



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

ANNETTE MÄKI-PAAVOLA

Yhdyskuntaliikenteen hyödyntäminen energiantuotannossa

Case: Satakunnan ammattikorkeakoulu

ENERGIA- JA YMPÄRISTÖTEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA
2024

TIIVISTELMÄ

Mäki-Paavola, Annette: Yhdyskuntalietteen hyödyntäminen energiantuotannossa – Case: Satakunnan ammattikorkeakoulu
Opinnäytetyö, AMK
Energia- ja ympäristötekniikka
Huhtikuu 2024
Sivumäärä: 34

Satakunnan ammattikorkeakoulu suunnitteli toteuttavansa Porin kampuksella suljetun vesikierron kahdessa WC-tilassa, jossa tilojen jätevedet olisi puhdistettu ja palautettu tilojen WC-istuinten huuhteluvodeksi. Tässä opinnäytetyössä oli tarkoitus selvittää, olisiko puhdistuksesta syntynyttä lietettä voinut hyödyntää energianlähteenä kattamaan osaa Porin kampuksen energiankulutuksesta. Kirjallisuuskatsauksessa käsiteltiin lietteen hyödyntämisen nykytilaa, lainsäädäntöä ja eri käsittelymenetelmiä. Case-osiossa arvioitiin menetelmien sopivuutta Satakunnan ammattikorkeakoulun tapauksessa lietteen energianlähteenä hyödyntämiseen.

Lietettä syntyi Suomessa vuonna 2020 kuivapainoltaan noin 135 000 tonnia. Suurin osa mädätettiin ja/tai kompostoitui. Mädätyksestä saatavaa biokaasua voitiin käyttää energianlähteenä poltossa. Lietettä poltettiin melko vähän, ja Suomessa oli vain muutama lietettä polttoaineena hyödyntävä polttolaitos. Suurin osa käsitellystä lietteestä käytettiin viherrakentamisessa ja maataloudessa.

Lietettä voitiin käsitellä aerobisesti kompostoimalla ja anaerobisesti mädättämällä. Kemiallisia käsittelymenetelmiä olivat kalkkistabilointi ja kemicond-käsittely, jotka muuttivat lietteen hygieeniseen ja helpommin jatkokäsiteltävään muotoon. Liete voitiin käsitellä myös termisesti helpommin käsiteltävään muotoon. Tällaisia menetelmiä olivat terminen kuivaus, märkähiilto, pyrolyysi, torrefiointi ja kaasutus. Nämä menetelmät eivät tuottaneet energiaa, vaan kuivasivat ja muuttivat lietteen helpommin käsiteltävään muotoon, joka voitiin myöhemmin polttaa.

Lietettä voitiin myös polttaa. Yhteispoltoissa liete ei juurikaan vaikuttanut tuotetun energian määrään, vaan lietettä poltettiin lähinnä siitä eroon pääsemiseksi. Jätteenpolttolaitoksilla voitiin polttaa pieniä määriä lietettä muun syötteen mukana. Suomessa oli yksi jätteenpolttolaitos, joka käsitteli myös lietettä. Näiden lisäksi lietettä voitiin polttaa myös erillispolttona ilman muuta syötettä. Tällaisia laitoksia oli Suomessa ainoastaan Rovaniemellä PAKU-tekniikalla toimiva lietteen erillispolttolaitos.

Satakunnan ammattikorkeakoulun Porin kampuksen suljettu kierto olisi tuottanut lietettä vuositason tasolla vain 12,8 kg TS/a. Näin pienellä määrällä ei olisi saatu lietteen hyödyntämisestä energianlähteenä juurikaan hyötyä, joten lietteen kerääminen energianlähteeksi ei olisi ollut kannattavaa.

Avainsanat: Jätevesiliete, liete, mädätys, kompostointi, poltto, märkähiilto, pyrolyysi, torrefiointi, kaasutus

ABSTRACT

Mäki-Paavola, Annette: Usage of sewage sludge in energy production – Case: Satakunta University of Applied Sciences

Bachelor's thesis

Energy and environmental engineering

April 2024

Number of pages: 34

Satakunta University of Applied Sciences planned to implement a closed water cycle in two toilets on the Pori campus, where the wastewater from the facilities would be cleaned and returned the toilet seats as flushing water. The purpose of this thesis was to find out whether the sludge created from the purification of wastewater could have been used as an energy source to cover some of energy consumption of the Pori campus. The literature review discussed the status of sludge utilization, legislation, and different processing methods. In the case section, the suitability of the methods for using sludge as an energy source was evaluated in the case of Satakunta University of Applied Sciences.

In 2020, about 135 000 t of dry weight sludge was produced in Finland. Most of it was fermented anaerobically or aerobically composted. The biogas obtained from anaerobic fermentation could be used as an energy source in combustion. Only a small amount of sludge was combusted and there were only a few combustion plants in Finland that used sludge as fuel. Most of the processed sludge was used in agriculture and green area development.

The sludge could be treated aerobically by composting and anaerobically fermented. Chemical treatment methods included lime stabilization and kemicond treatment, which changed the sludge into hygienic and in easier form for further processing. The sludge could also be thermally processed. Such methods included thermal drying, hydrothermal carbonization, pyrolysis, torrefaction, and gasification. These methods did not produce energy, but rather dried and converted the sludge into a more manageable form that could later be burned.

