellä polttoöljyllä.	Terminen kuivaus toteutetaan jätevedenpuhdistamon yhteydessä. Kuivatun lietteen TS 83 %. Kuivaimen jätelämpöä oletetaan otettavan talteen hyötysuhteella 68 %. Öljyn lämpöarvo 11,8 kWh/kg, kuivaimen hyötysuhde 0,9.	(Myllymaa ym. 2008)

Mädätysketjujen rinnalla tarkasteltiin vertailukohtana lietteen polttoon perustuvaa käsittelyketjua (kuva 26). Lietteen polttoa ei Suomessa tutkimuksen tekemisen aikaan laajamittaisesti sovellettu lietteenkäsittelymenetelmänä. Näin ollen lietteen polttoon perustuva lietteenkäsittelyketju edustaa hypoteettista, joskin periaatteessa mahdollista skenaariota lietteen termiseksi käsittelemiseksi. Jätevesiprosessin osalta lietteen polttoon perustuva ketju on identtinen mädätysketjujen kanssa. Raaka sekaliete lingotaan jätevedenpuhdistamolla kuiva-ainepitoisuuteen 29 % ja kuljetetaan maanteitse Riihimäellä sijaitsevalle polttolaitokselle, jossa se poltetaan rinnakkaispolttona jätettä polttavassa arinalaitoksessa. Tuotettu energia oletettiin hyödynnettävän joko kaukolämpönä tai sähköä ja kaukolämpönä. Optiona tarkasteltiin myös lietteen termistä esikuivausta, jonka energiankulutustiedot perustuvat Ekokem Oy Ab:n tekemiin koearvoihin yhdyskuntajätevesilietteellä. Esikuivaus mahdollistaisi periaatteessa lietteen polton erillispolttona. Sen sijaan linkokuivatun lietteen poltto edellyttää tukipolttoaineen käyttöä. Lietteen poltossa muodostuneen tuhkan määrät ja tuhkan käsittelyn sähkökulutustiedot saatiin Ekokemiltä (Nurmi 2010).

Lietteenpolttoketjuun sisältyvät prosessivaiheet sekä niihin liittyvät keskeisimmät oletukset kuvataan taulukossa 15.

Taulukko 15. Lietteen polttoon perustuvien lietteenkäsittelyketjujen vaiheet.

Prosessivaihe	Kuvaus	Oletukset	Lähde
Jätevedenkäsittelyn prosessivaihtoehdot			
Rinnakkaissaostus	Saostuskemikaali: ferrosulfaatti	Raakasekalietteen määrä Raaka- ja biolietteen suhde raakasekaliet- teessä: 62/38.	(FCG 2010)
Esisaostus	Saostuskemikaali: ferrisulfaatti	Raakasekalietteen määrä Raaka- ja biolietteen suhde raakasekaliet- teessä: 80/20	(FCG 2010)
Tiivistys	Gravitaatiotiivistys	TS 2,4 % → 3,4 %, orgaanisen aineen osuus säilyy muuttumattomana. Energiankulutus mitätön.	(Sundberg 2009)
Vedenpoisto	Linkous	Lingotun lietteen TS 29 %	(Sundberg 2009)
Esikuivaus	Terminen kuivaus	TS:n kasvu esikuivauksessa: 29 %:sta 40 %:iin. Kuivaimesta oletetaan saatavan talteen lämpöä hyötysuhteella 68 %.	(Nurmi 2010)
Poltto	Arinapoltto yhdyskuntajätettä polttavalla laitoksella rinnakkaispolttona.	Lietteen alempi lämpöarvo: 13 MJ/kg TS Kattilahyötysuhde: 0,80 Tuotettu energia hyödynnetään sähköinä ja kaukolämpönä suhteessa 75/25 tai pelkästään kaukolämpönä.	(Manninen 2009)
Kuljetukset	Maantiekuljetus rekka-autoilla.	Liete ja tuhka kuljetetaan täysissä rekka- kuormissa (40 t). Jätevedenpuhdistamon ja polttolaitoksen välinen etäisyys 85 km. Polttolaitoksen ja tuhkaakaatopaikan välinen etäisyys 200 km.	(VTT 2010; Nurmi 2010)
Tuhkan käsittely	Stabilointi ja loppusijoitus kaatopaikalle.	Tuhkan tuotto: noin 33 % lietteen kuiva- aineesta poistuu prosessista tuhkana.	(Nurmi 2010)

10.2.1

Kasvihuonekaasutaseet

Kasvihuonekaasutaseet laskettiin kaavan 6 mukaisesti. Taseiden määrittämisen pohjana käytettiin ketjuille laskettuja energiataseita. Laskennassa huomioitiin sekä epäsuorat, sähkö- ja lämpöenergian kulutuksen ja kuljetuksien aiheuttamat päästöt että suorat, prosesseista vapautuvat haihduntapäästöt. Ketjuissa tuotettu bioperäinen sähkö ja lämpö sekä biometaani korvaavat fossiilista tuotantoa ja polttoaineita ja siten vähentävät kasvihuonekaasupäästöjä. Päästöistä huomioitiin fossiilinen hiilidioksidi, metaani ja dityppioksididi, ja karakterisointikertoimina käytettiin IPCC:n (2007) määrittämiä Global Warming Potential (GWP) – kertoimia 100 vuoden vaikutusajanjaksoille (CO₂: 1, CH₄: 25, N₂O: 298).

$$KHK_{ketju} = KHK_e + KHK_{th} + KHK_{kulj.} + KHK_{haihd.} + KHK_{kem.} - KHK_{e,korv.} - KHK_{th,korv.} - KHK_{f,korv.} \quad (6)$$

missä

KHK_{ketju} = koko ketjun kasvihuonekaasupäästöt

KHK_e = ketjussa käytetyn ulkopuolisen sähköenergian kasvihuonekaasupäästöt

KHK_{th} = ketjussa käytetyn ulkopuolisen lämpöenergian kasvihuonekaasupäästöt

$KHK_{kulj.}$ = ketjussa tarvittavien kuljetusten kasvihuonekaasupäästöt

$KHK_{haihd.}$ = ketjussa esiintyvät haihduntapäästöt (CH₄, N₂O)

$KHK_{kem.}$ = ketjussa käytettävien kemikaalien aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt

$KHK_{e' korv.}$ = ketjussa syntyvät sähkön korvaushyödyt

$KHK_{th' korv.}$ = ketjussa syntyvät lämpöenergian korvaushyödyt

$KHK_{f' korv.}$ = ketjussa syntyvät ajoneuvopolttoaineen korvaushyödyt

UlkoPuolisen sähköenergian (ostosähkön) oletettiin tässä tarkastelussa olevan päästöprofiililtaan Suomen keskimääräisen sähköntuotannon mukaista. Ostolämpöä tarvitaan lähinnä silloin, jos mädätteen loppukäsittely on terminen kuivaus, ja tällöin lämmön oletettiin olevan peräisin kevyestä polttoöljystä. Kuljetusten oletettiin olevan maantiekuljetusta, ja niiden kasvihuonekaasupäästöt laskettiin VTT:n Lipastotietokannan avulla. Haihduntapäästöjä arvioitiin vesiprosessin ja kompostoinnin osalta. Vesiprosessin haihduntapäästöjen määrittämiseen käytettiin Suomen kasvihuonekaasuinventaarion mukaista laskentatapaa, jossa metaanipäästöt riippuvat tulevan jäteveden BOD-kuormasta kaavan 7 mukaisesti (Tilastokeskus 2010a).

$$\text{Päästöt (Gg CH}_4\text{)} = \text{BOD}_{5\text{tuleva}} * \text{B0} * \text{MCF} / 1000000 \quad (7)$$

$$\text{BOD}_{5\text{tuleva}} = \text{BOD}_{7\text{tuleva}} / 1,17$$

$\text{B0} = \text{Jäteveden maksimi metaanintuottokapasiteetti (IPCC:n oletuskerroin } 0,625 \text{ kg CH}_4\text{ / kg BOD)}$

$\text{MCF} = \text{Metaanin konversiokerroin (0,01)}$

Kompostoinnin haihduntapäästöt laskettiin Myllymaan ym. (2008) tutkimuksessa esitettyjen päästökertoimien perusteella (liite 7). Käytetyistä kemikaaleista huomioitiin metanoli, jota käytetään jätevedenpuhdistuksessa typenpoistoprosessin ulkoisena hiilenlähteenä.

Biokaasusta kaasumoottorissa tai lietteestä polttoprosessissa tuotetun sähkön oletettiin korvaushyötyjen laskennassa korvaavan Suomen keskimääräistä sähköntuotantoa. Lämpöenergian korvaushyötyjä syntyy, kun biokaasusta tuotetulla lämmöllä korvataan lietteen termisessä kuivauksessa energiaa, joka muutoin tuotettaisiin kevyellä polttoöljyllä. Ajoneuvopolttoaineeksi jalostetun biokaasun eli biometaanin oletettiin korvaavan dieselpolttainetta. Mädätysketjujen lopputuotteille, kompostille tai termisesti kuivatulle lietteelle ei tässä tarkastelussa laskettu korvaushyötyjä, koska kirjallisuuden perusteella näiden hyötyjen sisällyttäminen ja mahdollisten hyötyjen suuruusluokat ovat vielä kiistanalaista. Sivutuotteiden rajaamista biopolttainneiden tuotantoketjun kasvihuonekaasutaseen ulkopuolelle tukee myös EU:n RES-direktiivin tulkinta (Soimakallio ym. 2010).

Lietteen polton käsittelyketjussa korvaushyötyjä muodostuu, kun tuotetulla lämmöllä korvataan maakaasulla (80 %) ja kevyellä polttoöljyllä (20 %) tuotettua kaukolämpöä (Ekokem 2009). Tuotetun sähkön on tässäkin tapauksessa oletettu korvaavan Suomen keskimääräistä sähköntuotantoa.

10.2.2

Kustannuslaskenta

Kustannuslaskennan pohjana käytettiin energiataselaskelmaa, ja kustannuslaskenta toteutettiin jätevedenpuhdistamon näkökulmasta. Laskennassa huomioitiin puhdistamolle koituvat vuotuiset käyttö- ja investointikustannuserät sekä tulot. Kustannuslaskennassa huomioitiin seuraavat kustannuserät:

- Ostosähkön kustannukset siltä osin, kun puhdistamon oma sähköntuotanto biokaasusta ei kata tarvetta.
- Jätevedenkäsittelyprosessin kemikaalikustannukset
- Ostolämmön kustannukset siltä osin, kun oma lämmöntuotanto biokaasusta ei kata tarvetta
- Vuotuiset pääoma- ja käyttökustannukset kattilalle, kaasumoottorille, kaasun puhdistuslaitteille (ennen kaasumoottoria), biometanisaatiolaitteille (vesipesuri) sekä termiselle kuivaimelle.
- Mädätteen kuljetuskustannukset kompostointilaitokselle

- Kompostointikustannukset
- Lietteen kuljetuskustannukset polttolaitokselle
- Oletettu porttimaksu polttolaitokselle

Tulot koostuvat seuraavista eristä:

- Tuotot verkkoon syötetystä biokaasusähköstä
- Biokaasusähkön syöttötariffin mahdollisesti tuomat lisätulot
- Tuotot ajoneuvopolttoaineesta

Jätevedenpuhdistamo hyödyntää prosesseissaan omaa sähkön- ja lämmöntuotantoaan. Lämpöä kuluttavista puhdistamoprosesseista (mädätys, terminen kuivaus) mahdollisesti yli jäävän lämmön osalta ei oletettu saatavan tuottoja. Myöskään terminen kuivaus ei oletettu taloudellista arvoa. Vuotuisten pääomakustannusten laskennassa käytettiin annuiteettimenetelmää (korkokanta 6 %, laitteistojen tekninen käyttöikä 20 vuotta). Mädätteen kompostoinnin ja lietteen polton osalta operaattoreina ovat ulkopuoliset toimijat, joille jätevedenpuhdistamo maksaa tonnikohtaisen käsittelymaksun. Mädättämön ja polttolaitoksen investointikustannuksia ei sisällytetty laskelmaan.

Kustannuslaskennassa arvioitiin mahdollisen biokaasusähkön syöttötariffin vaikutusta mädätysketjujen taloudellisuuteen. Takuuhintana laskennassa käytettiin vuonna 2011 voimaan tulleen lain (1396/2010) mukaista tasoa 133,5 €/MWh (sisältäen lämpöpreemion 50 €/MWh). Lain mukaan tukijärjestelmän piiriin tulevat biokaasulaitokset, jotka eivät ole saaneet valtiontukea ja jotka ovat uusia. Näin ollen käytännössä jo olemassa olevat laitokset eivät tulisi saamaan tariffituottoja, elleivät palauta niille aikaisemmin myönnettyjä valtiontukia. Tämän vuoksi kustannuslaskelmat tehtiin myös tapaukselle, jossa tariffin tuomia lisätuloja ei saada.

10.3

Tulokset

Energia- ja kasvihuonekaasutaseiden sekä kustannusten laskennassa oli useita erilaisia tarkastelunäkökulmia ja vertailtavia prosessivaihtoehtoja:

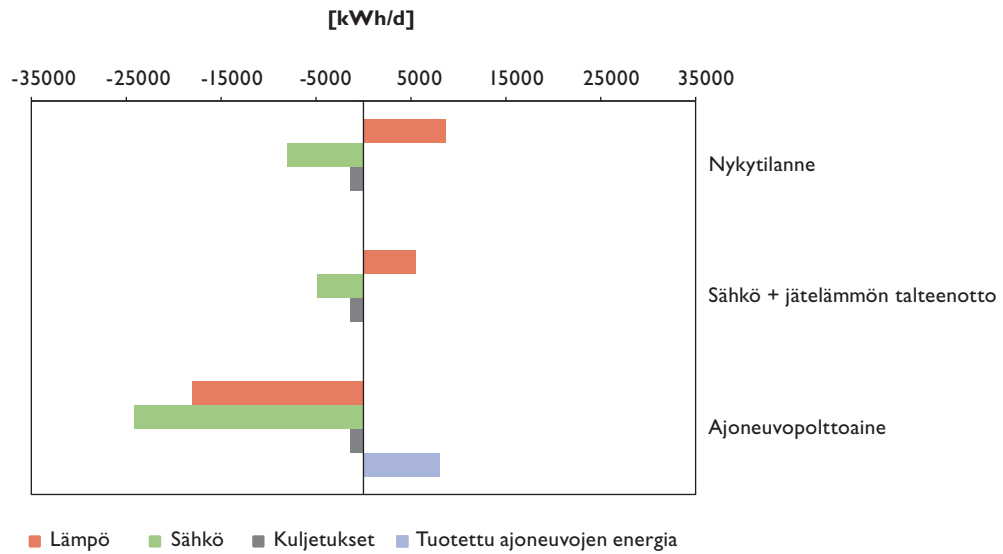
- biokaasun tuotannon tehostaminen: esisaostus vs. rinnakkaissaostus ja mesofiili- vs. termofiilimädätys
- biokaasun hyödyntämismuutokset
- mädätteen käsittelyvaihtoehdot
- mädätys vs. lietteen poltto

Seuraavassa esitetään tuloksia energiataseiden osalta eri tarkastelunäkökulmista.

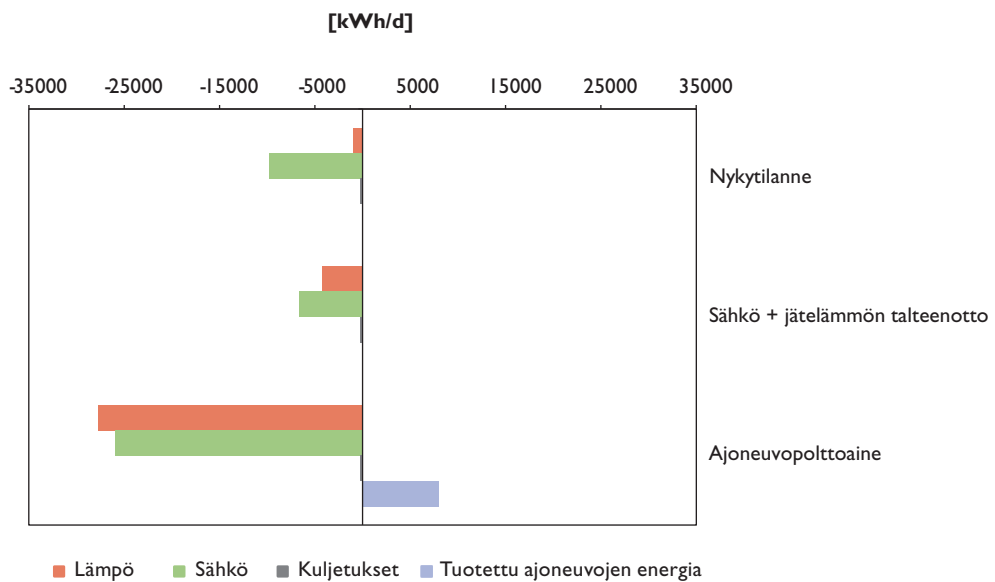
10.3.1

Mädätteen loppukäsittelyn vaikutus

Kuvissa 28 ja 29 vertaillaan mädätteen loppukäsittelyvaihtoehtojen vaikutusta lietteenkäsittelyketjujen energiataseeseen, jätevedenpuhdistusprosessina on rinnakkaisaostus. Kummassakin kuvassa esitetään kolmeen eri biokaasun hyödyntämistapaan perustuvan ketjun sähkön ja lämmön kokonaistaseet (nettoenergiataseet), joissa kaikkien energiaa kuluttavien ja tuottavien osaprosessien vaikutus on laskettu yhteen. On huomioitava, että varsinaisten lietteenkäsittelyprosessien lisäksi taseisiin sisältyy myös ilmastuksen sähkönkulutus. Lämmön suhteen optimaalisena voidaan pitää tilannetta, jossa tase on lähellä nollaa, sillä ylijäämälämmölle ei tässä tarkastelussa löydetty mielekästä käyttötarkoitusta. Tällöin lietteen käsittelyketju on lämmön suh-



Kuva 28. Energiataseen lietteenkäsittelyketjuille, joissa liete mädätetään mesofilisesti ja mädätteen loppukäsittelynä on kompostointi.



Kuva 29. Energiataseen lietteenkäsittelyketjuille, joissa liete mädätetään mesofilisesti ja mädätteen loppukäsittelynä on terminen kuivaus.

teen omavarainen, mutta myöskään ylijäämälämpöä ei tuoteta. Jo alustavien laskelmien perusteella todettiin, että pelkästään lämmön tuottaminen biokaasusta kattilassa (kuva 27) ei ole energiataloudellinen vaihtoehto. Tämän vuoksi tulokset esitetään vain biokaasun hyödyntämisvaihtoehdoille, joissa tuotetaan sähköä ja lämpöä (nykytila, sähkö + jätelämmön talteenotto) tai ajoneuvopolttoainetta.

Kuvasta 29 havaitaan, että terminen kuivaus kuluttaa paljon energiaa, erityisesti lämpöä. Termiselle kuivaukselle oletettiin lämmön talteenottoaste 68 %. Biokaasusta tuotettua lämpöä (joko kattilasta tai jätelämpönä kaasumoottorilta) voidaan hyödyntää termisessä kuivauksessa, joten vain pieni määrä on tuotettava kevyestä polttoöljystä. Mädätteen kompostoinnin tapauksessa suuri osa tuotetusta lämmöstä

jää ylijäämälämpönä lauhdutettavaksi (pl. ketju, jossa biokaasu jalostetaan ajoneuvopolttoaineeksi). Sekä kompostoinnin että termisen kuivauksen osalta tutkituista vaihtoehdoista energiataloudellisesti järkevintä on tuottaa kaikesta tuotetusta biokaasusta sähköä. Missään tarkastelluista vaihtoehdoista sähköä ei kuitenkaan jää ketjussa yli, eli kaikki lietteenkäsittelyketjut ovat sähköä kuluttavia. Ketjuissa, joissa biokaasu jalostetaan ajoneuvopolttoaineeksi, ketjun koko sähkön ja lämmöntarve tulee kattaa ulkopuolisella energialla. Kaikissa kuvien ketjuissa lietteen tai mädätteen kuljetukset muodostavat hyvin pienen osan koko energiataseesta.