Sludge could also be burned. In co-combustion, the sludge had almost no effect on the amount of energy produced, but the sludge was mainly burned to get rid of it. Waste combustion plants could burn small amounts of sludge together with other feed. Only one waste combustion plant in Finland processed sludge. In addition, the sludge could also be burned separately without any other input. In Finland, there was one plant in Rovaniemi that could combust sludge separately operating with PAKU technology.

The closed water cycle of Satakunta University of Applied Sciences' Pori campus could have produced only 12,8 kg TS/a of sludge. With such a small amount of sludge there would not have been much benefit from utilizing the sludge as an energy source. Hence, collecting the sludge as an energy source would not have been profitable.

Keywords: Sewage sludge, sludge, anaerobic fermentation, composting, combustion, hydrothermal carbonization, pyrolysis, torrefaction, gasification

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	5
2 YHDYSKUNTALIIETTEEN HYÖDYNTÄMISEN NYKYTILANNE SUOMESSA	6
3 LAINSÄÄDÄNTÖ	8
4 YHDYSKUNTALIIETTEEN KÄSITTELYMENETELMÄT	10
4.1 Kompostointi.....	11
4.2 Mädätys.....	12
4.3 Kemialliset käsittelymenetelmät	13
4.3.1 Kemicond-käsittely.....	13
4.3.2 Kalkkistabilointi	14
4.4 Poltto	14
4.4.1 Poltto erillispolttolaitoksissa	15
4.4.2 PAKU-prosessi	18
4.4.3 Poltto yhteispolttolaitoksissa	20
4.4.4 Jätteenpolttolaitokset	21
4.5 Muut termiset käsittelymenetelmät	21
4.5.1 Terminen kuivaus	21
4.5.2 Märkähiilto (HTC).....	23
4.5.3 Pyrolyysi	25
4.5.4 Torrefiointi.....	26
4.5.5 Kaasutus.....	27
5 CASE: SATAKUNNAN AMMATTIKORKEAKOULU	30
5.1 Menetelmien vertailu	32
6 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET	34

1 JOHDANTO

Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla puhdistetaan vuosittain noin 500 miljoonaa kuutiometriä jätevettä. Yhdyskuntaliete on jäteveden puhdistamoilla jätevedestä erotettavaa jätettä. Sitä syntyy vuosittain n. 135 000–140 000 tonnia kuiva-ainepainona (Total Solids, TS).

Tällä hetkellä lähes puolet syntyvästä lietteestä sekä mädätetään että kompostoidaan. Tämän lisäksi pelkästään mädätykseen menee noin kolmasosa lietteestä vuosittain. Noin viidesosa kaikesta lietteestä pelkästään kompostoidaan. Näiden lisäksi pieniä määriä lietettä poltetaan tai käsitellään termisesti tai kemiallisesti. Käsitelty liete hyödynnetään yleensä maataloudessa tai viherkentämissä. Lietettä käytetään myös kaatopaikkojen maisemointiin. Vain pieni osa jää varastoihin.

Lietteestä on mädätyksen ja kaasutuksen avulla mahdollista saada kaasuja, joita voi hyödyntää energianlähteenä. Tämän lisäksi lietettä on mahdollista polttaa eri metodein. Muiden termisten käsittelymenetelmien avulla lietteen ominaisuuksia voidaan parantaa polttoa varten.

Satakunnan ammattikorkeakoulu suunnitteli Porin kampukselle suljettua vesikiertoa, jossa kahden WC-tilan harmaat ja mustat jätevedet olisi puhdistettu ja palautettu WC-tilojen WC-istuinten huuhteluvedeksi. Suljettu kierto ei toteutunut, eikä sitä ole tarkoitus toteuttaa, mutta jos se olisi toteutettu, niin siitä syntyvää lietettä olisi mahdollisesti voitu hyödyntää energianlähteenä. Tässä työssä pyritään selvittämään, olisiko lietteellä voitu kattaa osa kampuksen energiantarpeesta.