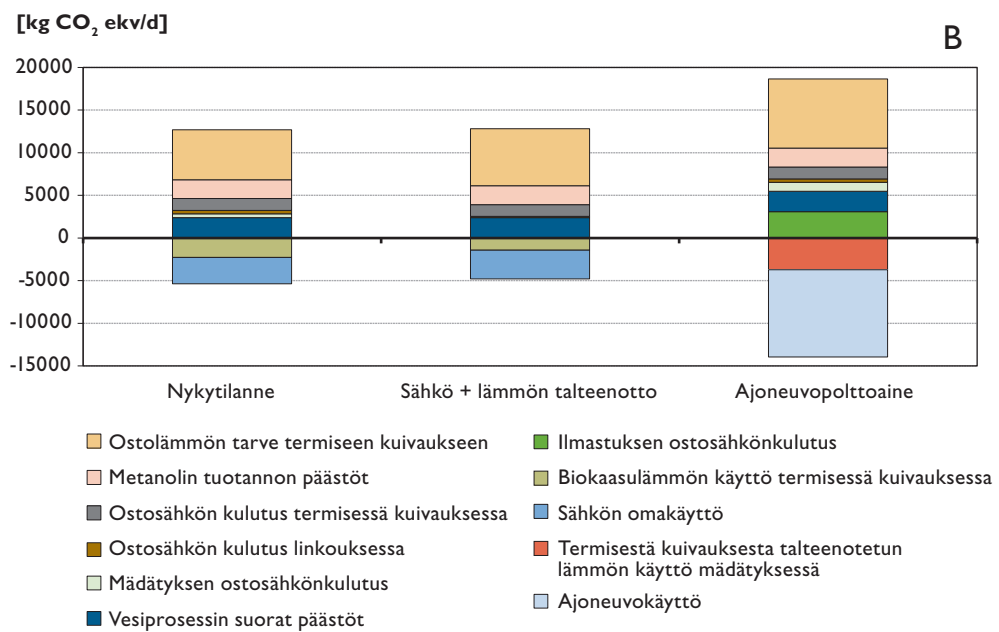
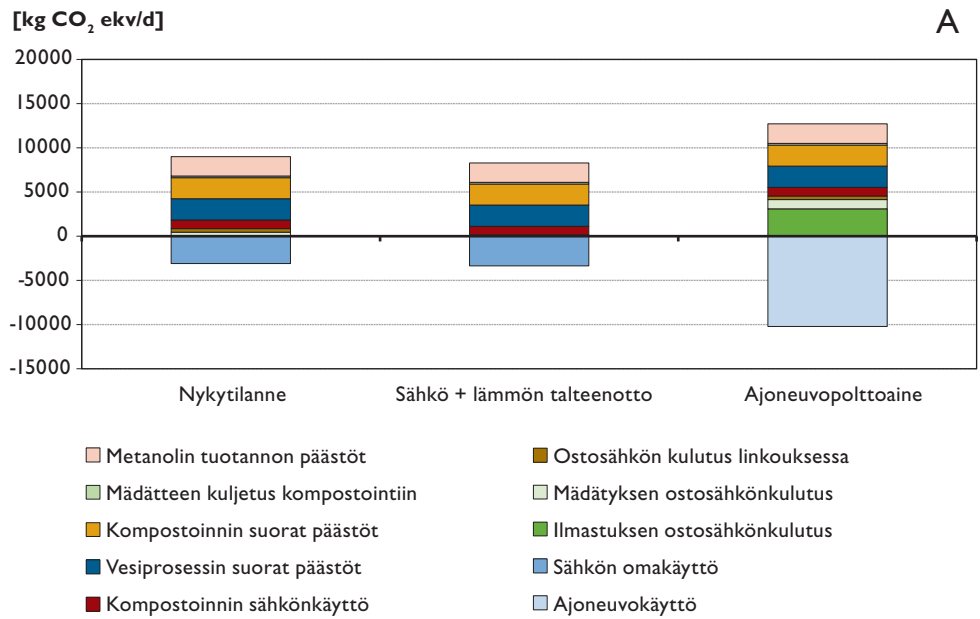
Kuvassa 30 (A: kompostointi, B: terminen kuivaus) esitetään vastaavien lietteenkäsittelyketjujen kasvihuonekaasutaseet. Negatiivisella puolella olevat palkit merkitsevät ketjussa saavutettuja korvaushyötyjä eli säästöjä kasvihuonekaasupäästöissä. Kuvasta nähdään, että ketjujen kokonaiskasvihuonekaasutaseet (nettopäästöt) ovat melko samalla tasolla. Kun biokaasu jalostetaan ajoneuvopolttoaineeksi, ovat sekä päästöt että korvaushyödyt suurimmat. Tällöin ilmastuksen sähkönkulutus on merkittävin kasvihuonekaasupäästöjä aiheuttava osaprosessi. Kaikissa ketjuissa kompostoinnin ja vesiprosessin suorat haihduntapäästöt muodostavat suhteellisen suuren osan kaikista khk-päästöistä. Kompostoinnin haihduntapäästöt laskettiin tässä tarkastelussa Myllymaan ym. (2008) tutkimuksessa esitettyjen päästökertoimien perusteella (liite 7). Haihduntapäästöjen kokeelliseen määrittämiseen liittyy kuitenkin suuria epävarmuuksia, ja siten myös eri lähteissä esitettyjen päästökertoimien välillä on melko suurta vaihtelua. Mikäli laskennassa käytettäisiin esim. IPCC:n oletuspäästökertoimia kompostoinnille (Tilastokeskus 2010b), tuloksena saatavat khk-päästöt olisivat nyt esitettyihin nähden noin kolminkertaiset.

Vesiprosessissa ulkoisena hiilenlähteenä käytettävän metanolin kulutus aiheuttaa verrattain suuret kasvihuonekaasupäästöt. Metanoli tuotetaan maakaasusta ja sen valmistusprosessin päästökerroin on korkea (525 g CO₂ ekv/kg).

Kuten kuvasta 29 havaittiin, biokaasusta tuotettu lämpö ei riitä termisen kuivauksen tarpeisiin. Näin ollen ketjuissa, joissa mädäte kuivataan termisesti, ulkopuolisen energian käyttö (kevyt polttoöljy) aiheuttaa merkittävät päästöt. Vaikka biokaasusta tuotetun lämmön hyödyntämisellä saadaan öljyä korvattaessa merkittävät korvaushyödyt, muodostuu tase kompostointivaihtoehtoja heikommaksi (suuremmat päästöt).

Laskettuihin kasvihuonekaasutaseisiin ei ole sisällytetty korvaushyötyjä kompostista tai termisesti kuivatusta mädätteestä. Kirjallisuuden perusteella on vielä epäselvää, kuinka suuri osuus maa- tai metsätalouskäyttöön ohjattavan lietteen ravinteista olisi kasvien hyödynnettävissä. Osa lietteen hiilestä voi sitoutua maaperään, mutta tästäkin prosessista on vain rajoitetusti tutkittua tietoa. Lopputuotteen korvaushyötyjen sisällyttäminen laskentaa voisi oleellisesti parantaa mädätykseen perustuvien ketjujen kasvihuonekaasutaseita.

Ostosähkön päästökertoimen valinnalla on suuri merkitys kasvihuonekaasupäästöjen laskentaan, sillä sähkön päästökerrointa käytetään sekä päästöjen (ostosähkön käyttö ilmastukseen, mädätykseen, linkoukseen, kompostointiin ja termiseen kuivaukseen) että korvaushyötyjen laskennassa (biokaasusähkön käyttö). Tässä tarkastelussa käytettiin Suomen keskimääräisen sähköntuotannon päästökerrointa.



Kuva 30. KHK-taseet lietteenkäsittelyketjuille, joissa liete mädätetään mesofilisesti ja mädätteen loppukäsittelynä on kompostointi (A) tai terminen kuivaus (B). Jätevedenkäsittelyprosessina rinnakaissaostus.

Biokaasutuotannon tehostaminen: esisaostus ja termofiilimädätys

Biokaasun tuotannon tehostamiskeinoina arvioitiin tässä tarkastelussa esisaostusta ja termofiilimädätystä.

FCG Finnish Consulting Group Oy on laatinut työhön liittyvänä erillisselvityksenä 'Esisaostuksen vaikutus lietteen syntyyn ja jätevedenpuhdistuksen energia- ja kemikaalikulutukseen'. Siinä tarkasteltiin kolmea prosessivaihtoehtoa (rinnakkaissaostuksella varustettu typenpoistolaitos, esisaostuksella varustettu typenpoistolaitos ja esisaostuksella varustettu nitrifioiva laitos). Näistä laadittiin koko prosessin kattavat ainetasekaaviot, joiden pohjalta saatiin tarvittavat kemikaali- ja ilmastusilmamäärät, syntyvien lietejakeiden määrät ja laatu sekä biokaasun määrät.

Esisaostusprosessissa raakalietteen (primäärilietteen) osuus mädätykseen johdettavasta raakasekalietteessä on suurempi kuin rinnakkaissaostusprosessissa, sillä suurempi osuus orgaanisesta aineesta poistuu esiselkeytyksessä. FCG:n toteuttaman esisaostusprosessin mallinnuksen mukaan raakalietteen ja biolietteen suhde olisi noin 80/20, kun taas rinnakkaissaostuksessa vastaava suhde olisi 62/38 (taulukko 14). Tämän seurauksena esisaostusvaihtoehdossa voitaisiin potentiaalisesti tuottaa noin 35 % enemmän biokaasua rinnakkaissaostukseen nähden, minkä johdosta sekä energia- ja khk-taseet olisivat esisaostusta käytettäessä pääsääntöisesti edullisemmat (taulukko 16). Esisaostuksen käyttöönotto kuitenkin lisäisi jätevedenpuhdistamon käyttökustannuksia merkittävästi (ks. luku 11.3.4).

Termofiilimädätyksen käyttöönoton mahdollista vaikutusta case-kohteen energia- ja kasvihuonekaasutaseisiin arvioitiin SYKEN hankkeessa toteuttamien pilotmittakaavan mädätyskokeiden perusteella. Vaikka termofiiliprosessi kuluttaa merkittävästi enemmän lämpöenergiaa, kokeissa havaittu biokaasun tuotannon lisäys (+41 %) kompensoi lisääntyneen lämmönkulutuksen. Näin ollen termofiilimädätykseen perustuvien lietteenkäsittelyketjujen energiataloudellisuus ja kasvihuonekaasupäästöt ovat mesofiilimädätykseen perustuvia vastaavia ketjuja paremmat.

Yhteenveto esisaostuksen ja termofiilimädätyksen käyttöönoton vaikutuksista lietteenkäsittelyketjujen khk-taseisiin esitetään taulukossa 16. Termofiilimädätysketjujen khk-taseet ovat käytetyillä laskentaoletuksilla edullisemmat kuin vastaavien mesofiilimädätysketjujen taseet. Esisaostuksen ja rinnakkaissaostuksen keskinäinen paremmuus ei tulosten perusteella ole selvää, mutta pääsääntöisesti esisaostukseen perustuvien ketjujen tuottamat kasvihuonekaasupäästöt ovat hieman rinnakkaissaostusketjuja alhaisemmat. Mädätteen loppukäsittelymenetelmistä terminen kuivaus on khk-taseiden valossa edullisempi, mikäli käytössä on esisaostus ja/tai termofiilimädätys ja siten käytettävissä suurempi määrä biokaasua. Mikäli biokaasu ei riitä termisessä kuivauksessa tarvittavan lämmön tuottamiseen, heikkenee tase oleellisesti, sillä puuttuva lämpö oletettiin tuotettavan öljystä

Taulukko 16. Eri lietteenkäsittelyketjujen kasvihuonekaasutaseita. ”Nykytila”: biokaasu johdetaan kaasumoottorille ja kattilaan suhteessa 82/18.

	Rinnakkaissaostus (Mädätys A)			Esisaostus (Mädätys B)		
	Kaasunkäyttövaihtoehto			Kaasunkäyttövaihtoehto		
	Nykytila	Sähkö + jäte- lämmön talteenotto	Ajoneuvo- polttoaine	Nykytila	Sähkö + jäte- lämmön talteenotto	Ajoneuvo- polttoaine
Mesofiilimädätys + kompostointi						
Emissiot kg CO ₂ ekv/d	9000	8000	16000	10000	10000	19000
Korvaushyödyt kg CO ₂ ekv/d	-3000	-3000	-10000	-4000	-5000	-14000
Netto	6000	5000	6000	6000	5000	5000
Mesofiilimädätys + terminen kuivaus						
Emissiot kg CO ₂ ekv/d	13000	13000	19000	12000	12000	21000
Korvaushyödyt kg CO ₂ ekv/d	-5000	-5000	-14000	-8000	-7000	-18000
Netto	8000	8000	5000	4000	5000	3000
Termofiilimädätys + kompostointi						
Emissiot kg CO ₂ ekv/d	8000	8000	20000	10000	10000	23000
Korvaushyödyt kg CO ₂ ekv/d	-4000	-5000	-14000	-5000	-7000	-20000
Netto	4000	3000	6000	5000	3000	3000
Termofiilimädätys + terminen kuivaus						
Emissiot kg CO ₂ ekv/d	12000	12000	21000	11000	12000	24000
Korvaushyödyt kg CO ₂ ekv/d	-5000	-5000	-19000	-9000	-8000	-24000
Netto	7000	7000	2000	2000	4000	0

10.3.3

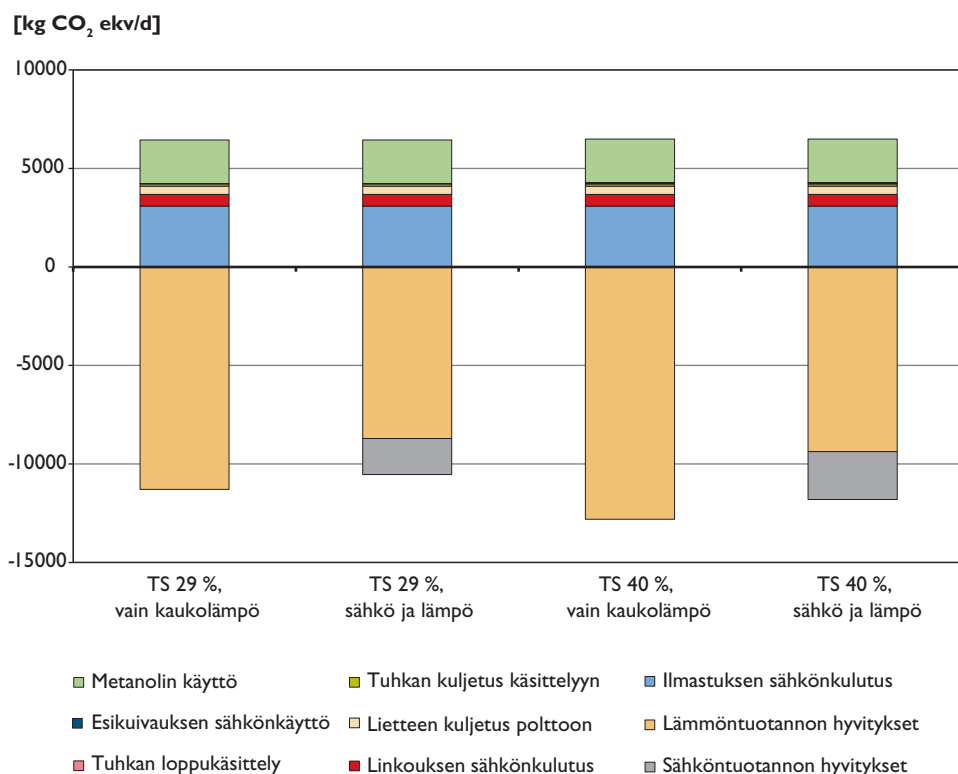
Polton ja mädätyksen vertailu

Lietteen polttoon perustuvat lietteenkäsittelyketjut sisälsivät optiona lietteen esikuivauksen (TS 29 % → 40 %), jossa oletettiin lämmön talteenottoasteeksi 68 % kuivaukseen syötetystä lämpöenergiasta. Kuivausenergia oletettiin saatavan lietteen poltosta. Tuotetun energian hyödyntämiseksi tarkasteltiin kahta eri vaihtoehtoa: joko hyödyntämistä kaukolämpönä tai sähköinä ja kaukolämpönä.

Kaiken kaikkiaan lietteen polton ketjujen lämpötaseet ovat edullisemmat kuin mädätysketjujen. Koska jätteenpolttolaitos on liittynyt kaukolämpöverkoston, tuotettu lämpö voidaan hyödyntää myymällä se kaukolämpöryitykselle. Verrattuna mädätysketjujen khk-taseisiin, polttoketjujen päästösäästöt ovat suuremmat (nettosäästöt 4100 - 6300 kg CO₂ekv/d, kuva 31). Tulosten perusteella lietteen kuiva-ainepitoisuuden nosto ennen polttoa termisesti kuivaamalla on kannattavaa. Esi-kuivatun lietteen poltto tuottaa 12 - 13 % suuremmat päästösäästöt kuin pelkästään linkokuivatun lietteen poltto. Esi-kuivauksen lämmönkulutus ei näin ollen ole taseen

kannalta oleellinen. Sen sijaan lietteen kuiva-ainepitoisuuden nostaminen parantaa sen lämpöarvoa siinä määrin, että energian korvaushyödyt kasvavat merkittävästi. Lietteen polton ketjuissa kuljetuksilla on kokonaisuudessaan hyvin pieni merkitys energiankulutukseen ja khk-päästöihin.

Lietteen poltossa muodostunut tuhka stabiloidaan sementillä ja muilla seosaineilla. Stabiloitu tuhka sijoitetaan kaatopaikalle. Stabilointiprosessin energiankulutus on pääasiassa sähköä, ja muodostaa vain pienen osuuden koko ketjun sähkönkulutuksesta.



Kuva 31. Lietteen polton käsittelyketjujen kasvihuonekaasutaseita. Jätevedenkäsittelyprosessina rinnakkaissaostus.

10.3.4

Kustannukset

Lietteenkäsittelyketjujen kustannuslaskelmat tehtiin jätevedenpuhdistamon näkökulmasta. Kuten taulukosta 17 nähdään, lietteenkäsittelyyn liittyy korkeat kustannukset. Taloudelliselta kannalta katsottuna edullisinta olisi käyttää kaikki tuotettu biokaasu sähköntuotantoon, mikäli laitos saisi ehdotetun biokaasutariffin mukaisen tuen tuotetulle sähkölle. Samoin taulukosta 17 nähdään, että biokaasun syöttötariffin vaikutus lietteenkäsittelyketjujen talouteen on suuri. Työ- ja elinkeinoministeriön ehdotuksen mukaan ennen vuotta 2000 rakennetut mädättämöt jäisivät kuitenkin suunnitellun tariffin soveltamisalan ulkopuolelle.

Tämän tarkastelun perusteella jätevedenpuhdistamolla toteutettava terminen kuivaus olisi taloudellisempi mädätteen käsittelymenetelmä kuin kompostointi. Tämä johtuu etupäässä ostopalveluna hankittavan kompostoinnin korkeasta hinnasta. Terminen kuivauksen tapauksessa kaikki kattilasta tai kaasumoottorista talteen otettava lämpö voidaan hyödyntää mädättämöissä ja termisessä kuivauksessa. Biokaasusta

tuotetun lämmön oletetaan korvaavan kevyttä polttoöljyä termisessä kuivauksessa, minkä vuoksi saavutettavat kustannussäästöt ovat suuret. Kompostoinnin tapauksessa jätevedenpuhdistamo tuottaa ylijäämälämpöä, jolle ei tässä tarkastelussa löydetty mielekästä käyttöä. Näin ollen, mikäli liete kompostoidaan, tulisi biokaasu käyttää ensisijaisesti sähkön tuotantoon.