2 YHDYSKUNTALIETTEEN HYÖDYNTÄMISEN NYKYTILANNE SUOMESSA

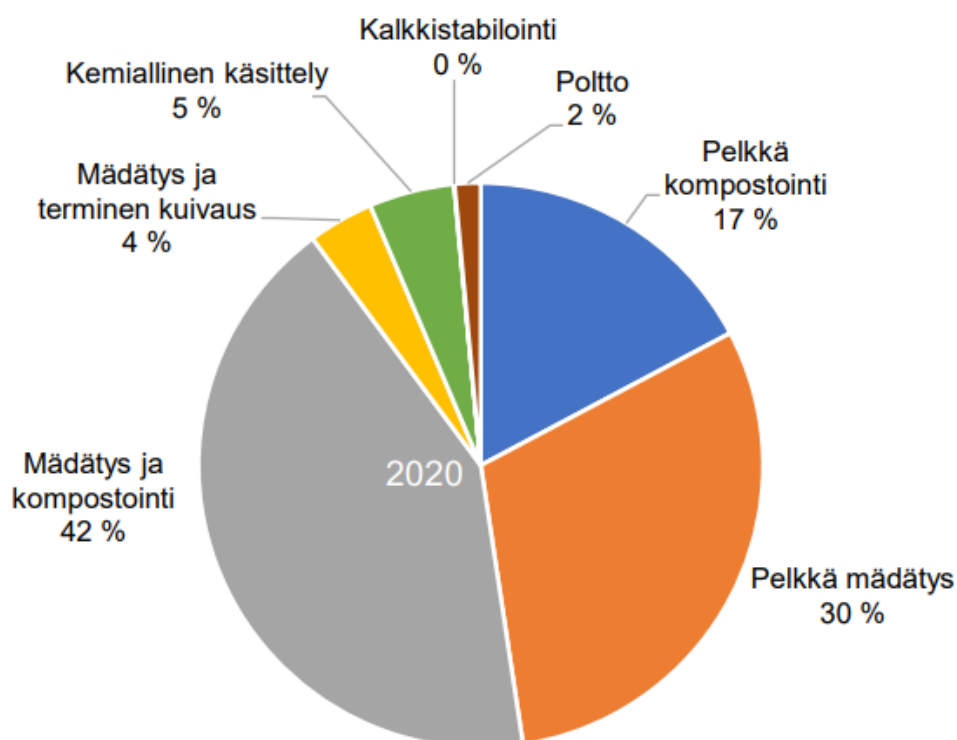
Jätevedenpuhdistamoilla käsitellään vuosittain noin 500 miljoonaa kuutiometriä jätevettä (Laitinen, Nieminen, Saarinen & Toivikko 2014, s. 8). Yhdyskuntaliete on jätevedenpuhdistusprosessissa muodostuvaa jätettä, johon päätyy kaikki jätevedestä poistettu materiaali välppäyksen ja hiekanerotuksen jälkeen. Prosessista poistetaan raakaliettä esiselkeytyksestä ja ylijäämäliettä ilmastusaltaasta tai jälkiselkeyttimestä. Näistä raakaliete on raskaampaa, nopeammin laskeutuvaa ja helpommin kuivattavaa, kun taas ylijäämäliete sisältää enemmän biologista materiaalia, minkä vuoksi sen laskeutuvuus on hitaampaa ja kuivuminen hankalampaa. Näiden lietteiden yhdistelmää kutsutaan sekalietteeksi. (Laitinen, Nieminen, Saarinen & Toivikko 2014, s. 51.)

Vuonna 2012 tilastokeskuksen selvityksen mukaan puhdistamolietettä syntyi Suomessa miljoona tonnia, joka vastaa kuivapainoltaan 141 200 tonnia lietettä (Tilastokeskus 2014, s. 144). Vuonna 2020 lietteen kokonaismääräksi on arvioitu 812 700 tonnia, joka vastaa kuivapainolta 135 000 tonnia lietettä vuodessa. Yhdyskuntaliettä käsitteleviä laitoksia oli vuonna 2020 yhteensä 96 kappaletta, joista suurin osa (76 kappaletta) oli kompostointilaitoksia ja noin kolmasosa biokaasulaitoksia. Näiden lisäksi kemiallisesti käsitteleviä laitoksia oli 3–4 kappaletta ja termisiä kuivauslaitoksia 2–3 kappaletta. Kolme laitosta myös poltti lietettä. (Vilpanen & Seppälä 2021, s. 6–7.) Taulukkoon 1 on koottu havainnollistamaan erilaisten lietteenkäsittelylaitosten määrät vuosina 2019 ja 2020.

Taulukko 1. Lietettä käsittelevien laitosten määrät Suomessa vuonna 2020 (Vilpanen & Seppälä 2021, s. 6–7)

Laitoksen tyyppi	Laitosten lukumäärä
Biokaasulaitokset	23
Kompostointilaitokset	76
Kemiallinen käsittely	3–4
Termiset käsittelylaitokset	2–3
Polttolaitokset	3
Yhteensä	96

Vilpanen, M. ym. (2021, s. 8) Suomen Vesilaitosyhdistykselle toteuttamassa selvityksessä yhdyskuntalietteen hyödyntämisestä tarkastellaan koko lietteen käsittelyketju puhdistamolta hyötykäyttöön. Siitä tulee ilmi, että suurin osa lietteestä mädätetään biokaasulaitoksissa. Lähes puolet lietteestä sekä mädätetään että kompostoidaan. Pelkästään kompostointiin menee 17 % lietteestä ja 30 % pelkästään mädätetään. Lietteestä 4 % mädätetään ja termisesti kuivataan ja pelkästään kemiallisesti käsitellään 5 % lietteestä. Pienimmät käsittelymenetelmät ovat kalkkistabilointi (0 %) ja poltto, jonka osuus on 2 % koko lietemäärästä. Kuvaan 1 on koottu lietteenkäsittelymenetelmien prosenttiosuudet. Suurin osa käsittelystä lietteestä hyödynnetään tällä hetkellä maataloudessa sekä viherrakentamisessa. Näiden lisäksi lietettä käytetään kaatopaikkojen maisemointiin sekä alle kymmenesosa jää varastoon.



Kuva 1: Lietteen käsittelymenetelmien prosenttiosuudet lietteen kokonaismäärästä vuonna 2020 (Vilpanen & Seppälä 2021, s. 8)

3 LAINSÄÄDÄNTÖ

Yhdyskuntalietteen käsittelyä, hyödyntämistä ja varastointia säädellään kansallisen lainsäädännön avulla. Lietteen käsittelyn ja kierrätyksen kannalta oleellisia lakeja ja asetuksia ovat jätelaki (646/2011), valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta (151/2013) sekä valtioneuvoston asetus kaatopaikoista (331/2013).