Biokaasun jalostaminen biometaaniksi ja myyminen kolmannelle osapuolelle ajoneuvokäyttöön tuottaa jätevedenpuhdistamolle lisätuloja (laskelmissa käytettiin biometaanille arvoa 55 €/MWh). Tämän vaihtoehdon taloudellisuutta laskee kuitenkin se, että jätevedenpuhdistamolla tarvittava sähkö ja lämpö on tällöin hankittava ulkopuolelta. Kasvaneita kuluja ei täysin saada korvattua biometaanista saatavilla tuotoilla. (taulukko 17).

Esisaostusprosessissa kemikaalikustannusten on arvioitu olevan noin 29 % korkeammat verrattuna rinnakkaissaostusprosessiin, erityisesti johtuen kasvaneesta typenpoistoprosessin hiilenlähteenä käytettävän metanolin tarpeesta. (FCG 2010) Tämän epäkohdan välttämiseksi ollaan mm. Sveitsissä kehittämässä esisaostukseen perustuvia erikoisprosesseja, jotka tulevat toimeen pienemmässä happipitoisuudessa ja vähemmällä orgaanisen hiilen määrällä. Esisaostusta käytävällä puhdistamolla voitaisiin tällöin saavuttaa positiivinen energiatase, eli jätevedenpuhdistamosta tulee nettoenergiantuottaja ilman ulkopuolisen lietteen tai biojätteen mädätystä (Nyhuis 2011). Tässä tarkastelussa esisaostusprosessin kasvanut kaasuntuotto ei riittänyt kompensoimaan kasvaneita kustannuksia, jotka lisääntyneen kemikaalien käytön ohella johtuivat kasvaneen lietemäärän aiheuttamista lisäkustannuksista mädätyksessä ja muussa lietteen käsittelyssä. Esisaostuksen käyttöönotto ei FCG:n tarkastelun (2010) perusteella vähentäisi ilmastusenergian kulutusta johtuen lähinnä typenpoistoprosessin ilmastutarpeesta, johon esisaostuksella ei voida vaikuttaa. Kokonaisuudessaan esisaostusprosessin käyttöönotto kasvattaisi jätevedenpuhdistamon kustannuksia tulosten perusteella 2 - 20 %, riippuen kaasunkäyttövaihtoehdosta.

Taulukko 17. Yhteenveto kustannuksista ja tuotoista lietteenkäsittelyketjuissa, joissa liete mädätetään mesofilisesti ja jätevedenkäsittelyprosessina on rinnakkaissaostus (Mädätys A) tai esisaostus (Mädätys B).

	Mädätys A			Mädätys B		
	Kaasunkäyttövaihtoehto			Kaasunkäyttövaihtoehto		
	Nykytila	Sähkö + jätelämmön talteenotto	Ajoneuvo- polttoaine	Nykytila	Sähkö + jätelämmön talteenotto	Ajoneuvo- polttoaine
Mesofiilimädätys + kompostointi						
Kustannukset 1000 €/a	-2 900	-2 830	-3 680	-3 450	-3 460	-4 390
Tuotot 1000 €/a	0	0	900	10	70	1 220
Summa 1000 €/a	-2 900	-2 830	-2 780	-3 440	-3 390	-3 170
Mahdolliset lisätuotot biokaasutariffista 1000 €/a	690	840	0	920	1 070	0
Summa 1000 €/a	-2 210	-1 990	-2 780	-2 520	-2 320	-3 170
Mesofiilimädätys + terminen kuivaus						
Kustannukset 1000 €/a	-2 330	-2 320	-3 010	-2 610	-2 600	-3 530
Tuotot 1000 €/a	0	0	1 260	10	70	1 720
Summa 1000 €/a	-2 330	-2 320	-1 750	-2 600	-2 530	-1 810
Mahdolliset lisätuotot biokaasutariffista 1000 €/a	690	840	0	920	1 070	0
Summa 1000 €/a	-1 640	-1 480	-1 750	-1 680	-1 460	-1 810

Kustannuslaskelman perusteella termofiilimädätys voi parantaa jätevedenpuhdistamon taloutta, mikäli saavutettava biokaasun tuoton lisäys on riittävän merkittävä mesofiiliprosessiin verrattuna. Mikäli laskelmaan sisällytetään biokaasulaitosten syöttötariffi, termofiilimädätyksen kannattavuusraja saavutettaisiin kustannuslaskelman perusteella biokaasun saannolla, joka olisi syötettyä VS-kiloa kohti noin 25 % korkeampi kuin mesofiilimädätyksessä. Ilman syöttötariffia meso- ja termofiilimädätysvaihtoehtojen kustannukset ovat samalla tasolla. Vastaavasti mesofiili- ja termofiiliprosessien välillä ei ole suurta eroa, mikäli biokaasu jalostetaan biometaaniksi. Termofiiliprosessissa saavutettava lietteen hygienisointi parantaisi tämän prosessin taloudellisuutta edelleen, sillä on mahdollista, että mädäte voitaisiin käyttää maataloudessa ilman lisäkäsittelyjä. Tämä etu mesofiiliprosessiin nähden toteutuisi, mikäli muodostuvalle lietteelle olisi olemassa kysyntää. Nämä näkökohdat eivät kuitenkaan kuuluneet tämän tarkastelun rajaukseen.

Mikäli liete kuljetetaan poltettavaksi jätteenpolttolaitokselle, jätevedenpuhdistamo ei saa lietteestä tuotetusta energiasta tuloja. Tämän vaihtoehdon kustannuksiksi arvioitiin noin 4,1 miljoonaa €/a. Summa sisältää jätevedenkäsittelyprosessin kustannukset samoin kuin muissakin lietteenkäsittelyketjuissa, linkouksen sähkökulutuksen, kuljetuskustannukset sekä polttolaitoksen oletetun porttimaksun 80 €/t. Tässä laskennassa kustannukset muodostuivat lietteen polttoon perustuvissa ketjuissa tarkastelluista vaihtoehdoista korkeimmiksi.

10.4

Yhteenveto tasetarkasteluista

Tässä tarkastelussa vertailtiin eri lietteenkäsittelyketjujen energia- ja kasvihuonekaasutaseista sekä kustannuksia. Tutkimuksen toteuttamisessa käytettiin tietoa Suomessa toimivilta laitoksilta.

Tarkasteltujen kustannusten osalta suurimmat erät muodostuivat vesiprosessin kemikaalikustannuksista, ostettavien palvelujen ja kuljetusten kustannuksista sekä termisen kuivauksen käyttö- ja investointikustannuksista. Tuottoja saadaan ajoneuvopolttoaineeksi myytävästä biometaanista ja sähköstä, mikäli biokaasutariffi on käytössä.

Ketjuissa, joissa lietteen käsittelymenetelmänä on mädätys, biokaasun hyödyntäminen sähköenergian tuotantoon kaasumoottorissa vaikuttaa kustannustalouden kannalta edullisimmalta biokaasun käyttötavalta, mikäli laitos saisi ehdotetun biokaasutariffin mukaiset lisätulot sähköstä. Sen sijaan kasvihuonekaasutaseiden perusteella parhaan vaihtoehdon nimeäminen ei ole yksiselitteistä.

Energiatalouden kannalta kompostointi olisi edullisin mädätteen käsittelytapa. Kasvihuonekaasutaseiden perusteella terminen kuivaus voi muodostua kompostointia edullisemmaksi, mikäli laitoksella on käytettävissä riittävästi biokaasua termisen kuivauksen lämmöntarpeen tyydyttämiseksi. Kustannustarkastelu osoitti, että jätevedenpuhdistamon yhteydessä (omana työnä) toteutettava terminen kuivaus olisi taloudellisesti kannattavampi mädätteen käsittelymenetelmä. Syynä tähän on lähinnä ostopalveluna toteutetun kompostoinnin korkea porttihinta. Työvoimakustannuksien sisällyttäminen termisen kuivauksen kustannuksiin voisi kuitenkin tasoittaa menetelmien välistä kustannuseroa.

Biokaasun tuotannon tehostaminen siirtymällä mesofiilimädätyksestä termofiiliprosessiin voisi olla jätevedenpuhdistamolle taloudellisesti kannattavaa erityisesti, mikäli laitos saisi tuotetulle sähkölle suunnitellun syöttötariffin mukaiset lisätulot. Biokaasun tuotannon lisäys termofiiliprosessissa verrattuna mesofiiliprosessiin tulisi kuitenkin varmentaa tapauskohtaisesti. Lisähyötyä termofiilimädätyksen eduksi

saataisiin, mikäli termofiilimädätetylle lietteelle löytyisi kysyntää sellaisenaan eikä jälkikäsitteilyä tarvittaisi.

Energiataseisiin perustuen lietteen poltto olisi päästöjen kannalta edullinen lietteen käsittelytapa sillä edellytyksellä, että tuotettu lämpöenergia voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämmityksessä. Tässä tarkastelussa lietteen polton käsittelyketjuissa päästöhyvytykset olivat suuret, sillä tuotetun lämpöenergian oletettiin korvaavan maakaasulla ja kevyellä polttoöljyllä tuotettua kaukolämpöä. Kasvihuonekaasutaseet näissä ketjuissa olivatkin paremmat kuin mädätykseen perustuvissa ketjuissa. Kuitenkin kustannusmielessä poltto on todennäköisesti jätevedenpuhdistamolle kallis lietteenkäsittelymenetelmä.

Tässä tarkastelussa energia- ja kasvihuonekaasutaseiden sekä kustannusten laskenta toteutettiin case-pohjaisesti käyttäen lähtötietoina ensisijaisesti hankkeeseen osallistuneilta laitoksilta saatua dataa. Tämänkaltaiset vertailut ovat aina tapauskohtaisia ja riippuvat tarkasteltujen laitosten toimintaparametreista, tehdyistä lähtöoletuksista sekä yleisemmästä toimintaympäristöstä. Oleellisia tulokseen vaikuttavia tekijöitä ovat kasvihuonekaasutaseiden osalta oletus siitä, millä polttoaineilla tuotettua energiaa lieteperäinen energia korvaa sekä sähköntuotannon päästökertoimien valinta. Lopputuotteille lasketut korvaushyödyt voisivat oleellisesti parantaa taseita mädätykseen perustuvien ketjujen osalta. Kustannusten osalta paikallinen energian hintataso sekä erityisesti mahdolliset uusiutuvalla energialle myönnettävät tuet vaikuttavat eri lietteenkäsittelyvaihtoehtojen taloudellisuuteen. Näin ollen tuloksia tarkasteltaessa ja hyödynnettäessä on syytä huomioida niiden paikallinen sidonnaisuus.

10.5

Lietteenkäsittelyn liiketoiminta

Jo pelkästään Euroopan jäsenmaissa syntyy vuosittain yli 10 miljoona tonnia (TS) yhdyskuntalietettä, jonka asianmukainen käsittely on arvioitu vaativan mittavia investointeja; EU:n jätevesidirektiivin implementoinnin on arvioitu vaativan 35 miljardin investoinnit 12 uudessa EU:n maassa (Milieu 2010). Yhdyskuntalietteen käsittely on katsottu potentiaalisesti liiketoiminta-alueeksi, josta tehostettu energiatehokkuus ja uusiutuvan energian tuotanto muodostavat kiinnostavia lisäarvomahdollisuuksia. Yhdyskuntalietteen käsittely on katsottu potentiaalisesti liiketoiminta-alueeksi, josta tehostettu energiatehokkuus ja uusiutuvan energian tuotanto muodostavat kiinnostavia lisäarvomahdollisuuksia.

Hankkeessa oli tavoitteena laatia liiketoimintasuunnitelma lietteenkäsittelyn energiatehokkuuteen liittyvien tulosten ja innovaatioiden liiketoimintapotentiaalnin arvioimiseksi. Työ toteutettiin kahdella Haaga-Helian Ammattikorkeakoulun opinäytetyöllä (ks. kappale 3.3).

Ensimmäisessä työssä (Oskari Kosola 2010) tavoitteena oli selvittää, mitä osaamista jätevesilieteteknologian alalla toimivilla yrityksillä ja laitoksilla on ja missä määrin osaamista voidaan konseptoida tuotteiksi ja palveluiksi. Tutkimuksen avulla haluttiin myös selvittää palveluiden ja tuotteiden vientipotentiaalia ja kilpailutilanteen lähtökohtia suomalaisten toimijoiden näkökulmasta. Tutkimus tehtiin haastatteleamalla kolmea hankkeessa mukana olevaa jätevesilieteteknologian alalla toimivan organisaation edustajaa.

Tutkimustuloksista selvisi, että alan osaamista voidaan parhaiten hyödyntää konsultointiliiketoiminnassa. Maatalouden tarpeisiin soveltuvien tuotteiden kehittäminen haasteelliseksi, mutta myös mahdollisuudeksi. Lainsäädännön koettiin olevan rajoittava tekijä liiketoiminnan pitkäjänteisessä suunnittelussa. Palvelujen mukaan soveltuvuus vientituotteeksi ei ole selvä, sillä lietteenkäsittelyyn vaikuttavia tekijöitä on runsaasti, eikä kotimaassakaan ole varmuutta uusien teknologioiden kannattavuutta.

desta. Jätevesilietteiden käsittely on pakollinen velvollisuus, mistä saattaa aiheutua hankkeiden kannattavuuden arvioinnin jääminen toissijaiseksi. Kun jätevesilietteen liiketoimintaa suunnitellaan entistä selkeämmin alun perin liiketaloudellisista näkökohdista, olisi tehokkaampien jätevesilietteen käsittelyratkaisujen toteutettavuus parempaa.

Jatkoselvityksessä (Viktoria Näppi 2011) haastateltiin sekä suomalaisia yrityksiä että kansainvälisiä toimijoita tulevaisuuden lietteenkäsittelyn haasteista. Suomen lisäksi kohdemaina olivat Viro, Unkari ja Puola. Kysely keskittyi tutkimus- ja kehitystarpeisiin (T&K), palvelujen ulkoistamiskäytäntöihin ja energiatehokkuuden merkitykseen prosessikehityksessä.

Kyselyn mukaan parempi energiatehokkuus kuuluu yleisesti puhdistamoiden ensisijaisiin T&K:n tavoitteisiin. Jatkuvasti nouseva sähkön hinta toimii myös vahvana ajurina. Useassa Euroopan maassa lietteenkäsittelyn markkinat hallitsevat etabloituneet lietteenkäsittely-yritykset, jolloin uusien tulokkaiden tulo Euroopan markkinoille on haastava.

Tällä hetkellä useimmat suomalaiset lietteenkäsittely-yritykset ovat melko pieniä ja hajaantuneita kansainvälisillä markkinoilla. Tärkeätä on vahvistaa läsnäoloaan kansallisilla markkinoilla, unohtamatta että markkinapotentiaalia kuitenkin on täsmätuotteille tai -palveluille, joita voidaan tarjota kansainvälisille lietteenkäsittelyn organisaatioille. Tällaiset palvelut ovat räätälöidyt T&K -palvelut joiden avulla kansainväliset teknologiatoimittajat voivat päivittää tietotasonsa ja tekniikkansa tietyn prosessiosan osalta. Tietoa ja osaamista tarvitaan erityisesti raakalietteen energiahyödyntämisen sekä ravinteiden talteenoton sektoreilla.

11 Johtopäätökset ja jatkotutkimustarpeet

TERMOS-projektin yhtenä päätavoitteena oli tutkia mesofiilisen prosessin muutosta termofiiliseksi sekä vertailla mesofiilisen ja termofiilisen prosessin kuormitettavuuse-roja pilot-mittakaavan kokeiden avulla. Tehtyjen kokeiden perusteella voidaan tode-ta, että mesofiilisellä lämpötila-alueella toimiva mädätysprosessi voidaan sujuvasti ja nopeasti muuttaa termofiiliseksi ilman että ongelmatilanteita pääsee syntymään. Vaikka kaasuntuotto ja laatu heikkenivät väliaikaisesti lämpötilan nostamisen yhteydessä, prosessiolosuhteet pysyivät stabiileina eikä esimerkiksi kokonaisalkaliteetin ja VFA-alkaliteetin suhde kohonnut liian korkeaksi. Kokeissa ei myöskään havaittu muita käytännön ongelmia kuten vaahtoamista.

Saatujen tulosten perusteella voidaan myös todeta, että termofiilisellä prosessilla on monia etuja verrattuna mesofiiliseen. Termofiilisen prosessin edullisuus riippuu kuitenkin viipymästä ja kuormituksesta sekä mahdollisista esikäsittelyistä. Enim-millään termofiilisen prosessin tuottama absoluuttinen kaasumäärä on ollut melkein 1,5-kertainen verrattuna mesofiiliseen (suurimmalla viipymällä, ilman esifermentaatiota). Pienemmällä viipymällä termofiilisen prosessin etu tosin pieneni tai hävisi kokonaan. Kun käytettiin esifermentaatiota, ei termofiilisen ja mesofiilisen prosessin kaasuntuotossa ollut eroja. Lietteen esifermentaatio ja termofiilinen prosessi ovat siten vaihtoehtoisia tapoja parantaa mesofiilimädätyksen kaasuntuottoa. Termofiilisessa prosessissa orgaanisten aineiden hajoaminen oli kuitenkin jatkuvasti tehokkaampaa kuin mesofiilisessa. Termofiilisen prosessin todettiin myös hygienisoivan lietettä vii-pymän ollessa tarpeeksi pitkä, mitä ei saavutettu mesofiilisellä prosessilla. Toisaalta termofiilisesti mädätetyn lietteen kuivattavuus on huonompi kuin mesofiilisessa mädätyksessä, ja rejektivesi on paljon huonolaatuisempaa.

Tutkimusten aikana selvisi myös, että prosessit toimivat yllättävän hyvin lyhyellä-kin viipymällä. Reaktorit eivät menneet "hapoille" edes kuormitusvaiheessa, jolloin viipymä oli vain noin 11 päivää eikä edes ylimääräisessä ylikuormitusvaiheessa. Näin ollen prosessin varsinaista sietokyvyn ylärajaa ei saatu selvitettyä.

Toisen koejakson aikana käytetty autoflotaatio-ilmioon perustuva esifermentaatio ja - sakeutus on hyvin mielenkiintoinen jatkotutkimuskohde. Monet esikäsittelymene-telmät parantavat merkittävästi lietteen kaasuntuottopotentiaalia, mutta ne vaativat yleensä laitehankintoja ja kuluttavat energiaa. Autoflotaatio pystyttiin sen sijaan toteuttamaan pelkästään seisottamalla lietettä syöttösäiliöissä. Jos tämä osoittautuisi muissakin yhteyksissä toimivaksi esikäsittelymenetelmäksi, siitä voisi saada taloudel-lisia etuja, kun kaasuntuottoa saadaan kasvatettua ilman lisääntyneitä käyttökuluja.

Metaanipitoisuuden kasvattamista pumppaustekniikoilla voisi hyvin kehittää Suo-menojan hyvin automatisoiduilla koereaktoreilla. Siloksaanien ja rikkiyhdisteiden poistamistekniikoita erillisillä menetelmillä ja prosessiteknisesti olisi syytä selvittää, jotta biokaasun hyötykäyttö saataisiin lisättyä Suomessa.

TERMOS-hankkeen toinen päätavoite oli lietteenkäsittelyketjujen kestävyuden arviointi. Käsittelyketjut määriteltiin niin, että mukana olivat olennaiset lietteen-käsittelyn vaiheet sekä jätevedenkäsittelyprosessi. Ketjujen määrittely ja laskenta-

parametrien valinta pyrittiin tekemään niin, että ne vastaisivat mahdollisimman pitkälle suomalaisia toimintaolosuhteita. Laskenta suoritettiin case-pohjaisesti. Näin muodostettiin näkemys eri käsittelyketjuvaihtoehtojen kestävydestä energia- ja kasvihuonekaasutaseiden sekä kustannusten kannalta.

Yhdyskuntien jätevesilietteistä voidaan tuottaa energiaa mädättämällä tai polttamalla. Kasvihuonekaasutaseisiin keskeisiä vaikuttavia tekijöitä ovat tuotetun energian hyödyntämisaste sekä se, minkä polttoaineiden käyttöä lieteperäisellä energialla voidaan välttää. Myös vesiprosessin ja kompostoinnin haihduntapäästöt olivat laskennan perusteella merkittäviä, mutta laskentakertoimiin liittyy melko suurta epävarmuutta. Jäteveden ja lietteen käsittelyprosesseiden muodostamien haihduntapäästöjen tarkempaa määrittämistä varten tulisikin suorittaa mittauksia, jotta erityisesti suomalaisissa olosuhteissa tapahtuvia päästöjä voitaisiin arvioida myös systeemitasolla tarkemmin. Oleellista olisi myös selvittää kokeellisesti, mikä on mädätysketjuissa tuotettujen lopputuotteiden (komposti, termisesti kuivattu mädäte; termofiilimädätetty liete) vaikutus maa- tai metsätalousmaan ravinne- ja hiilitalouden, jotta voitaisiin riittävän luotettavalla tavalla määrittää lopputuotteilla saavutettavia korvaushyötyjä. Mädätteelle tai kompostille tulisi tällöin olla markkinoilla myös aitoa kysyntää, jotta ravinteet saataisiin hyötykäyttöön.

Lietteenkäsittelyketjujen kasvihuonetaseet ja kustannustalous eivät kaikissa tapauksissa kulkeneet käsi kädessä. Yleisesti voidaan todeta, että kaikki tarkastelussa saadut tulokset ovat tapauskohtaisia ja riippuvaisia paikallisista olosuhteista. Taseiden suuruuteen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi, millä polttoaineilla tuotettua energiaa lietteestä tuotetulla energialla korvataan ja kuinka suuret ovat eri lietteenkäsittelyprosesseiden kustannukset. Tässä tarkastelussa mädätysketjujen lopputuotteille ei laskettu kasvihuonekaasujen korvaushyötyjä. Mikäli tällaisia hyötyjä voitaisiin perustellusti sisällyttää laskentaan, voisivat mädätysketjut muodostua khk-taseiden valossa huomattavasti edullisemmiksi.

Tärkeimmät tutkimustuloksista johdetut johtopäätökset termofiilisen prosessin eroavaisuuksista verrattuna mesofiiliseen on vedetty yhteen taulukossa 18.

Taulukko 18. Termofiilisen prosessin eroavaisuudet verrattuna mesofiiliseen prosessiin saatujen tulosten perusteella.

Ominaisuus	Termofiilinen prosessi verrattuna mesofiiliseen
Kuormitettavuus (prosessin sietokyky)	Ei eroa; molemmat prosessit kestivät suuriakin kuormitustasoja menemättä häiriötilaan (viipymä lyhyimmillään 9 päivää, suurin mitattu orgaaninen kuorma 5,7 kgVS/m ³ d). Kirjallisuuden mukaan termofiilisen prosessin nopeammat reaktiot vaativat tarkemman ohjauksen (esim. VFA/kok. alk.-seuranta).
Kaasun laatu	Metaanipitoisuus oli molemmissa stabiili, pysyvästi tasolla 66 % ilman esifermentaatiota ja 68 % esifermentaatiolla.
	Rikkivety- ja siloksaanipitoisuudet olivat suuremmat termofiiliprosessissa. Rikkivedyn pitoisuus puhdistamolietteestä tuotetussa biokaasussa oli kokonaisuudessaan matala.
	Vedyn pitoisuus oli suurempi termofiiliprosessissa. Pitoisuus oli kuitenkin niin matala, ettei sillä ole energiatalouden osalta merkitystä.
Kaasun määrä	Kaasuntuotto termofiiliprosessissa oli merkittävästi suurempi (keskimäärin 1,3-kertainen ja enimmillään päiväkohtaisesti jopa kaksinkertainen verrattuna mesofiiliseen) ilman esifermentointia. Esifermentoidulla lietteellä molempien prosessien yksikkökaasuntuotot moninkertaiset, mutta termofiiliprosessin tuotto ei ollut enää suurempi (mesofiilinen prosessi tuotti keskimäärin 1,2 kertaa enemmän kaasua).
Liete ja prosessiolosuhteet	Lietteen pH-arvo ja kokonaisalkaliteetti nousivat hieman siirryttäessä mesofiilisesta lämpötilasta termofiiliseen, ja molemmilla prosesseilla ne kohosivat edelleen kun lietettä esifermentoitiin (keskimäärin pH tasolla 7 - 8, alkaliteetti 60 - 95 mmol/l). VFA/kok. alk. -suhde molemmissa prosesseissa alhainen, <0,10 (paitsi muutostilassa, jolloin korkeimmillaan 0,38).
	Riittävällä viipymällä (min. 15 päivää) liete hygienisoitui termofiiliprosessissa ja kelpaisi sellaisenaan lannoitevalmisteeksi.
	Materiaalien korroosiossa ei havaittu merkittävää eroa mesofiilisen ja termofiilisen prosessin välillä.
	Termofiililietteen hajupitoisuudet olivat mesofiililietettä moninkertaisesti suurempia.
Ympäristövaikutukset	Termofiiliprosessi tuotti huonompilaatuista rejektivettä (jätevesilaitoksen puhdistustulos heikkenee, typpihäviö). Termofiilisen rejektiveden COD-arvo oli keskimäärin 3,4-kertainen ja ammoniumtyppipitoisuus 1,3-kertainen verrattuna mesofiiliseen.
	Termofiiliprosessin kasvihuonekaasutase on parempi, edellyttäen, että biokaasun tuotanto on merkittävästi suurempi kuin mesofiiliprosessissa.
Talous ja energia	Termofiiliprosessin taloudellinen kannattavuus riippuu käytännössä saavutetusta biokaasutuoton lisäyksestä, syöttötariffista, korvattavan energian hinnasta, tuotetun lämmönhyödynnettävyydestä, ja mädätteen loppukäsittelyn kustannuksista.
	Kysyntä mädätetylle lietteelle lannoitevalmisteena vaikuttaa taloudelliseen kannattavuuteen. Ellei kysyntä mädätetylle lietteelle sellaisenaan parane nykyisestä, termofiilisessä prosessissa tapahtuvasta hygienisoinnista ei ole hyötyä.

LÄHTEET

- Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J. & Dewil, R. 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science* 12 34(6): 755-781.
- Arnold, M. 2009. Reduction and monitoring of biogas trace compounds. VTT Tiedotteita - research notes 2496. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2496.pdf>.
- Bousková, A., Dohányos, M., Schmidt, J. E. & Angelidaki, J. 2005. Strategies for changing temperature from mesophilic to thermophilic conditions in anaerobic CSTR reactors treating sewage sludge. *Water Research* 39: 1481-1488.
- Climent, M., Ferrer, I., Baeza, M. d. M., Artola, A., Vázquez, F. i. & Font, X. 2007. Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions. *Chemical Engineering Journal*(133): 335-342.
- De Baere, L. 2000. Anaerobic digestion of solid waste: state-of-the-art. *Water Science and Technology* 41(3): 283-290.
- de la Rubia, M. A., Romero, L. I., Sales, D. & Perez, M. 2005. Temperature conversion (mesophilic to thermophilic) of municipal sludge digestion. *American institute of chemical engineers* 51(9): DOI 10.1002/aic.10546.
- Dohányos, M. & Zábranská, J. 2001. Anaerobic digestion. Julk.: Spinosa, L. & Vesilind, A. (toim.). *Sludge into biosolids. Processing, disposal and utilization*. London, UK, S. 223-241.
- Ekokem. 2009. Jätteen energiakäytön laajennuksen ympäristövaikutusten arviointiselostus. Riihimäki, Ramboll Finland Oy 3.7.2009. 112 s.
- Energiamarkkinavirasto. 2010. Maakaasun kokonaishinnan kehitys 2/2010 saakka. Tyypikäyttäjät T2. <http://www.energiamarkkinavirasto.fi/data.asp?articleid=1842&pgid=188>.
- Energiateollisuus. 2010. Sähkötuoannon polttoaineet ja CO₂-päästöt 20.7.2010.
- Energiateollisuus ry. 2010. Energiavuosi 2009, lehdistötiedote.
- EnerNet Network for sustainable use of energy in water and wastewater systems. Sludge pretreatment. Engineering and Physical Sciences Research Council, UK. http://www.energy-network.net/resource_center/launch_documents/sludge_pretreatment.php.
- FCG. 2010. Energiatarkastus lietteen käsittely - TERMOS. Esisaostuksen vaikutus lietteen syntyyn ja jätevedenpuhdistuksen energia- ja kemikaalikulutukseen. Projektin sisäinen julkaisematon raportti 1045-D3369.
- Ferrer, I., Ponsáb, S., Vázquez, F. & Font, X. 2008. Increasing biogas production by thermal (70 °C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion. *Biochemical Engineering Journal* 42: 186-192.
- Fortum. 2010. Kaukolämpöhinnasto Espoo, Kauniainen ja Kirkkonummi 1.1.2010 alkaen.
- Fred, T., HSY Vesi. 2010. Henkilökohtainen tiedonanto 6.4.2010.
- Garber, W. 1982. Operating experience with thermophilic anaerobic digestion. *Journal of Water Pollution Control*(54): 1170-1175.
- Gasum. 2011. Tankkausasemaverkosto laajenee edelleen. <http://www.gasum.fi/liikenne/tankkausasemat/Sivut/default.aspx>.
- GEA Barr-Rosin. 2010. Superheated Steam Drying. Data sheet.
- Hanjie, Z. 2010. Sludge Treatment to Increase Biogas Production. Stockholm, Royal Institute of Technology (KTH) 24 s.
- HSY. 2010. Pääkaupunkiseudun ilmastoraportti. Päästöjen kehitys 2009.
- HSY Vesi. 2010. Suomenojan jätevedenpuhdistamo. <http://www.hsy.fi/vesi/palvelut/jatevesi/puhdistamot/suomenoja/Sivut/default.aspx> [Luettu 16.3.2011].
- IPCC. 2007. Climate Change 2007 Working Group I Report "The Physical Science Basis". Geneve, Sveitsi, 940 s.
- Iranpour, R., Oh, S., Cox, H. H. J., Shao, Y. J., Moghaddam, O., Kearney, R. J., Deshusses, M. A., Stenström, M. K. & Ahring, B. K. 2002. Changing mesophilic wastewater sludge digestion into thermophilic operation at Terminal Island Treatment Plant. *Water environment research* 74(5): 494-507.
- Iranpour, R., Oh, S., Kim, H., Eldridge, M., Marashi, C., Shao, Y., Wilson, T., Stenström, M. K. & Ahring, B. K. 2001. Startup and stabilization of thermophilic digestion at Terminal Island treatment plant. *Biosolids 2001: Building public support, Proceedings of WEF/AWWA/CWEA Joint residuals and biosolids conference [CD-ROM] San Diego, California*.
- Karakashev D., Kotay S.M., Trably E. & Angelidaki I. 2009. a strict anaerobic extreme thermophilic hydrogen-producing culture enriched from digested household waste. *Journal of Applied Microbiology*(106): 1041-1049.
- Kiisto, K. & Fred, T. 2007. Jätevesilietteen mädätyksen tehostaminen. *Vesitalous*(1): 10-13.
- Kuittinen, V., Huttunen, M. & Leinonen, S. 2010. Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 13. Tiedot vuodelta 2009. University of Eastern Finland, Faculty of Science and Forestry, Department of Biology, Joensuu. Publications of the University of Eastern Finland. Reports and Studies in Forestry and Natural Sciences No 3. <http://www.biokaasuyhdistys.net/images/stories/pdf/biokaasulaitosrekisteri13.pdf>.
- Lahtinen, H., Vapo Oy. 2010. Henkilökohtainen tiedonanto 5.2.2010.
- Lappalainen, M., Sarlin Oy Ab. 2010. Henkilökohtainen tiedonanto 14.5.2010.
- Latvala, M. 2005. Jätevesilietteen anaerobin käsittely ja biokaasun hyötykäyttö. Tampere, http://www.motiva.fi/files/492/jatevesilietteen_anaerobin_kasittely_ja_biokaasun_hyotykaytto.pdf.
- Latvala, M. 2009. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT): Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Helsinki, Edita Prima Oy. 114 s.

- Laurikko, J., VTT. 2010. Henkilökohtainen tiedonanto 15.2.2010.
- Maa- ja metsätalousministeriö. 2007. Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 12/07. Antopäivä: 13.02.2007. Dnro 656/01/2007.
- Maa- ja metsätalousministeriö. 2008. Yhdyskuntien ja haja-asutuksen jätevesilietteiden, eloperäisten jätteiden ja lannan hyötykäyttö. Pöyry Environment Oy.
- Manninen, J., Ekokem Oy. 2009. Henkilökohtainen tiedonanto 9.12.2009.
- Methanex. 2006. Technical Information & Safe Handling Guide for Methanol. Version 3.0. Syyskuu 2006. http://www.methanex.com/products/documents/TISH_english.pdf.
- Milieu. 2010. Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land. Final Report. Part I: Overview Report. Report prepared for the European Commission, DG Environment DG ENV.G.4/ETU/2008/0076r.
- Myllymaa, T., Moliis, K., Tohka, A., Rantanen, P., Ollikainen, M. & Dahlbo, H. 2008. Jätteiden kierrätyksen ja polton käsittelyketjujen ympäristökuormitus ja kustannukset. inventaarioraportti. Suomen Ympäristökeskuksen raportteja 28/2008
- Mäkinen, T., Soimakallio, S., Paappanen, T., Pahkala, K. & H., M. 2006. Liikenteen biopolttoainien ja peltoenergian kasvihuonekaasutaset ja uudet liiketoimintakonseptit. VTT TIEDOTTEITA 2357. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2006/T2357.pdf>.
- Nurmi, V., Ekokem Oy. 2010 Henkilökohtaiset tiedonannot 20.1.-12.2.2010
- Nyhuis, G. 2011. suullinen tiedonanto 13.4.2011, cyklar-stulzin DEMON®-prosessin jatkokehityshanke Glarnerlandin jätevedenpuhdistamolla.
- Pan, J. R., Huang, C., Cherng, M., Li, K.-C. & Lin, C.-F. 2003. Correlation between dewatering index and dewatering performance of three mechanical dewatering devices. *Advances in Environmental Research* 7(3): 599-602.
- Pérez-Elvira, S. I., Fernández-Polanco, F., Fernández-Polanco, M., Rodríguez, P. & Rouge, P. 2008. Hydrothermal multivariable approach. Full-scale feasibility study. *Electronic Journal of Biotechnology* 11(4).
- Persson, M. 2003. Evaluation of upgrading techniques for biogas. Svenskt Gastekniskt Center Ab. <http://www.sgc.se/dokument/Evaluation.pdf>.
- Rulkens, W. 2008. Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options. *Energy & Fuels*(22): 9-15.
- Salado, R., Vencovsky, D., Daly, E., Zamparutti, T. & Palfrey, R. 2010. Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land. Final Report Part II: Reports on Options and Impacts. Risk & Policy Analysts Ltd (RPA), Milieu Ltd and WRC for the European Commission, DG Environment http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/part_ii_report.pdf.
- Schafer, P. L., Farrell, J. B., Newman, G. & Vandenburgh, S. 2002. Advanced Anaerobic Digestion Performance Comparisons. Brown and Caldwell. 17 s.
- Sitra. 2007. Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukyky -selvitys. <http://www.sitra.fi/NR/rdonlyres/BFCEC181-4AD7-4B1A-B7B6-27045F8280FC/0/Lietteenk%C3%A4sittely.pdf>.
- Soimakallio, S., Hongisto, M., Koponen, K., Sokka, L., Manninen, K., Antikainen, R., Pasanen, K., Sinkko, T. & Thun, R. 2010. EU:n uusiutuvien energialähteiden edistämisdirektiivin kestävyyskriteeristö. Näkemyksiä määritelmästä ja kestävyuden todentamisesta. VTT Working papers 150
- Sorensen, J., Tholstrup, G. & Andreasen, K. 1999. Anaerobic digestion and thermal hydrolysis to reduce production of sludge in WWTPs. *Vatten* 55(1): 45-51.
- Starberg, K., Karlsson, B., Larsson, J. E., Moraeus, P. & Lindberg, A. 2005. Problem och lösningar vid processoptimering av röt-kammardriften vid avloppsreningsverk. Svenskt Vatten AB. Svenskt Vatten Utveckling (SVU) / VA-forsk 2005-10. 47 s.
- Stasta, P., Boran, J., Bebar, L., Stehlik, P. & Oral, J. 2006. Thermo Thermal processing of sewage sludge. *Applied Thermal Engineering*(26): 1420-1426.
- Sundberg, J., HSY Vesi. 2009. Henkilökohtaiset tiedonannot liittyen Suomenojan puhdistamon käyttötietoihin 8.12.2009-26.3.2010.
- Sundell, L., HSY Vesi. 2010. Henkilökohtaiset tiedonannot 8.6 ja 18.6.2010.
- Syöttötariffityöryhmä. 2009. Syöttötariffityöryhmän loppuraportti. Ehdotus tuulivoimalla ja biokaasulla tuotetun sähkön syöttötariffiksi. Työ- ja elinkeinoministeriö. http://www.tem.fi/files/24645/Sy_tt_tariffity_ryhm_n_loppuraportti_29-09-09.pdf.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L. & Stensel, H. D. 2003. Wastewater engineering: treatment and reuse. 4th ed. Boston McGraw-Hill. 1819 s.
- Tilastokeskus. 2009. Energiatilastot 2008. Sähkön tuotannon ominaishiilidioksidipäästöt eräissä Euroopan maissa.
- Tilastokeskus. 2010a. Greenhouse gas emissions in Finland 1990-2008. National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol. 25.5.2010. http://www.stat.fi/tup/khkinv/fin_nir_20100525.pdf.
- Tilastokeskus. 2010b. Polttoaineluokitus ja päästökertoimet 2010.
- Tukiainen, T. 2009. Vesihuoltolaitosten kasvihuonekaasupäästöt Suomessa. DI-työ. Teknillinen korkeakoulu, Insinööri-tieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta. <http://civil.tkk.fi/fi/tutkimus/vesihuolto-tekniikka/opinnaytteet/tukiainen2009.pdf>.
- Turun jätteenpolttoliikelaitoksen johtokunta. 2009. Turun kaupungin vuoden 2010 talousarvio ja vuosien 2010-2012 taloussuunnitelma. Turun kaupunki. <http://www.turku.fi/public/download.aspx?ID=99473&GUID={DFFF272D-2252-4087-B2B3-B14DC7DC5710}>.

- Työ- ja elinkeinoministeriö. 2011. Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta 30.12.2010/1396.
- Vesilind, A. P. & Rooke, R. L. 2003. Wastewater Treatment Plant Design Water Environment Federation, USA 470 s.
- VTT. 2010. LIPASTO 2009. Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä. <http://lipasto.vtt.fi/index.htm>
- Zábranská, J., Dohányos, M., Jeníček, P., Zaplatílková, P. & J., K. 2002. The contribution of thermophilic anaerobic digestion to the stable operation of wastewater sludge treatment. *Water Science and Technology* 46(45): 447-453.
- Zupancic, G. D. & Ros, M. 2003. Heat and energy requirements in thermophilic anaerobic sludge digestion. *Renewable Energy* 28: 2255-2267.
- Öljy- ja kaasualan keskusliitto, Ajankohtaistiedote 24.3.2010. 2010. Kevyen polttoöljyn vuoden keskimääräinen kuluttajahinta sisältäen polttoaineveron (perusvero + lisävero + huoltovarmuusmaksu = 8,7 c/l). http://www.oil-gas.fi/files/728_Kuluttajahintaseuranta.pdf.

Liite I. Betonikoemateriaalikappaleiden valmistus

Valmistettaville betonitangoille oli annettu seuraavat tavoitteelliset lähtöarvot:

- lujuustaso K-35 (standardipuristuslujuus 35 MPa)
- sulfaatinkestävä sementti (SR)
- halkaisija 35 - 39 mm
- pituus 500 - 600 mm

Mittavaatimusten täyttämiseksi tangot valmistettiin käyttäen muotteina PVC-muovista viemäriputkea. Käytetyn putken ulkohalkaisija oli 40 mm ja seinämävahvuus 1,9 mm, joten sisähalkaisijaksi ja siten valettavien tankojen halkaisijaksi muodostui 36,2 mm. Putkesta katkaistiin valumuoteiksi paloja, joiden pituus oli 600 mm, ja niiden toiset päät teipattiin umpeen. Muottipalat myös halkaistiin pituussuunnassa ja teipattiin sitten takaisin alkuperäiseen muotoonsa. Tällä haluttiin varmistaa se, että valetut betonitangot olivat poistettavissa muoteista kovettumisen jälkeen.