Jätelaki (646/2011) luokittelee yhdyskuntajätteeksi vakinaisessa ja vapaa-ajan asunnossa sekä asuntolassa ja muunlaisessa asumisessa syntyvän jätteen. Yhdyskuntaliete kuuluu jätelain piiriin. Yhdyskuntaliete on jätelain mukaan käytöstä poistettua ainetta. Lain mukaan liete voidaan hyödyntää raaka-aineena ja energiana. Jos lietettä ei voida hyödyntää se loppusijoitetaan. Lietteen kuivaaminen ennen polttoa katsotaan jo jätteen hyödyntämiseksi, jossa liete valmistellaan polttoa varten. Polttaminen on varsinaista lietteen hyödyntämistä, sillä siinä liete korvaa tuotantolaitoksella tavanomaisia polttoaineita. (Jätelaki 646/2011, 5 luku 6 § mom. 1.)

Valtioneuvoston asetuksessa jätteen polttamisesta määritetään, että jätteen polttoprosessissa syntyvä lämpö on hyödynnettävä mahdollisimman tarkasti. Polttoprosessissa käytettävä liete on tarvittaessa esikäsiteltävä, jotta kuonaan ja pohjatuhkaan jäävän orgaanisen hiilen kokonaismäärä jää alle kolmen prosentin. Savukaasun lämpötilan on oltava kaikkein epäedullisemmissakin olosuhteissa vähintään 850 °C ainakin kahden sekunnin ajan. Savukaasun lämpötila mitataan palamiskammion sisäseinän läheisyydestä tai ympäristöluvassa määrätystä palamiskammion kohdasta. Jätteen erillispolttolaitoksessa 850 °C lämpötila on saavutettava polttoilman viimeisen syötön jälkeen. (Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta 151/2013, 8 § 8–9.)

Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista pyrkii ehkäisemään maaperän, pohja- ja pintaveden ja ilman pilaantumista kaatopaikkojen takia. Asetus säättää yhdyskuntalietteestä seuraavasti: jätettä, jonka orgaanisen hiilen kokonaismäärä

on yli 10 %, ei voi vuodesta 2016 eteenpäin sijoittaa kaatopaikalle. (Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013 28 §.)

4 YHDYSKUNTALIIETTEEN KÄSITTELYMENETELMÄT

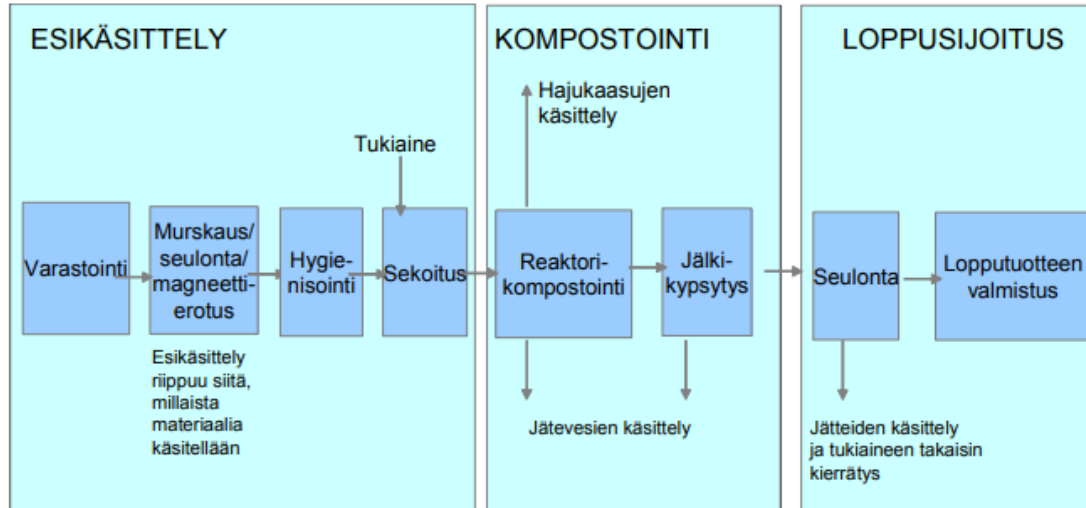
Tässä kappaleessa käsitellään erilaisia menetelmiä, joita käyttämällä lietettä on mahdollista hyödyntää energiantuotannossa. Alla olevaan taulukkoon 2 on kerätty keskeisimmät tiedot jokaisesta käsittelymenetelmästä. Keltasella pohjalla on esitetty hajoamiseen perustuvat prosessit, vihreällä on esitetty polttoon perustuvat ja punaisella muut termiset käsittelymenetelmät. Menetelmien tarkemmat tiedot ja käytetyt lähteet on esitetty edempänä kappaleessa.