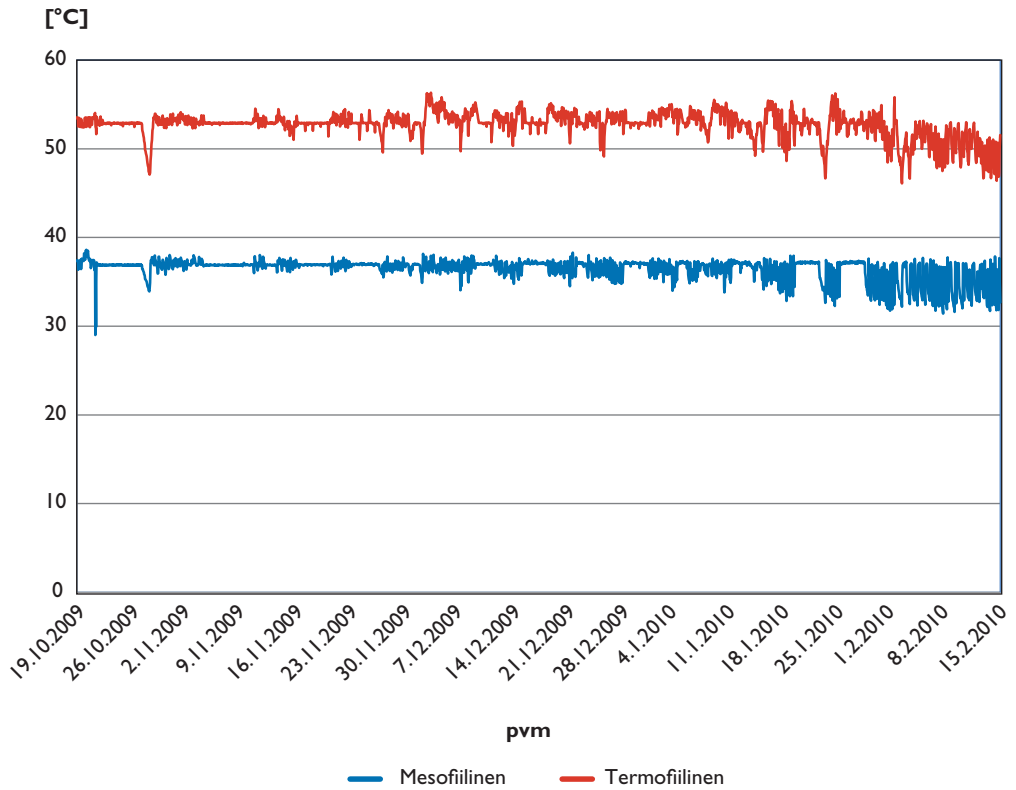
Betonitangot valmistettiin massasta, jonka resepti oli seuraavanlainen:

Ainesosa	% kuiva-aineesta
sementti (SR, Finnsementti Oy)	16,4
filleri	8,2
kivi 0,1 - 0,6 mm	8,2
kivi 0,5 - 1,2 mm	9,1
kivi 1,0 - 2,0 mm	10,0
kivi 2,0 - 3,0 mm	11,8
kivi 3,0 - 5,0 mm	3,6
kivi 5,0 - 10,0 mm	32,7
	100,0
vesi/sementti – suhde (w/c)	0,5
notkistin (Glenium), % sementistä	0,67

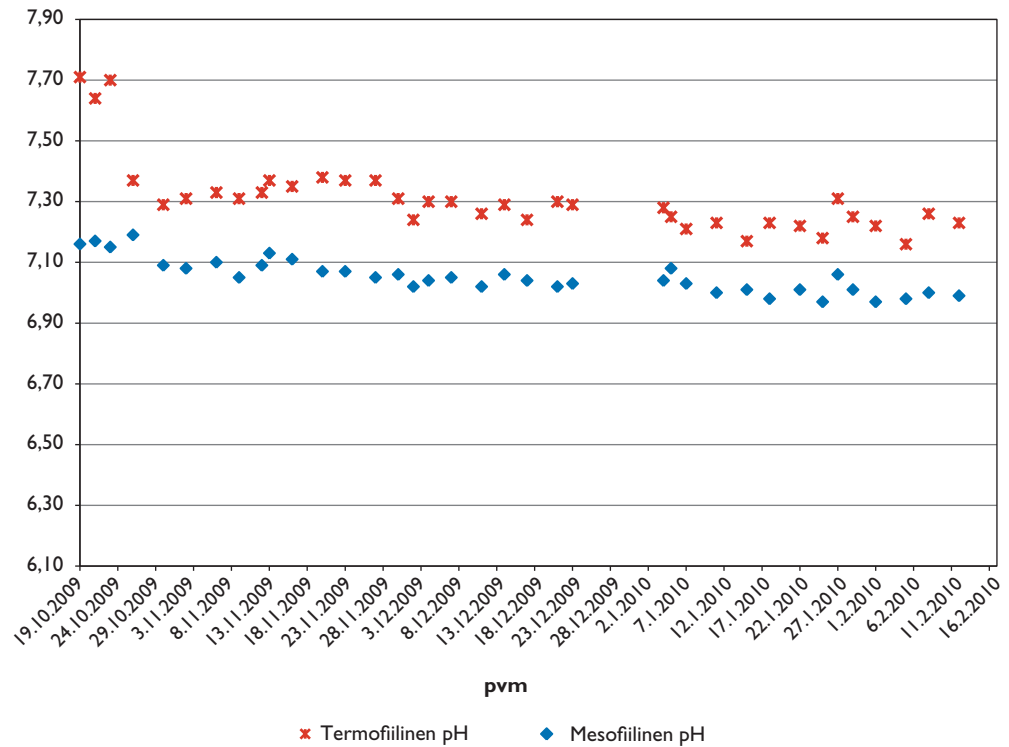
Betonitangot valettiin maanantaina 27.4.2009. Tankoja tehtiin yhteensä 8 kappaletta. Valetut kappaleet vietiin kosteushuoneeseen, jonka lämpötila oli 20 ± 2 °C ja suhteellinen kosteus 100 % RH. Tangot saivat kovettua kosteushuoneessa muoteissaan 28 d ajan. Muotit purettiin maanantaina 25.5.2009, ja tangot katkaistiin sahamalla 550 mm:n mittaisiksi. Tämän jälkeen niitä säilytettiin 3 d ajan ”tavanomaisissa huoneolosuhteissa”, ts. tilassa, jonka lämpötila oli 20 °C ja suhteellinen kosteus 50 % RH. Lopuksi puolet tangoista, 4 kappaletta, pinnoitettiin Icosit K 24 dick – epoksi-pinnoitteella. Pinnoitus tehtiin kahteen kertaan.

Tangot toimitettiin mädätysreaktorikokeen valmistelijoille maanantaina 1.6.2009.

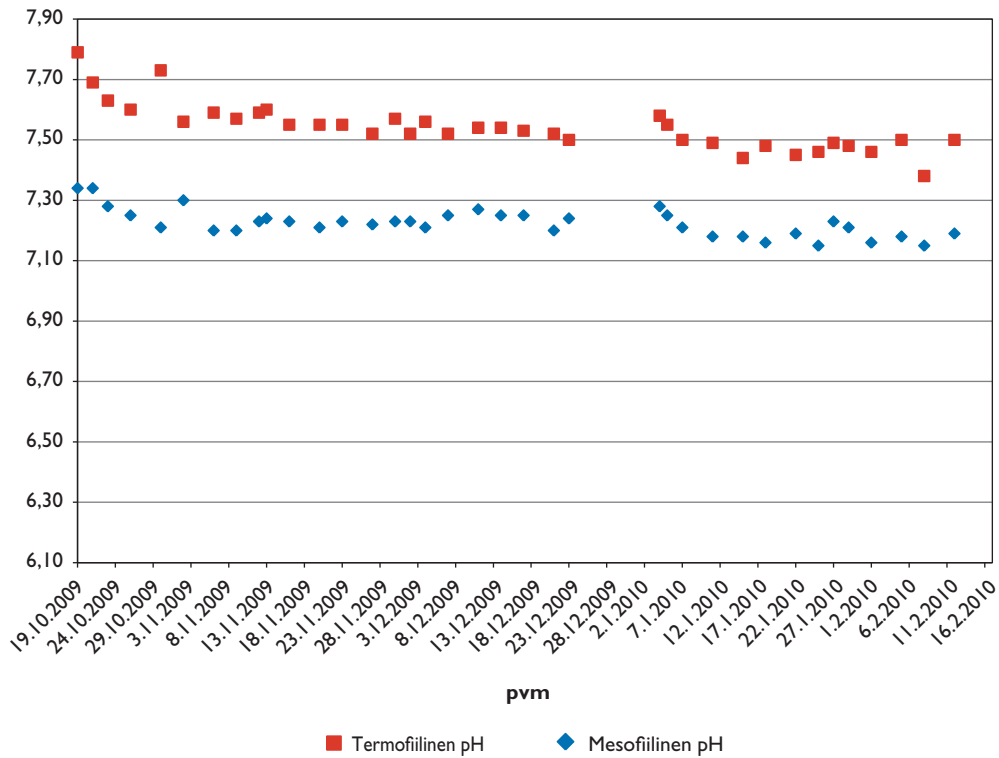
Liite 2. Kuvaajat reaktoreiden olosuhteista ensimmäisen kuormitusjakson aikana



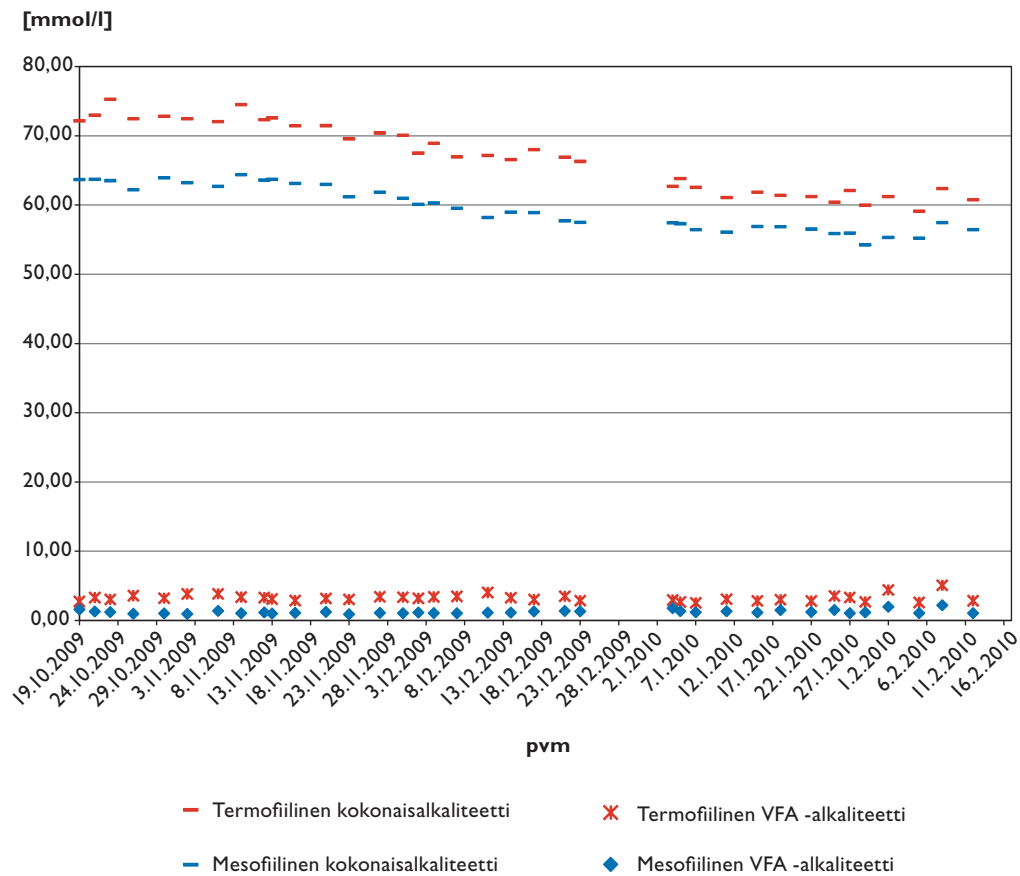
Kuva 32. Lämpötila reaktoreissa ensimmäisen kuormitusjakson aikana.



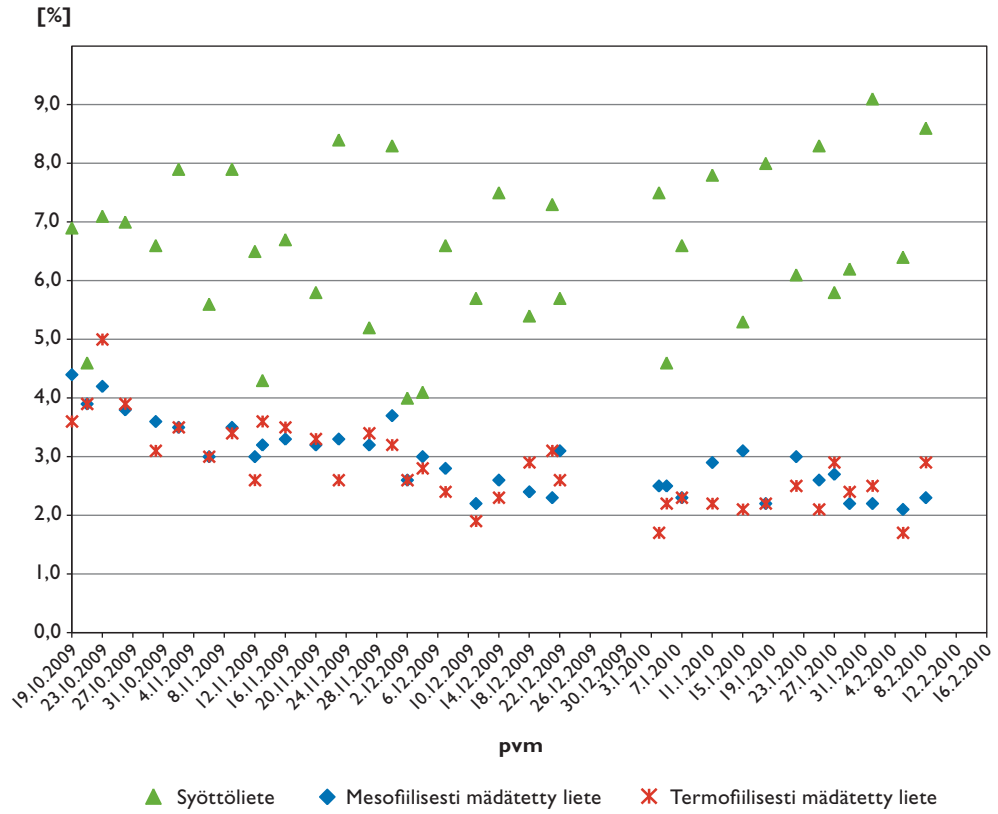
Kuva 33. Mädetyn lietteen pH reaktoreissa ensimmäisen kuormitusjakson aikana.



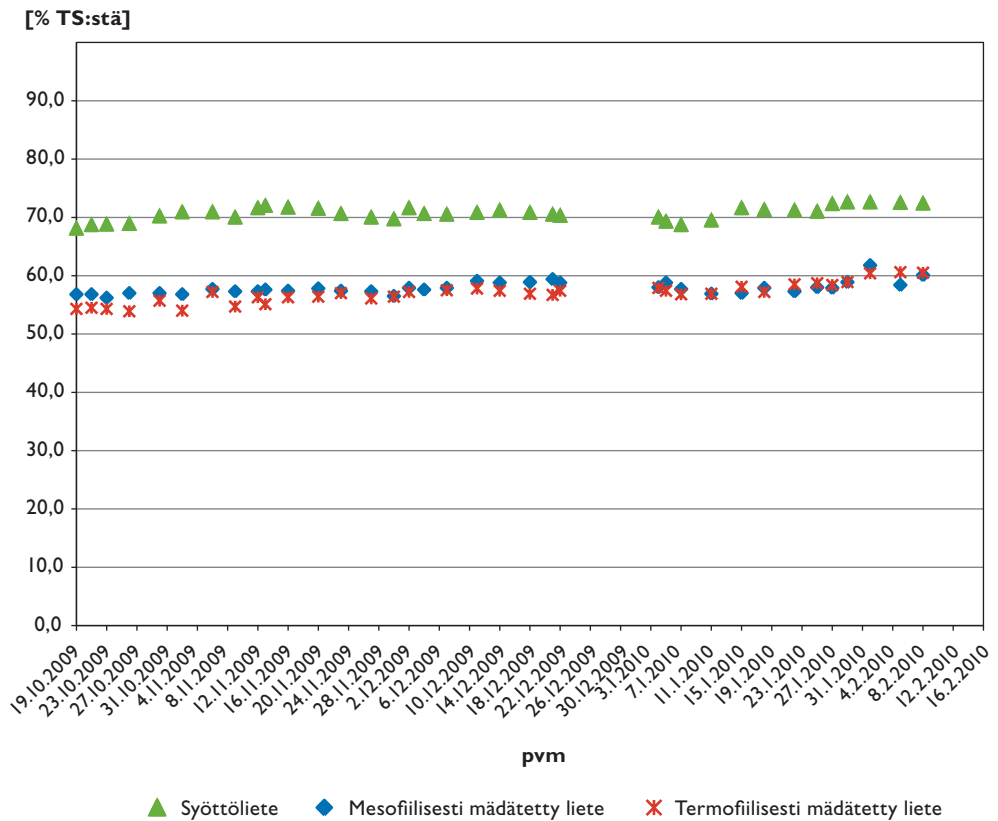
Kuva 34. Mädätetystä lietteestä erottuvan supernatantin pH ensimmäisen kuormitusjakson aikana.



Kuva 35. Mädätetyn lietteen kokonaisalkaliteetti sekä VFA-alkaliteetti ensimmäisen kuormitusjakson aikana.

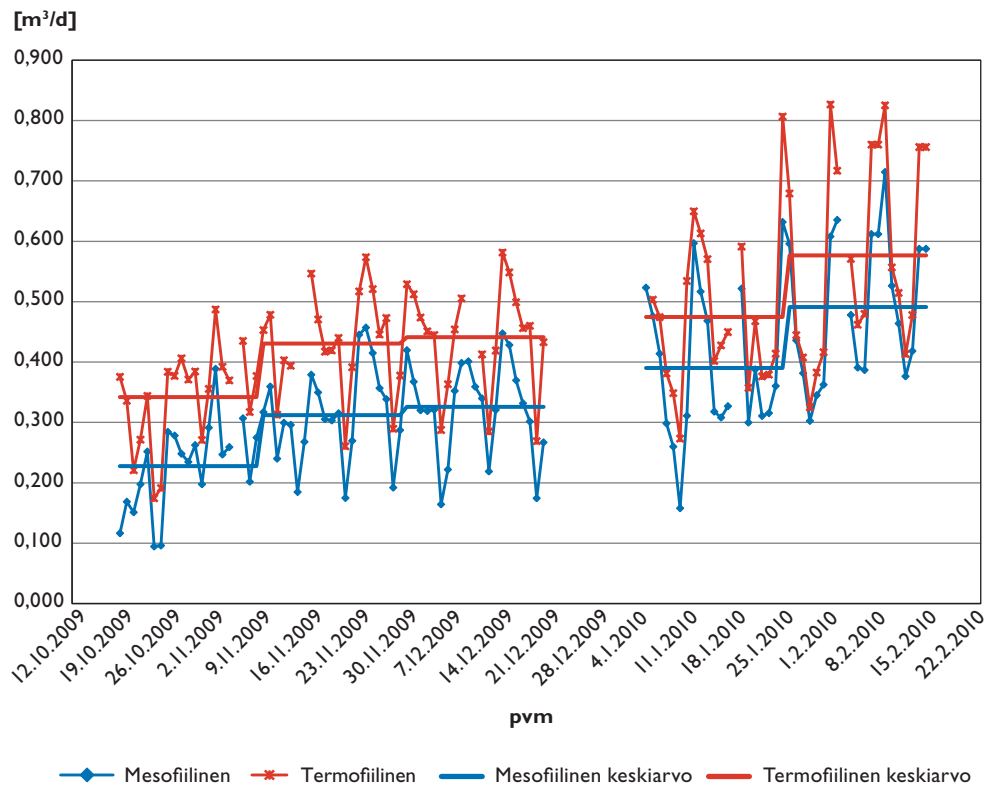


Kuva 36. Syöttölietteen sekä mädätetyn lietteen (mesofilinen ja termofilinen) kiintoainepitoisuudet (TS) ensimmäisen kuormitusjakson aikana.