Taulukko 2. Keskeisimmät tiedot eri lietteen käsittelymenetelmistä

Tekniikka	Sopii energiantuotantomenetelmäksi	Lämpötila	Viipymäaika	Lämmön-tarve	Sähkön-tarve	Laitoskoko	Menetelmän valmius
Kompostointi	Ei	55 °C	Vähintään 14 vuorokautta		40–60 kWh/t	300–49 000 t/a	Laajasti käytössä
Mädätys	Kyllä	Mesofiilinen n. 37 °C Termofiilinen 55 °C	21 vuorokautta	350 kWh/t lietettä	437 kWh/t lietettä		Laajasti käytössä
Erillispoltto	Kyllä	850–950 °C	2–10 sekuntia	10 kWh/t lietettä	75–80 kWh/t lietettä	Yleensä 40 000–400 000 t/a 23–33 % TS lietettä	Laajasti käytössä
PAKU-prosessi	Kyllä	850 °C	2–10 sekuntia			Yli 10 000 t/a TS 30 % lietettä	Suomessa yksi täyden mittakaavan laitos
Yhteispoltto	Kyllä	Vähintään 850 °C	2–10 sekuntia			Vähintään 5 000 t/a 30 % TS lietettä	Suomessa kolme lietettä yhteispoltossa käsittelevää laitosta.
Jätteenpolttolaitokset	Kyllä	Vähintään 850 °C	2–10 sekuntia				Suomessa yksi lietettä käsittelevä jätteenpolttolaitos.
Terminen kuivaus	Ei	70–180 °C	30–120 minuuttia	0,8–1,1 kWh / kg H ₂ O	4–5 kWh/m ³ lietettä	3 000–100 000 t/a 30 % TS lietettä	Suomessa muutama laitos hyödyntää termistä kuivausta. Laajasti tunnettu menetelmä
Märkähiilto	Ei	180–250 °C	2–5 tuntia	170 kWh/t lietettä	26 kWh/t lietettä	7 000–25 000 t/a 30 % TS lietettä	Suomessa yksi täyden mittakaavan märkähiiltoaitos.
Pyrolyysi	Ei	350–700 °C	10–60 minuuttia	550–800 kWh/t lietettä	60–90 kWh/t lietettä	5 000–300 000 t/a 30 % TS lietettä	Muutamia täyden mittakaavan pyrolyysilaitoksia. Suomessa ei vielä käytössä.
Torrefiointi	Ei	200–350 °C	5–60 minuuttia	550–800 kWh/t lietettä	60–90 kWh/t lietettä	Yli 15 000 t/a 30 % TS lietettä	Biomassan käsittelyyn muutamia torrefiointilaitoksia. Lietteelle tutkimusasteessa.
Kaasutus	Ei	800–900 °C	2–10 sekuntia		120 kWh/t lietettä	7 000–35 000 t/a 30 % TS lietettä	Melko uusi menetelmä. Maailmalla kolme täyden mittakaavan laitosta.

4.1 Kompostointi

Kompostointi on aerobisissa olosuhteissa tapahtuva hajoamisprosessi. Se on tällä hetkellä mädätyksen ohella yleisimpiä puhdistamolietteen käsittelymenetelmiä Suomessa. Se on suhteellisen yksinkertainen prosessi, joten sitä on helppo ylläpitää ja hoitaa. Ennen kompostoinnin aloittamista puhdistamolietteeseen lisätään seosaineita, kuten turvetta tai haketta. Kompostoitava massa vapauttaa hiilidioksidia, vettä, ravinteita sekä lämpöenergiaa. Oikein hoidettuna kompostointiprosessista vapautuva lämpöenergia nostaa massan lämpötilan 55 °C:een, joka on riittävä lämpötila massan hygienisoimiseen. Kompostoinnin aikana monet orgaaniset lika-aineet hajoavat, esimerkiksi polysyklisten hiilivetyjen (PAH) on havaittu hajoavan tehokkaasti. Lietteessä olevien haitallisten aineiden pitoisuuden voidaan ajatella laimenevan, kun lietteeseen lisätään seosaineita. Kompostoitu liete voidaan hyödyntää esimerkiksi viherrakentamisessa. (Laitinen, Alhola, Manninen & Säylä 2014, s. 28–29.) Kompostoinnin lohkokaavio on esitetty kuvassa 2.



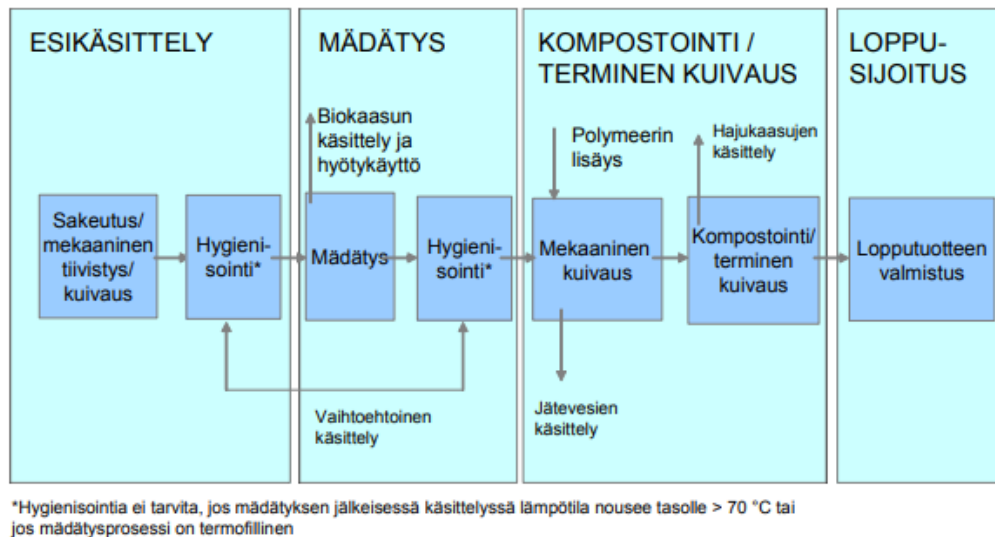
Kuva 2: kompostointi lohkokaavio (Pöry Environment 2007, s. 14)

Kompostointilaitokset eivät tuota laitoksen ulkopuolella hyödynnettävää energiaa. Prosessissa syntyvä lämpö hyödynnetään prosessiin syötettävän ilman lämmitykseen. Kompostoinnin sähköenergian tarve on noin 40–60 kWh/t lietettä. Laitoskooltaan kompostointilaitokset vaihtelevat suuresti ja voivat

käsitellä 300–49 000 tonnia lietettä vuodessa. (Pöyry Environment 2007, s. 16–18.)

4.2 Mädätys

Mädätyksessä liete käy läpi käsittelymenetelmaketjun, joka koostuu esikäsitteystä, mädätyksestä, mädätetyn lietteen käsittelystä ja loppusijoituksesta. Puhdistamolietettä mädättäessä lietteen esikäsitteily, eli sakeuttaminen, tapahtuu gravitaatiotiivistimessä tai mekaanisella tiivistimellä. Gravitaatiotiivistin on perinteisempi metodi lietteen sakeuttamiselle, mutta mekaanisilla tiivistimillä saadaan nostettua lietteen syöttösakeutta, pienennettyä käsiteltävää lietemäärää ja pidennettyä mädättämön viipymää. Itse mädätys tapahtuu hapettomassa tilassa, suljetussa reaktorissa. Prosessiin käytetyn lämpötilan perusteella mädätystä kutsutaan joko mesofiiliseksi (n. 37°C) tai termofiiliseksi (55°C). Mesofiilinen mädätys on näistä enemmän käytetty metodi. Lietteiden lämmitykseen käytetään joko lämmönvaihtimia tai höyryä. Mädätysprosessi kestää 21 vrk, jonka aikana bakteerit muuttavat orgaanista ainetta metaanipitoiseksi biokaasuksi ja näin lietteen kiintoainemäärä pienenee. Prosessissa syntyy myös stabiilia ja helposti kuivattavaa lietettä. Mädätetty liete kuivataan esim. lingolla, suotonauhapuristimella tai ruuvipuristimella ja sitä voidaan käyttää maanparannusmädätteenä stabiloinnin jälkeen tai sellaisenaan maanparannusaineena. (Pöyry Environment 2007, s. 19–20.) Mädätyksen lohkokaavio on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3: Mädätyksen lohkokaavio (Pöry Environment 2007, s. 19)

Mädätyksestä saadaan biokaasua, joka koostuu pääasiallisesti metaanista (60–70 %), hiilidioksidista (30–40 %) ja vähäisistä määristä muita kaasuja. Syntynyttä biokaasua voidaan hyödyntää lämmityksessä, lämmön ja sähkön yhteistuotannossa tai liikennepolttoaineena. (Pöry Environment 2007, s. 24.) Syntyvä biokaasu on lämpöarvoltaan noin 25 MJ/m³. Termofiilinen mädätys kuluttaa sähköenergiaa 437 kWh/t ja lämpöenergiaa 350 kWh/t. (Aatsinki 2021, s. 29.)

4.3 Kemialliset käsittelymenetelmät

Kemiallisia käsittelymenetelmiä ovat Kemicond-käsittely ja kalkkistabilointi. Molemmat menetelmät soveltuvat myös pienten laitosten lietteen käsittelyyn. Käsiteltyä lietettä voidaan hyödyntää maanparannusaineena.

4.3.1 Kemicond-käsittely

Kemicond-käsittely on menetelmä, jossa voidaan käyttää raakalietettä joko sa-keuttamalla tai mädättämällä käsiteltyä lietettä. Siinä lietteen pH lasketaan rik-kihapon (H₂SO₄) avulla neljään, jolloin lietteen geelimäinen rakenne alkaa ha-joamaan. Samalla liukenevat myös metallisuolat, kuten rautafosfaatti ja -hyd-roksidit. Tämän jälkeen liete hapetetaan vetyperoksidilla (H₂O₂), jonka

seurauksena kahdenarvoinen ferrorauta hapettuu kolmenarvoiseksi ferriraudaksi, joka saostaa fosfaatti-ionit ferrifosfaattina. Samalla lietteen geelimäinen rakenne jatkaa edelleen hajoamista, jolloin lietteestä vapautuu vettä. (Pöyry Environment 2007, s. 33.)

Seuraavaksi käsitelty liete neutraloidaan natriumhydroksidilla (NaOH). Lietteeseen lisätään myös kuivausta tehostavaa polymeeriä, jonka jälkeen liete voidaan kuivata ruuvipuristimella, suotonauha- tai kammiopuristimella tai lingolla. Käsitelty liete on hygienisoitua, rakeista, lähes hajutonta ja tarttumatonta, joten sitä on helppo varastoida, käsitellä ja kuljettaa. Käsitelty liete soveltuu maanparannusaineen lisäksi kompostoitavaksi ja poltettavaksi. (Pöyry Environment 2007, s. 33–35.)

4.3.2 Kalkkistabilointi

Kalkkistabilointia käytetään puhdistamolietteen hygienisointiin. Siinä lietteeseen lisätään joko poltettua (CaO) tai sammutettua (Ca(OH)₂) kalkkia. (Berninger 2018, 4). Poltettua kalkkia käytetään kuivatulle lietteelle. Tällöin kalkki reagoi lietteeseen sitoutuneen veden kanssa nostaen lietteen pH:n tasolle 12 ja lämpötilan yli 60 °C:een. Sammutettua kalkkia käytetään sekä kuivattuun että märkään lietteeseen, jolloin pH nousee, mutta lämpötila pysyy samana. Korkea pH pysäyttää lietteessä tapahtuvat biologiset prosessit, jolloin myös orgaanisten haitta-aineiden biohajoaminen loppuu. Kalkkistabiloitua lietettä voidaan käyttää maatalouteen ja viherrakentamiseen. (Laitinen ym. 2014, s. 29; Pöyry Environment 2007, s. 36.)