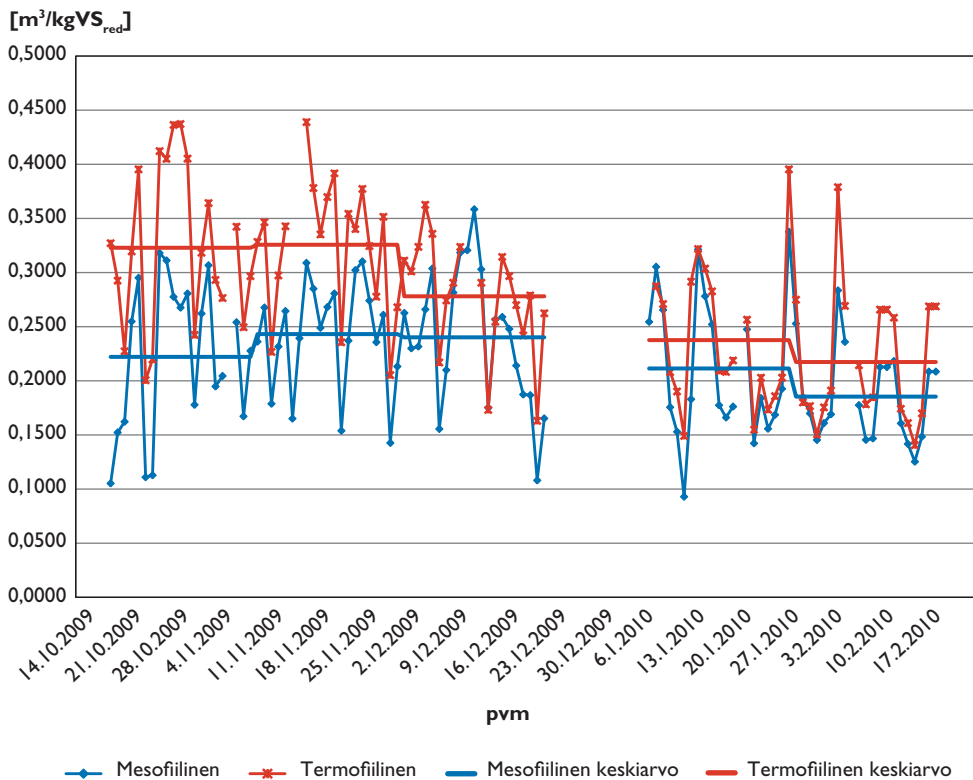


Kuva 37. Kiintoaineen orgaanisen aineen osuus (VS) syöttölietteessä sekä mädätetyssä lietteessä (mesofilinen ja termofilinen) ensimmäisen kuormitusjakson aikana.

Liite 3. Ensimmäisen kuormitusjakson vuorokausitason kaasuntuotto

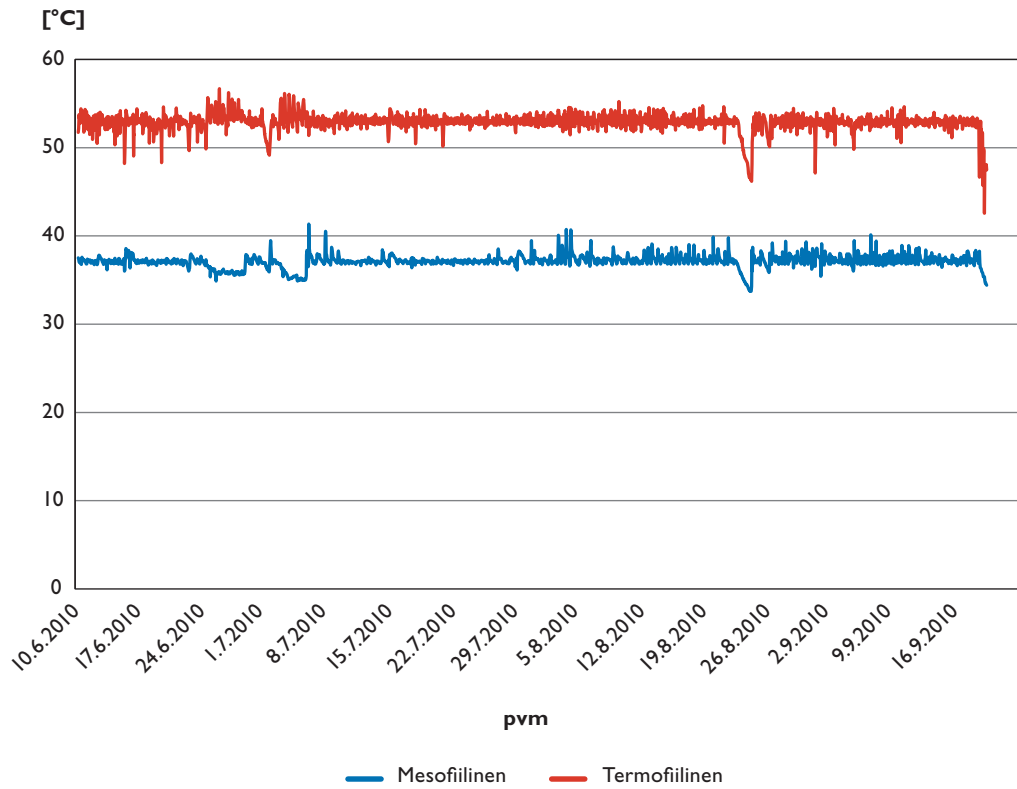


Kuva 38. Absoluuttinen kaasutuotanto sekä keskiarvot eri jaksoille.

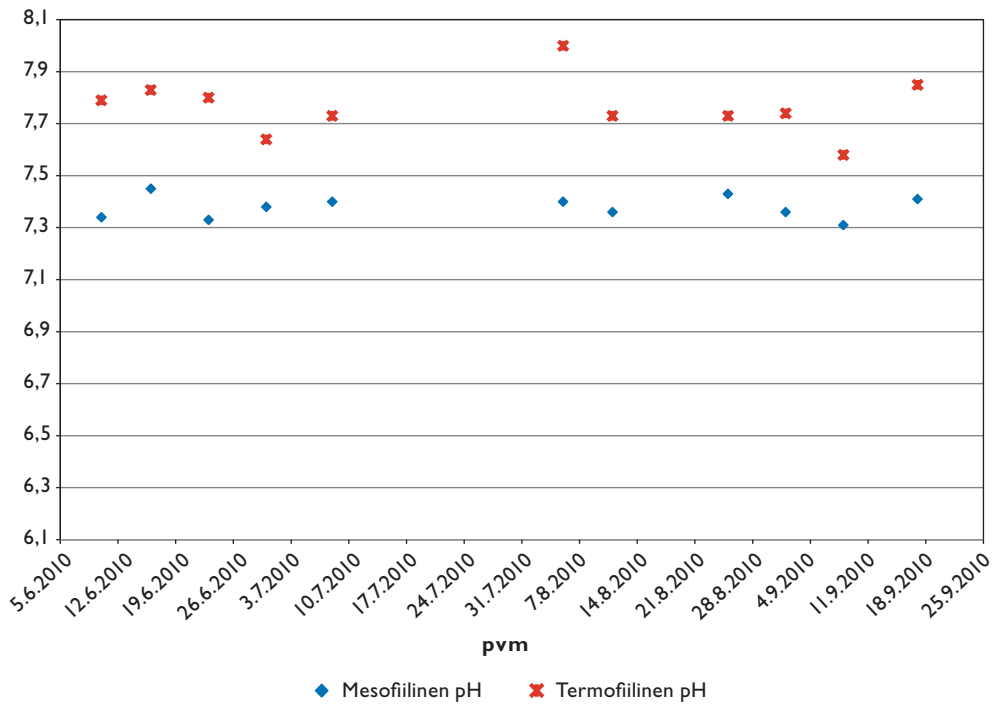


Kuva 39. Kaasutuotanto hajonnutta orgaanista ainemäärää kohti.

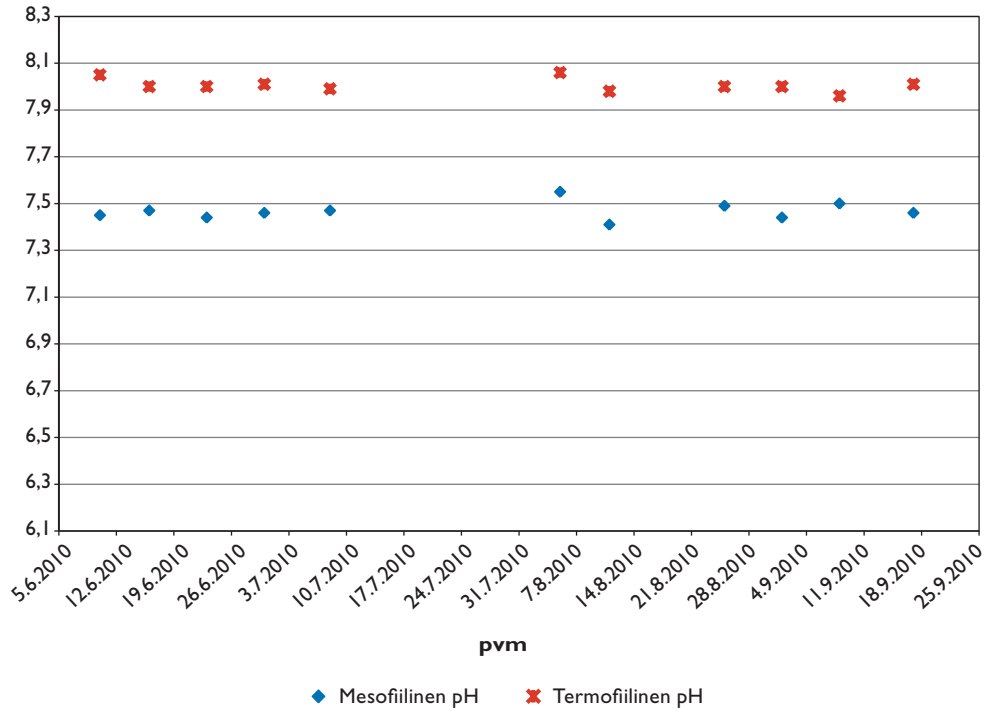
Liite 4. Kuvaajat reaktoreiden olosuhteista toisen kuormitusjakson aikana



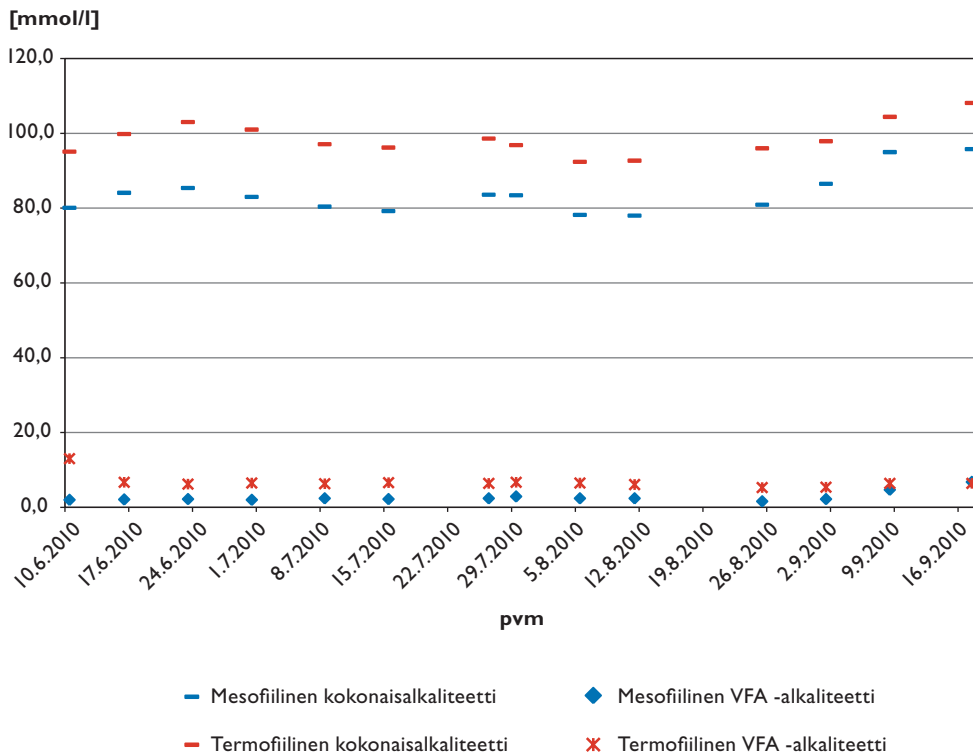
Kuva 40. Lämpötila reaktoreissa toisen kuormitusjakson aikana.



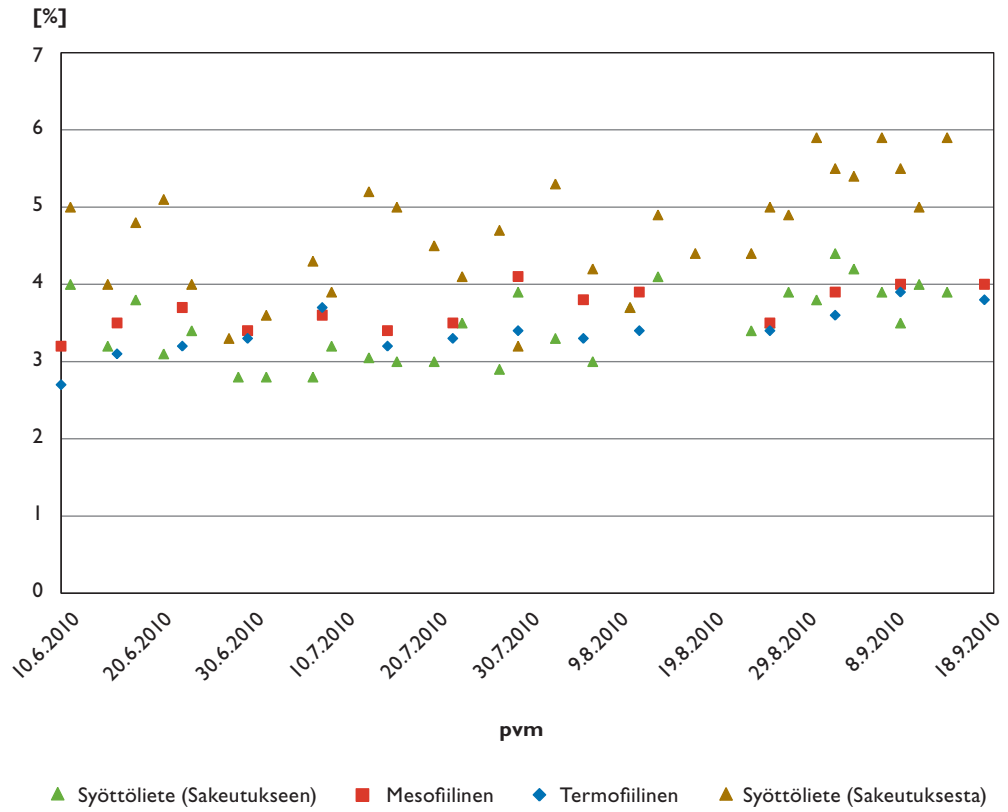
Kuva 41. Mädätetyn lietteen pH reaktoreissa toisen kuormitusjakson aikana.



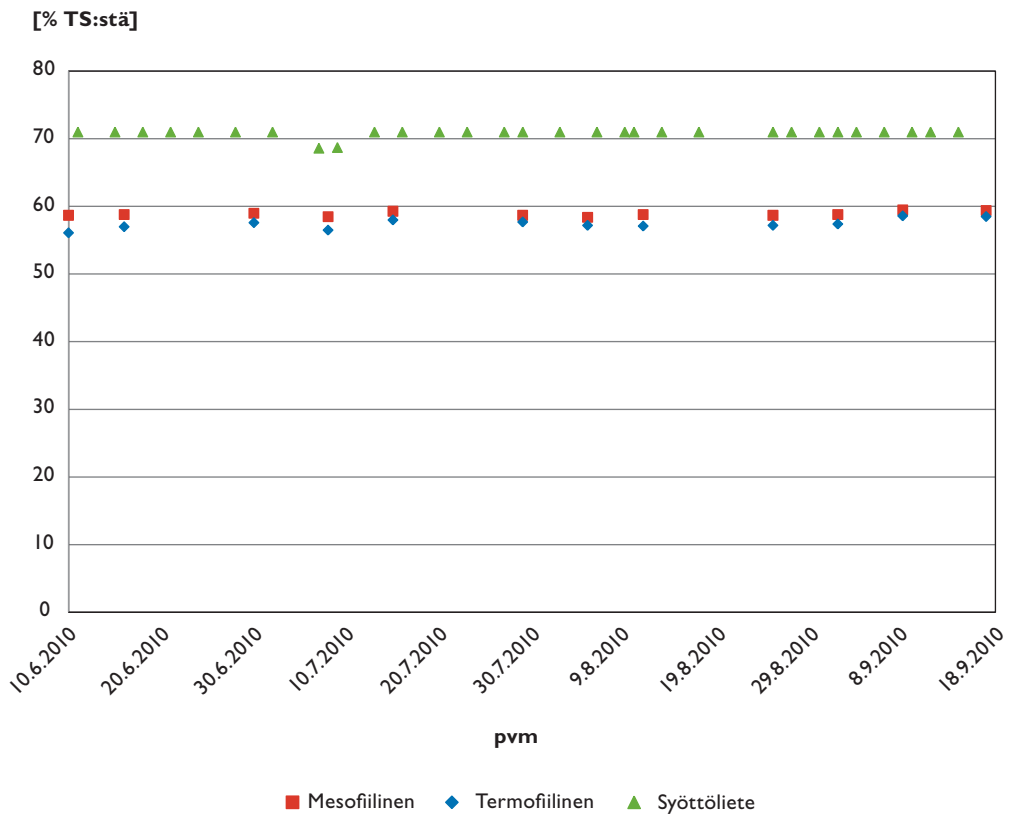
Kuva 42. Määtetystä liettestä erottuvan supernatantin pH toisen kuormitusjakson aikana.



Kuva 43. Määtetyn lietteen kokonaisalkaliteetti sekä VFA-alkaliteetti toisen kuormitusjakson aikana.