4.4 Poltto

Lietteen poltto on prosessi, joka koostuu lietteen esikäsitteystä mekaanisella ja termisellä kuivauksella, poltosta ja tuhkan loppukäsitteystä (Pöyry Environment 2007, s. 29). Lietteen polttamista rajoittavat lietteen korkea vesipitoisuus ja matala lämpöarvo, jotka laskevat palamislämpötilaa. Lietteen polttamista

rajoittavat myös sen likaavuus ja tuhkan käyttäytyminen. (Pöyry Environment 2007, s. 31.)

Lietteen esikäsitteilyn tarkoituksena on poistaa lietteestä vettä. Lietteen kuiva-ainepitoisuuden tulisi periaatteessa olla mahdollisimman korkea, mutta optimaalinen kuiva-ainepitoisuus vaihtelee tapauskohtaisesti. Pienehköjä lietemääriä voidaan syöttää teollisuudessa muun kiinteän polttoaineen joukkoon 20–30 % kuiva-ainepitoisuudella. (Pöyry Environment 2007, s. 30.)

Eri jakeiden välisten seossuhteiden määrittäminen on eri polttotekniikoiden mitoituksen kannalta tärkeää. Lietteen osuus eri laitoksilla vaihtelee lietteen laadusta ja muusta poltettavasta materiaalista riippuen, sillä tukipolttoaineiden ja muodostuvien savukaasujen määrän määrittää poltettavan lietteen kuiva-ainepitoisuus. (Pöyry Environment 2007, s. 30.)

Liete kannattaisi polttaa ensisijaisesti rinnakkaispolttona leijupolttokattilassa ja toissijaisesti erikseen lietteen syntypaikan yhteydessä. Arinapolttolaitoksella polttaminen on kallista, koska lietteellä on korkea vastaanottomaksu sekä lietteen esikäsitteilyvaatimukset ovat leijupolttolaitosta korkeammat. (Pöyry Environment 2007, s. 31.)

Lietteen poltossa syntyvän tuhkan yleisin loppusijoituskohde on kaatopaikka, jota ennen tuhka tulee käsitellä stabiiliksi. Joissain tapauksissa tuhkaa voidaan myös hyödyntää tiilien ja sementin valmistuksessa sekä täyteaineena tien rakennukseen. Tuhkasta on myös mahdollista erottaa fosforia lannoitteiden valmistukseen. (Pöyry Environment 2007, s. 30–31.)

4.4.1 Poltto erillispolttolaitoksissa

Erillispoltolla tarkoitetaan lietteen polttamista laitoksissa, joissa lietteen lisäksi ei polteta muita polttoaineita. Termisesti kuivattu liete poltetaan aerobisissa, eli hapellisissa, olosuhteissa. Jätteenpolttoasetuksen mukaisesti lämpötilan tulee olla vähintään 850 °C ja viipymääjan tulee olla yli 2 sekuntia. Tyypillisesti

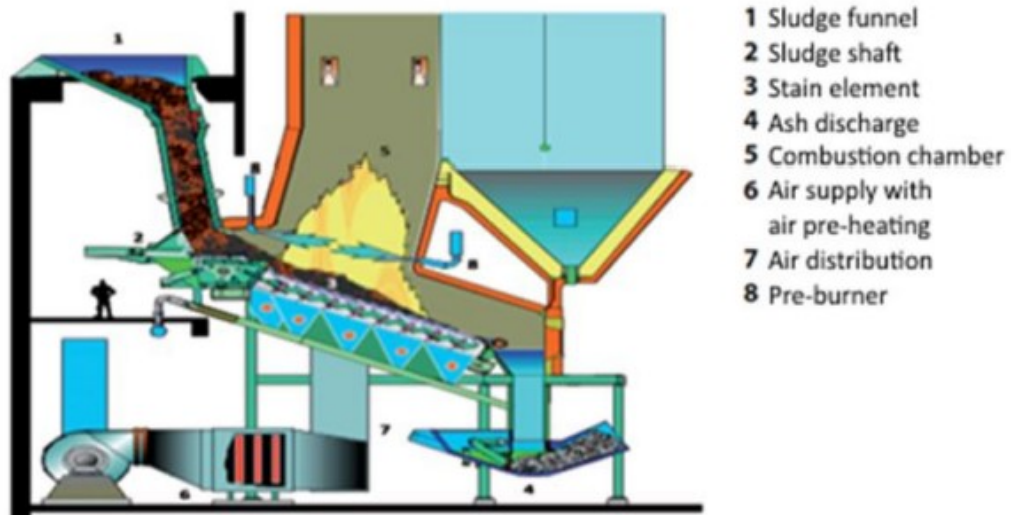
lämpötila on 850–950 °C ja viipymäaika 2–10 sekuntia. Alle 850 °C lämpötilassa voi ilmetä hajuhaittoja, ja yli 950 °C lämpötilassa tuhka voi sintrautua. Polton lämpötilaan vaikuttavat mm. lietteen lämpöarvo, paloilman määrä ja happipitoisuus. (Pöyry Finland 2019, s. 63.)