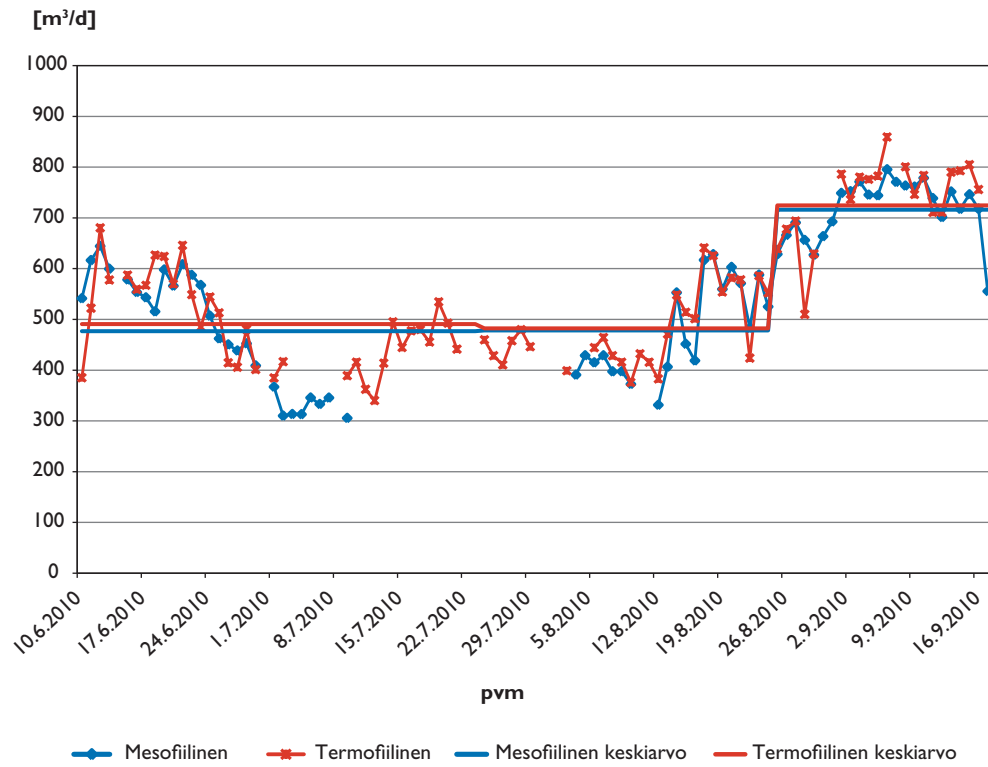


Kuva 44. Syöttölietteen sekä mädätetyn lietteen (mesofiilinen ja termofiilinen) kiintoainepitoisuudet toisen kuormitusjakson aikana.

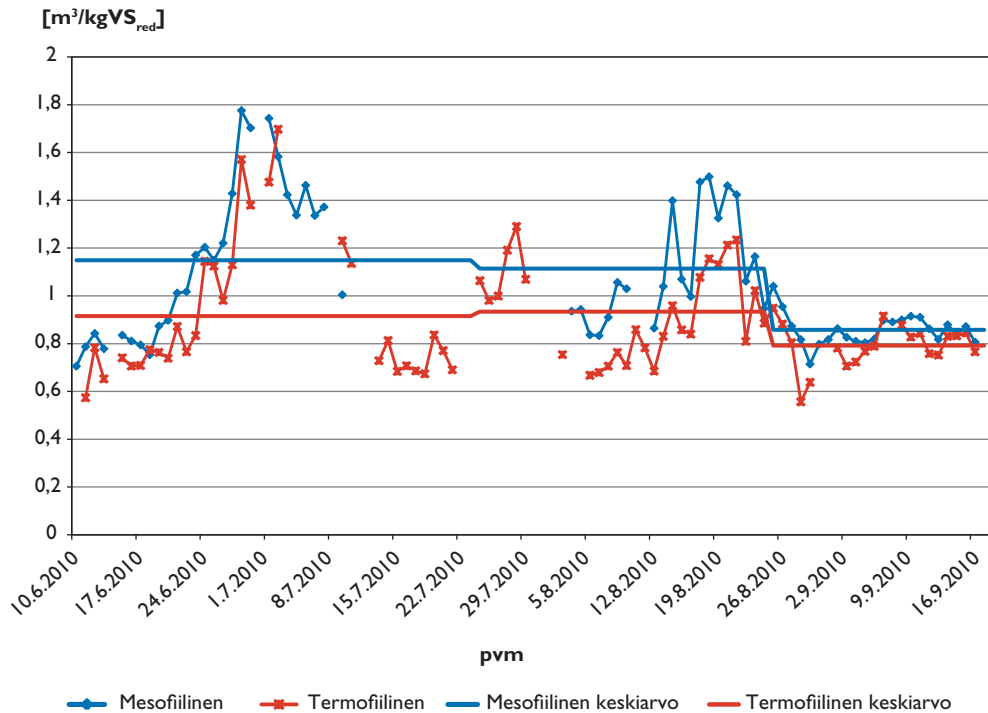


Kuva 45. Kiintoaineen orgaanisen aineen osuus syöttölietteessä sekä mädätetyssä lietteessä (mesofiilinen ja termofiilinen) toisen kuormitusjakson aikana.

Liite 5. Toisen kuormitusjakson vuorokausitason kaasuntuotto



Kuva 46. Absoluuttinen kaasutuotanto sekä keskiarvot eri jaksoille.



Kuva 47. Kaasutuotanto hajonnutta orgaanista ainemäärää kohti.

Liite 6. Materiaalitestauksen tulokset

I kk:n altistus (näytteiden tarkastus 7.10.2009)

Teräsnäytteet

Mesofiilireaktorissa ollut ruostumaton teräsnäyte (1-1) oli pääosin kiiltävä ja siinä oli vain vähäisessä määrin mustaa ja paikoin myös vaalean ruskeaa sakkaa. Hiiliteräsnäytteeseen (2-1) oli muodostunut tummaa ohutta kalvoa näytetangon yläosaan ja alaosa oli kirjava, paikoin tummaa kalvoa ja paikoin vaaleanruskeaa pintaa. Pesun jälkeen todettiin, että näytteessä 1-1 ei ollut nähtävissä syöpymistä, mutta näytteessä 2-1 todettiin alkavaa matalaa syöpymistä näytetangon alaosassa.

Termofiilireaktorin näytteissä oli jonkin verran enemmän sakkaa mesofiilireaktorin näytteissä. Näyte 1-2 oli pääosin kiiltävä, mutta vajaan 10 cm:n päässä alaosasta lähtien oli melko tiukasti kiinni olevaa mustaa sakkaa. Näyte 2-2 oli väriltään enimmäkseen tummanharmaa, alaosassa oli havaittavissa vaalean ruskeaa sakkaa ja yläosassa vähän ruosteenruskeaa sakkaa. Pesun jälkeen näytteessä 1-2 ei todettu syöpymää, mutta näytteessä 2-2 todettiin alaosassa ja hieman myös yläosassa matalaa, alkavaa syöpymää.

Betoninäytteet

Mesofiilireaktorissa olleessa betoninäytetangossa 3-1 oli noin 6 cm korkeudella alareunasta nähtävissä selvä rajapinta reaktorin nestepinnan kohdalla. Rajapinta oli voimakkaasti likaantunut, ja likaantuneen alueen korkeus 5-10 mm. Tangon pinnassa oli nähtävissä pääasiassa pilkkumaista likaantumista rajapinnasta ylöspäin noin 10 cm korkeudelle. Tangon pääty oli voimakkaasti likaantunut, mutta muuten rajapinnan alapuolinen tangon osa oli suhteellisen puhdas. Joitakin mekaaniseen hankautumiseen viittaavia merkkejä oli havaittavissa. Epoksinnoite oli kauttaaltaan ehjä, mutta rajapinnan alapuolisella alueella tangon toisella sivulla pinnassa havaittiin ”rakkuloita”, halkaisija 1-8 mm. Rakkulat olivat pussimaisia muodostelmia, joissa pinnoite ilmeisesti oli irronnut betonista. Pinnoitteen ei kuitenkaan havaittu menneen puhki myöskään rakkuloiden kohdalta.

Termofiilireaktorin betoninäytetangosta 3-2 ei voitu tehdä havaintoja, sillä tanko oli katkennut välittömästi metallikiinnikkeen juuresta, jolloin pääosa tangosta oli jäänyt reaktoriin. Katkennut tanko korvattiin uudella tangolla, joka asennettiin reaktoriin 16.10.2009.

6 kk:n altistus (näytteiden tarkastus 4.3.2010)

Teräsnäytteet

Mesofiilireaktorin näytteissä todettiin olevan vähän enemmän sakkaa kuin 1 kk:n altistuksen jälkeen, mutta näyte 1-1 oli kuitenkin vielä pääosin kiiltävä ja sakkaa oli enemmän vain näytteen alaosassa. Näytteessä 1-1 ei todettu syöpymistä, mutta näytteessä 2-1 todettiin irtoilevaa kalvoa ja syöpymistä alaosassa tankonäytettä. Yläosa oli melko tasainen eikä siinä todettu syöpymistä. Pesussa ei saatu kaikkea sakkaa näytteistä pois, vaan osa oli erittäin tiukasti pinnoilla kiinni.

Termofiilireaktorissa olleessa haponkestävässä ruostumattomassa teräsnäytteessä oli selvästi enemmän sakkaa kuin 1 kk:n altistuksen jälkeen ja myös enemmän kuin mesofiilireaktorin vastaavassa näytteessä. Syöpymiä ei kutienkaan todettu. Tässäkin osa sakasta oli niin tiukasti kiinni, ettei sitä harjapesulla pystytty poistamaan. Näytteessä 2-2 (hiiliteräsnäyte) sen sijaan oli suurin piirtein saman verran sakkaa kuin 1 kk:n altistuksen jälkeen ja vähän vähemmän sakkaa kuin saman ajan mesofiilireaktorissa olleessa vastaavassa näytteessä. Alaosan syöpyminen oli voimistunut edellisestä tarkastuskerrasta. Voimakkainta syöpyminen oli alimmassa osassa noin 5 cm:n matkalla ja vähän vähäisempää siitä ylöspäin tiukasti kiinni olevaan sakkakerrokseen saakka.

Betoninäytteet

Betoninäytetanko 3-1 oli tarkastuksen aikana ollut reaktorissa vajaan 6 kk ja näytetanko 3-2 vajaan 5 kk ajan. Näytetangossa 3-1 oli edelleen nähtävissä rajapinta, mutta rajapinta ei erottunut yhtä selkeästi kuin aiemmassa tarkastelussa. Tangon yläosa oli suhteellisen puhdas, ja rajapinnasta ylöspäin sen pinnassa oli nähtävissä pääasiassa pilkkumaista ja viirumaista likaantumista. Tangon pääty oli voimakkaasti likaantunut, ja siinä oli havaittavissa kasvustoa muistuttavaa rakennetta. Rajapinnan alapuolinen tangon osa oli myös hyvin likainen noin 3 cm korkeudelle alapäädyssä. Rajapinnan yläpuolella epoksinnoitteessa oli havaittavissa joitakin mekaaniseen hankautumiseen viittaavia merkkejä. Tangon epoksinpinnassa voitiin nyt havaita kauttaaltaan ”rakkuloita”, halkaisija 1-8 mm. Rajapinnan yläpuolisella alueella rakkuloita oli vähemmän kuin alapuolella, ja yläpuolella pinnoitteen ei myöskään havaittu menneen puhki rakkuloiden kohdalta. Sen sijaan rajapinnan alapuolisella alueella osa rakkuloista oli irronnut niin, että betonipinta oli paljastunut.

Näytetankoja reaktorista poistettaessa tanko 3-2 oli katkennut välittömästi metallikiinnikkeen juuresta, kuten oli tapahtunut myös edellisellä kerralla näytteitä reaktorista poistettaessa. Tällä kerralla katkennutta kappaletta voitiin kuitenkin tarkastella. Tangossa oli 2-3 cm korkeudella alareunasta nähtävissä rajapinta, jossa oli selkeä, voimakkaasti likaantunut raita. Rajapinnan alapuolisella alueella likaantuminen oli tasaista ja melko voimakasta. Tangon pääty oli kuitenkin suhteellisen puhdas. Rajapinnan yläpuolinen alue oli likaantunut pääsääntöisesti vain toiselta sivultaan. Toisella puolella likaa oli vain rajapinnan läheisyydessä. Epoksinnoite oli ehjä, mutta siinä voitiin havaita samankaltaisia rakkuloita kuin toisessakin tangossa. Rakkuloita oli kauttaaltaan koko epoksinpinnassa.

12 kk:n altistus (teräsnäytteiden tarkastus syyskuussa 2010)

Teräsnäytteet

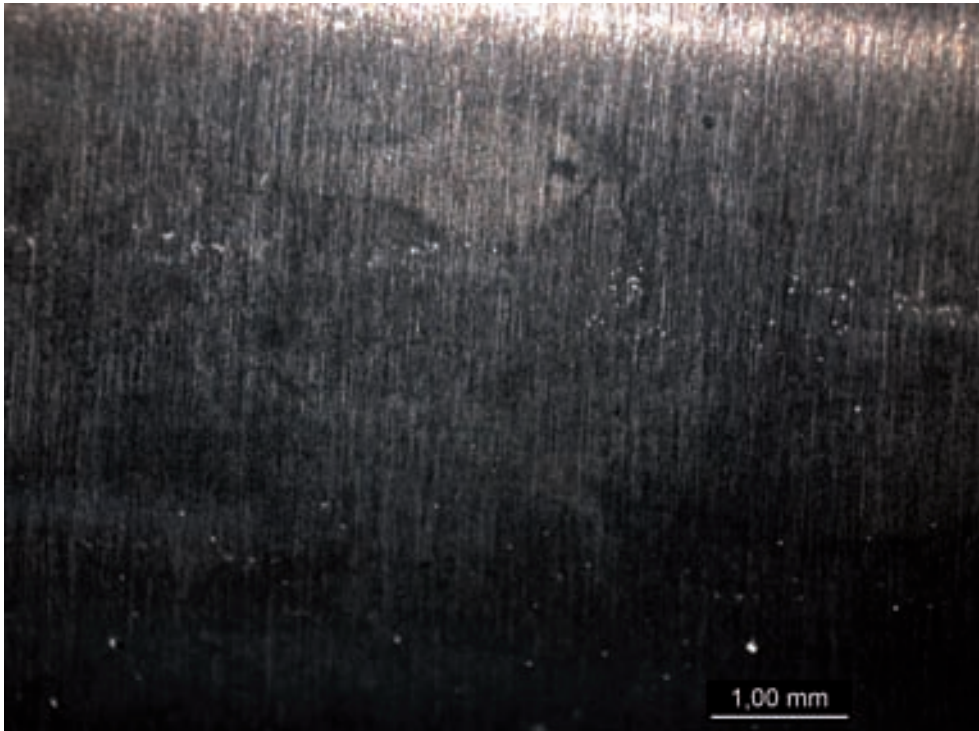
Tällä tarkastuskerralla näytteet pesun lisäksi peitattiin (sakkojen ja korroosiotuotteiden poisto laimealla happoliuoksella), jotta saatiin suurin osa tiukastikin kiinni olevasta sakasta pois ja pystyttiin tekemään lopulliset arviot syöpymisestä. Näytetangon 1-1 alaosassa oli ruskeaa ja osin lähes mustaa sakkaa laikkuina. Alaosaa lukuun ottamatta muu pinta oli kiiltävä ja sakaton. Näytetangossa 2-1 oli alaosassa melko paksusti vaaleanruskeaa sakkaa, muu osa oli tumma. Alaosassa oli silmin nähtävää epätasaista syöpymää.

Peittauksen jälkeisessä stereomikroskooppitarkastuksessa ei näytteessä 1-1 todettu syöpymistä. Sen sijaan näytteessä 2-1 jo edellisillä kerroilla todettu alaosan syöpyminen oli jatkunut edelleen ja alaosa oli voimakkaasti läikittäisesti syöpynyt (kuva 46).

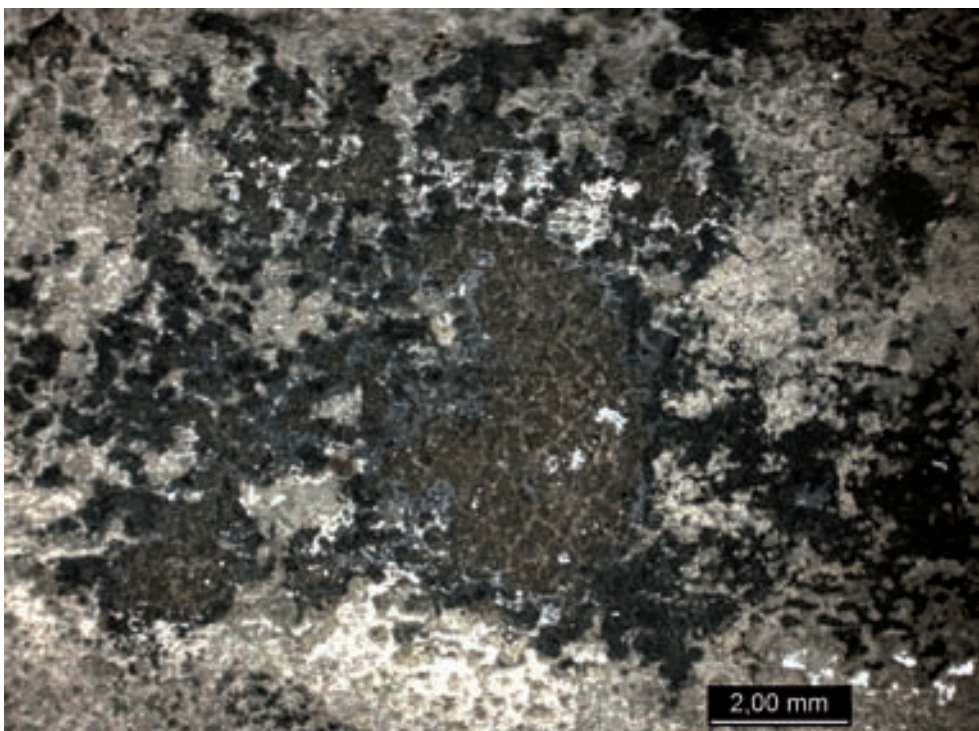
Termofiilireaktorissa olleessa näytekappaleessa 1-2 oli vähemmän sakkaa kuin vastaavan ajan reaktorissa 1 olleessa samaa materiaalia olleessa näytteessä. Jonkin verran tummaa sakkaa todettiin tangon pinnalla, noin 10 cm tangon alapäästä. Näytekappaleessa 2-2 todettiin tumman ruskeaa sakkaa melko ohuelti. Osin sakka oli hyvin lohkeilevaa. Peitattuna näytteestä 1-2 havaittiin paikoin hyvin pientä, matalaa, alkavaa pistesyöpymistä. Näytteessä 2-2 todettiin alaosassa melko tasaista syöpymää, joka oli lievempää kuin mesofiilireaktorissa olleessa vastaavassa näytteessä. Tässä näytteessä todettiin tangon muissa osissa paikoin pistesyöpymä-alueita (kuva 47 ja 48).



Kuva 46. Stereomikroskooppikuva näyttötangon 2-1 alaosan voimakkaasta läikittäisestä syöpymisestä 12 kk:n altistuksen jälkeen mesofiilisessa reaktorissa 1.



Kuva 47. Näytekalpaleessa 1-2 olevia hyvin pieniä alkavia pistesyöpymiä. Pienet pistesyöpymät näkyvät kuvassa vaaleina pisteinä.



Kuva 48. Näytekalpaleessa 2-2 olevaa syöpymää näytetangon alaosassa. Stereomikroskooppikuva.

Betoninäytteet

Näytetanko 3-1 oli tarkastuksen aikana ollut reaktorissa noin 12 kk ja näytetanko 3-2 noin 6 kk.

Tangossa 3-1 oli edelleen nähtävissä rajapinta (kuva 49). Rajapinnan yläpuolisen likaantuneen alueen korkeus oli kasvanut ollen nyt 20 - 30 mm. Likaantuminen oli suhteellisen lievää. Muilta osin tangon yläpää oli melko puhdas, ja sen pinnassa oli nähtävissä pääasiassa pilkkumaista ja viirumaista likaantumista. Rajapinnan yläpuolella epoksinnoitteessa oli havaittavissa myös joitakin mekaaniseen hankautumiseen viittaavia merkkejä. Tangon pääty oli voimakkaasti likaantunut, ja siinä oli havaittavissa kasvustoa muistuttavaa rakennetta. Rajapinnan alapuolinen tangon osa oli myös hyvin likainen noin 3 cm korkeudelle alapäädystä, ja se sisälsi kasvustoa tai muuta vierasta ainesta. Kauttaaltaan tangon epoksinnassa voitiin havaita ”rakkuloita”. Rajapinnan yläpuolisella alueella rakkuloita oli vähemmän kuin alapuolella, ja yläpuolella pinnoitteen ei myöskään havaittu menneen puhki rakkuloiden kohdalta. Rajapinnan alapuolisella alueella osa rakkuloista oli irronnut niin, että betonipinta oli paljastunut. Silmämääräisesti arvioituna betoni ei paljastuneillakaan alueilla ollut kuitenkaan syöpynyt. Edelliseen tarkastukseen verrattuna tilanne ei tässä suhteessa ollut myöskään pahentunut.

Näytetangossa 3-2 oli nähtävissä 5 - 6 cm korkeudella alareunasta rajapinta, jossa oli selkeä likaantunut raita. Rajapinnan alapuolisella alueella likaantuminen oli tasaisinta mutta suhteellisen lievää. Tangon pääty oli kuitenkin varsin puhdas. Rajapinnan yläpuolinen alue oli likaantunut vain toiselta sivultaan ja sieltäkin lievästi. Toisella puolella likaa oli vain rajapinnan läheisyydessä. Epoksinnoite oli ehjä, eikä siinä voitu havaita senkaltaisia rakkuloita kuin toisessa tangossa. Rakkuloita oli sen sijaan tangon päädystä. Yksikään niistä ei kuitenkaan ollut puhjennut ja paljastanut betonipintaa. Kokonaisuutena arvioiden epoksinnoite oli hyvässä kunnossa. (Kuva 50).



Kuva 49. Mesofilireaktorissa 12 kk ollut betoninäytetanko 3-1.



Kuva 50. Termofilireaktorissa 6 kk ollut betoninäytetanko 3-2.

Liite 7. Energia- ja kasvihuonekaasutaseiden sekä kustannusten laskennassa käytettyjä lähtötietoja.

Kuvaus	Arvo	Yksikkö	Tietolähde
Energiataseiden laskennan lähtötietoja			
Ilmastusenergian kulutus prosesseissa			
E1	13 600	kWh/d	(FCG 2010)
E2	14 900	kWh/d	
R	13 500	kWh/d	
Biokaasun tuotanto prosesseissa, mesofili			
E1	9810	m ³ /d	(Pérez-Elvira ym. 2008; FCG 2010)
E2	9340	m ³ /d	
R	7260	m ³ /d	
Biokaasun tuotanto prosesseissa, termofiili			
E1	13870	m ³ /d	Pilot-mittakaavan koeajot TER- MOS-projektissa, SYKE.
E2	13210	m ³ /d	
R	10260	m ³ /d	
KHK-taseiden laskennan lähtötietoja			
Yhdyskuntajäteveden maksimi metaanintuotto- kapasiteetti (IPCC:n oletus- kerroin)	0,625	kg CH ₄ /kg BOD	(Tilastokeskus 2010a)
Yhdyskuntajäteveden metaanin konversiokerroin	0,01		(Tilastokeskus 2010b)
Maakaasun alempi lämpöarvo	129,6	kWh/m ³	(Tilastokeskus 2010b)
Maakaasun päästökerroin sisältäen tuotantoketjun päästöt	244	g CO ₂ /kWh	(Mäkinen ym. 2006; Tilastokeskus 2010b)
Kompostoinnin haihduntapäästöt - metaani - typpioksiduuli	0,987 0,051	g CH ₄ /kg lietettä g N ₂ O/kg lietettä	(Myllymaa ym. 2008)
Kevyen polttoöljyn alempi lämpöarvo	11,8	kWh/kg	(Tilastokeskus 2010b)
Kevyen polttoöljyn päästö- kerroin sisältäen tuotanto- ketjun päästöt	317	g CO ₂ /kWh	(Mäkinen ym. 2006; Tilastokeskus 2010b)
Metanolin alempi lämpöarvo	19,9	MJ/kg	(Methanex 2006)
Metanolin tuotannon päästökerroin	95,0	g CO ₂ ekv/kWh	(Mäkinen ym. 2006)
Suomen keskimääräisen sähkötuotannon päästökerroin	229	g CO ₂ /kWh	(Tilastokeskus 2009; Energiateollisuus 2010)
Kaukolämmön päästö- kerroin pk-seudulla	205	g CO ₂ ekv/kWh	(HSY 2010)

Kuvaus	Arvo	Yksikkö	Tietolähde
Kustannuslaskennan lähtötietoja			
Kemikaalikustannukset prosesseissa			
E1	1 445 000	€/a	(FCG 2010)
E2	2 100 000	€/a	
R	1 115 000	€/a	
Biokaasutariffi sähkölle sisältäen lämpöpreemion	133,5	€/MWh	(Syöttötariffityöryhmä 2009)
Kaukolämmön hinta Espoossa	37,2	€/MWh	ALV 0 % ilman perusmaksua. (Fortum 2010)
Sähkön ostohinta jätevedenpuhdistamolle (energia + siirto)	0,075	€/kWh	
Sähkön myyntihinta ulkopuolelle	0,03	€/kWh	Sähkön markkinahinta
Kevyen polttoöljyn hinta	49	€/MWh	ALV 0 %. (Öljy- ja kaasualan keskusliitto 2010)
Maakaasun hinta	30,7	€/MWh	ALV 0 %. (Energiamarkkinavirasto 2010)
Biokaasusta saatava tuotto ajoneuvopolttoaineena	50	€/MWh	(Sitra 2007)
Kaasumoottori investointi - käyttö ja ylläpito	1 500 10	€/kW _e €/MWh	(Latvala 2005; Fred 2010; Sundell 2010), (Sundell 2010)
Kattila - investointi - käyttö ja ylläpito	580 0,2	€/kW _{th} €/MWh	(Latvala 2005; Sundell 2010) (Sundell 2010)
Kaasun puhdistuslaitteisto (aktiivihiihid-sorptio) - investointi - käyttö ja ylläpito	50 000 0,0033	€ €/m ³	(Arnold 2009) (Arnold 2009)
Kaasun jalostuslaitteisto (vesipesuri, 1000 m ³ /h) - investointi - käyttö (sähkö, voiteluöljy)	1 900 000 2,3	€ c/m ³	(Lappalainen 2010) (Lappalainen 2010)
Terminen kuivauslaitos - investointi - käyttö (kevyt poltto-öljy siltä osin, kun biokaasu ei riitä lämmönlähteeksi)	4 000 000 49	€ €/MWh	(Sundell 2010)
Lietteen tai mädätteen kuljetuskustannukset	0,1	€/tkm	Arvio perustuen lähteeseen (Sundberg 2009)
Polttolaitoksen porttimaksu lietteelle	80	€/t	Arvio perustuen lähteeseen (Turun jätteenpolttoliikelaitoksen johtokunta 2009)
Kompostoinnin porttimaksu	65	€/t	(Sundberg 2009)

KUVAILULEHTI

Julkaisija	Suomen ympäristökeskus			Julkaisu-aika Kesäkuu 2011
Tekijä(t)	Ari Kangas, Charlotta Lund, Saku Liuksia, Mona Arnold, Elina Merta, Tuula Kajolinna, Leena Carpen, Pertti Koskinen ja Tapio Ryhänen			
Julkaisun nimi	Energiatehokas lietteenkäsittely			
Julkaisusarjan nimi ja numero	Suomen ympäristö 17/2011			
Julkaisun teema	Ympäristönsuojelu			
Julkaisun osat/ muut saman projektin tuottamat julkaisut	Julkaisu on saatavana vain internetissä: www.ymparisto.fi/julkaisut			
Tiivistelmä	<p>SYKE:n ja VTT:n yhteisessä tutkimusprojektissa ”TERMOS – Energiatehokas lietteenkäsittely” selvitettiin jätevesilietteiden energiatehokkaita käsittelytapoja. Nykyään Suomessa puhdistamolietteiden vallitsevana käsittelymenetelmänä on isoilla jätevedenpuhdistamoilla mesofiilinen mädätys (35 °C), mutta termofiilinen prosessi (55 °C) on suuremman tehokkuutensa ansiosta noussut mielenkiintoiseksi vaihtoehdoksi. Yksi tutkimuksen päätavoite oli tutkia mesofiilisen prosessin muuttamista termofiiliseksi sekä mesofiilisen ja termofiilisen prosessin kuormitettavuuseroja. Tämä tehtiin kokeellisesti pilot-mittakaavan mädätysreaktoreilla HSY:n Suomenojan jätevedenpuhdistamolla sijaitsevalla SYKE:n tutkimusasemalla Espoossa. Tulosten mukaan prosessin saattaminen termofiiliselle lämpötila-alueelle onnistuu nopeasti ja ilman häiriöitä. Termofiilinen prosessi havaittiin hajottavan orgaanista ainetta mesofiilistä tehokkaammin ja tuottavan enemmän kaasua sekä myös hygienisoivan lietettä, toisaalta termofiilisesti mädätetyllä lietteellä on huonompi kuivattavuus ja huonolaatuisemmat rejektivedet. Kokeilujen aikana havaittiin myös fermentaatioon perustuva autoflotaatioilmiö, jonka esikäsittelyvaikutusta lietteeseen tutkittiin. Tulosten mukaan esifermentaatio parantaa oleellisesti kaasun yksikkötuottoa molemmissa mädätysprosesseissa, mutta vie termofiilisen prosessin edun.</p> <p>Tutkimuksen toisena päätavoitteena oli vertailla erilaisia käsittelyvaihtoehtoja energiatalouden, kasvihuonekaasupäästöjen ja kustannusten näkökulmasta. Tämä tehtiin case-pohjaisena järjestelmänalyysinä. Lietteen polttoa vertailtiin mädätysprosesseihin eri loppukäsittelyvaihtoehdoilla. Tarkasteltiin myös esisaostuksen ja rinnakkaissaostuksen vaikutuksia käsittelyketjuihin. Biokaasun tuotannon tehostaminen siirtymällä mesofiilimädätyksestä termofiiliprosessiin voisi olla jätevedenpuhdistamolle taloudellisesti kannattavaa erityisesti, mikäli laitos saa tuotetulle sähkölle syöttötariffin mukaiset lisätulot. Energiatalouden kannalta kompostointi olisi edullisempi mädätteen käsittelytapana. Energiataseisiin perustuen lietteen poltto olisi päästöjen kannalta edullinen lietteen käsittelytapana sillä edellytyksellä, että tuotettu lämpöenergia voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämmityksessä. Lietteenkäsittelyketjujen kasvihuonepäästöt ja kustannustalous eivät kaikissa tapauksissa kulkeneet käsi kädessä. Yleisesti voidaan todeta, että kaikki tarkastelussa saadut tulokset ovat tapauskohtaisia ja riippuvaisia paikallisista olosuhteista.</p>			
Asiasanat	mädätys, jätevesiliete, biokaasu, uusiutuvat energialähteet, ilmastovaikutukset			
Rahoittaja/ toimeksiantaja				
	ISBN (nid.)	ISBN 978-952-11-3907-9 (PDF)	ISSN (pain.)	ISSN 1796-1637 (verkkoy.)
	Sivuja 96	Kieli suomi	Luottamuksellisuus julkinen	Hinta (sis. alv 8 %)
Julkaisun myynti/ jakaja				
Julkaisun kustantaja	Suomen ympäristökeskus (SYKE), PL 140, 00251 Helsinki			
Painopaikka ja -aika				

PRESENTATIONSBLAD

Utgivare	Finlands miljöcentral			Datum Juni 2011
Författare	Ari Kangas, Charlotta Lund, Saku Liuksia, Mona Arnold, Elina Merta, Tuula Kajolinna, Leena Carpén, Pertti Koskinen och Tapio Ryhänen			
Publikationens titel	Energiatehokas lietteenkäsittely (Energieffektiv slambehandling)			
Publikationsserie och nummer	Miljön i Finland 17/2011			
Publikationens tema	Miljövård			
Publikationens delar/ andra publikationer inom samma projekt	Publikationen finns tillgänglig endast på internet: www.ymparisto.fi/julkaisut			
Sammandrag	<p>SYKE och VTT utredde energieffektiva behandlingsmetoder för kommunalt avloppsslam inom det gemensamma projektet "TERMOS - energieffektiv slamhantering". I dagsläget behandlas största delen av avloppsslammet i Finland genom mesofil rötning (35 °C), men den termofila rötningsprocessen (55 °C) utgör ett attraktivt alternativ eftersom den är effektivare. En av undersökningens huvudsakliga målsättningar var att studera övergången från en mesofil till en termofil process, samt att utreda skillnader i toleransen för belastning mellan den mesofila och termofila processen. Detta undersöktes experimentellt med hjälp av röttningsreaktorer i pilot-skala på SYKEs forskningsstation, i närheten av HSY:s reningsverk i Finno, Esbo. Enligt forskningsresultaten är det möjligt att snabbt och utan störningar höja rötningstemperaturen till det termofila området. Den termofila processen konstaterades ha en effektivare nedbrytning av organiskt material och större gasproduktion än den mesofila processen, dessutom åstadkom den termofila processen hygienisering av slammet. Däremot var det termofilt rötade slammet svårare att avvattna och rejektvattnet var av sämre kvalitet. Under forskningens gång upptäcktes ett autoflotationsfenomen som baserade sig på fermentering, och dess förbehandlings effekter på slammet undersöktes närmare. Enligt resultaten förbättrar förfermenteringen märkbart enhetsproduktionen av gas för båda röttningsprocesserna, men samtidigt upphävs den termofila processens fördelar gällande ökad gasproduktion.</p> <p>En annan av undersökningens huvudsakliga målsättningar var att jämföra olika hanteringsalternativ med avseende på energihushållning, utsläpp av växthusgaser och ekonomiska kostnader. Detta genomfördes i form av en case-baserad systemanalys. Slamförbränning jämfördes med röttningsprocesser kombinerade med olika slutbehandlingsalternativ. Också effekterna av förfällning och simultanfällning på behandlingskedjan granskades. En ökning av biogasproduktionen genom övergång från en mesofil till en termofil röttningsprocess kan vara ekonomiskt lönsamt speciellt ifall reningsverket erhåller tilläggsinkomster för elproduktionen i enlighet med inmatningstariffen. Ur energihushållningssynvinkel skulle kompostering vara den förmånligaste behandlingen för det rötade slammet. Utgående från energibalanserna är slamförbränning en fördelaktig hantering med avseende på utsläpp, under den förutsättningen att värmeenergin som produceras kan tillvaratas t.ex. i form av fjärrvärme. Balansuträkningarna för växthusgaser och ekonomiska kostnader var inte alltid överensstämmande. Allmänt kan man konstatera att de resultat som erhållits genom granskningen är fallspecifika och beroende av lokala omständigheter.</p>			
Nyckelord	rötning, avloppsslam, biogas, förnybara energikällor, klimatpåverkan			
Finansiär/ uppdragsgivare				
	ISBN (hft.)	ISBN 978-952-11-3907-9 (PDF)	ISSN (print)	ISSN 1796-1637 (online)
	Sidantal 96	Språk finska	Offentlighet Offentlig	Pris (inneh. moms 8 %)
Beställningar/ distribution				
Förläggare	Finlands miljöcentral, PB 140, 00251 Helsingfors			
Tryckeri/tryckningsort -år				

DOCUMENTATION PAGE

<i>Publisher</i>	Finnish Environment Institute			<i>Date</i> June 2011
<i>Author(s)</i>	Ari Kangas, Charlotta Lund, Saku Liuksia, Mona Arnold, Elina Merta, Tuula Kajolinna, Leena Carpén, Pertti Koskinen and Tapio Ryhänen			
<i>Title of publication</i>	Energiatehokas lietteenkäsittely (Energy efficient management of wastewater sludge)			
<i>Publication series and number</i>	The Finnish Environment 17/2011			
<i>Theme of publication</i>	Environmental protection			
<i>Parts of publication/ other project publications</i>	The publication is available only in the internet: www.ymparisto.fi/julkaisut			
<i>Abstract</i>	<p>SYKE and VTT investigated energy effective treatment methods for municipal wastewater sludge within the project "TERMOS - Energy effective sludge treatment". The most common sludge treatment method in Finland today is mesophilic anaerobic digestion (35 °C), however the thermophilic (55 °C) process is gaining interest due to its more effective performance. One main objective of the study was to investigate the change from mesophilic to thermophilic operation and the differences between the mesophilic and thermophilic processes regarding loading tolerance. The study was carried out as pilot-scale experiments at the SYKE research station located at the HSY wastewater plant in Suomenoja, Espoo. According to the results the digestion temperature can be elevated to the thermophilic level quickly and without process disturbances. The thermophilic process was found to have a greater level of reduction of organic matter and a greater gas production than the mesophilic process, and in addition to hygienize the sludge. At the other hand the thermophilic sludge had a poor dewatering ability and the reject was of poor quality. During the experiments a autoflotation phenomenon based on fermentation was discovered, and its pretreatment effects on the sludge were examined closer. According to the results the pre-fermentation essentially increases the unit production of gas for both of the processes, but eliminates the advantage of the thermophilic process.</p> <p>The other main objective of the study was to compare different treatment options in terms of energy economy, greenhouse gas emissions and economic costs. This was achieved through a case-study system analysis. Sludge combustion was compared to digestion processes in combination with different finishing treatments. The effects of pre-precipitation and simultaneous precipitation on the treatment chains were also examined. It could be economically beneficial to increase the biogas production by shifting from a mesophilic process to a thermophilic, especially if the plant is entitled to additional incomes from the electricity production in accordance with the feed-in tariff. Considering energy economy, composting would be the most affordable treatment of digested sludge. According to the energy balances, sludge combustion would be preferable with regard to emissions if the produced heat can be utilized for example as district heat. The greenhouse gas balances and the economic expenses of the treatment options were not always concordant. Generally, all the results of this examination are case-specific and dependant on local circumstances.</p>			
<i>Keywords</i>	anaerobic digestion, sewage sludge, biogas, renewable energy sources, climate impact			
<i>Financier/ commissioner</i>				
	ISBN (pbk.)	ISBN 978-952-11-3907-9 (PDF)	ISSN (print)	ISSN 1796-1637 (online)
	No. of pages 96	Language Finnish	Restrictions Public	Price (incl. tax 8 %)
<i>For sale at/ distributor</i>				
<i>Financier of publication</i>	Finnish Environment Institute, P.O.Box 140, FI-00251 Helsinki, Finland			
<i>Printing place and year</i>				

Jätevedenpuhdistamoilla syntyvä liete vaatii käsittelyä, ja käsittelykustannukset muodostavat puhdistamoiden kokonaiskustannuksista lähes yhtä suuren osan kuin itse jäteveden käsittely. Lietteenkäsittelymenetelmiä ovat esimerkiksi mädätys, kompostointi ja poltto. Eri käsittelymenetelmien energiataloudellisuuteen ja lietteiden hyötykäyttöön energian tuotannossa kiinnitetään tulevaisuudessa yhä enemmän huomiota niiden merkittävän säästöpotentiaalinvuoksi. SYKE:n ja VTT:n yhteisprojektissa ”Termos - energiatehokas lietteenkäsittely” selvitettiin jätevesilietteiden energiatehokkaita käsittelytapoja.

Mädätysmenetelmistä tällä hetkellä Suomessa vallitsevana on mesofiilinen mädätys, mutta termofiilinen mädätys on suuremman tehokkuutensa ansiosta noussut mielenkiintoiseksi vaihtoehdoksi. Kokeellisen toiminnan tuloksena syntyi kokemusta mesofiilisen mädätysprosessin muuttamisesta termofiiliseksi sekä mesofiilisen ja termofiilisen prosessin eroavaisuuksista esim. kuormitettavuuden ja kaasuntuotannon suhteen. Näin saatiin perusteet prosessin mitoittamiselle sekä tietoa prosessin käynnistettävyydestä ja stabiilisuudesta.

Case-pohjaisella järjestelmäanalyysillä vertailtiin myös erilaisten lietteenkäsittelyketjujen kasvihuonekaasutaseita, energiataseita ja kustannuksia. Näin syntyi arvio eri käsittelyvaihtoehtojen energiatehokkuudesta, ympäristövaikutuksista ja taloudesta. Projektin tuloksia voidaan hyödyntää esimerkiksi jätevesilaitosten päätöksenteossa lietteenkäsittelyn tehostamishankkeissa.