Lietettä voidaan polttaa usealla eri tekniikalla, mutta yleisimmin käytetty tekniikka lietteen erillispoltossa ovat leijupetikattilat. Muita käytössä olevia polttotekniikoita ovat mm. arinakattilat, syklounit, pyöröunit sekä pyörivät ja kuplaleijupetiuunit. (Pöyry Finland 2019, s. 63.)

Polton tuottamaa lämpöenergiaa voidaan siirtää höyryyn, jolloin sitä voidaan hyödyntää sähkön ja lämmön tuotannossa. Tyypillisesti kuitenkin valtaosa lietteenpolttolaitoksissa syntyvästä energiasta käytetään lietteen kuivauksen tarpeisiin (Pöyry Finland 2019, s. 63.)

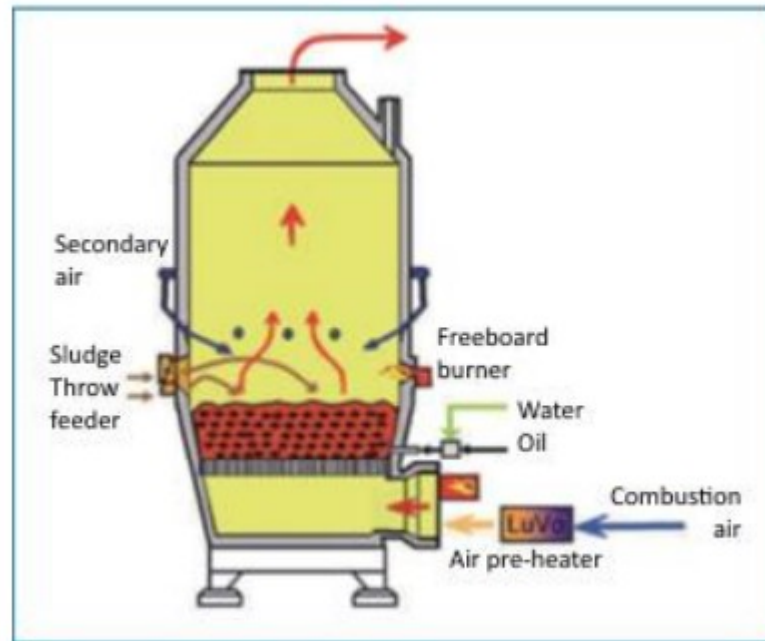
Arinapoltossa kiinteää polttoainetta syötetään arinalle, ja polttoaine kulkee sen päällä polttokattilan lävitse. Lietteiden poltossa arinakattiloita käytetään yleisimmin yhteispolttolaitoksilla, mutta myös erillispolttoa on kokeiltu arinapolttokattiloissa pienehkössä mittakaavassa (Pöyry Finland 2019, s. 64.)

Arinapolttolaitoksilla lietteen kuiva-ainepitoisuuden tulisi olla vähintään 45 %. Lietteiden polttoa arinakattilassa tulee aina tarkastella tapauskohtaisesti, sillä kattilaan syötettävien muiden polttoaineiden koostumus, lietteiden suhteellinen osuus ja syöttötapa vaikuttavat polttamiseen. Normaalisti arinapolttolaitoksiin voidaan vastaanottaa kuivattua lietettä alle 20 % tulevasta materiaalmäärästä. (Pöyry Environment 2007, s. 31.) Arinapolton periaatekuva on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4: Arinapolton periaatekuva (Pöyry Finland 2019, s. 64)

Lietteen polttoon parhaiten soveltuva menetelmä on leijupetitekniikka, jolla voidaan polttaa myös märkää lietettä, mikäli sen määrä on alle 10 % tulevasta materiaalmäärästä. Kuivan lietteen määrä pitäisi olla alle 20 % tulevasta materiaalista. Tekniikalla voidaan polttaa myös lietepölyä, mutta tällöin tulee huomioida pölyräjähdysriski (Pöyry Environment 2007, 31). Menetelmässä polttokattilaan muodostetaan poltettavasta materiaalista ja leijupetihiekasta peti, joka leijuu leijukerroksen alapuolelle johdettavan ilman avulla. Menetelmästä on useita variaatioita, joista stationäärinen leijupeti on eniten käytetty. Tekniikka vaatii suuren laitoksen ja sillä on korkeat investointi- ja käyttökustannukset. Leijupetikattilan periaatekuva on esitetty kuvassa 5 (Pöyry Finland 2019, s. 63.)



Kuva 5: Leijupetikattilan periaatekuva. (Pöyry Finland 2019, s. 64)

Lietteen erillispolttolaitokset ovat yleensä suuria. Laitoskoot ovat yleensä 40 000–400 000 t lietettä/a (23–33 % TS) (Pöyry Finland 2019, s. 66). Lietteen erillispoltolla harvoin tuotetaan merkittävää määrää energiaa johtuen lietteen korkeasta kosteuspitoisuudesta. Yleensä pyrkimyksenä on autoterminen poltto, eli tilanne, jossa lietteen lämpöarvo riittää itse palamisprosessin ja myös termisen kuivauksen lämmöntarpeen kattamiseen. Tämä vaatii lietteeltä vähintään 3,5 MJ/kg lämpöarvoa. Riittävä lämpöarvo yleensä saavutetaan, kun lietteen kuiva-ainepitoisuus on 35 % TS. Lietettä ei kuitenkaan aina saada tarpeeksi kuivaksi, joten laitoksissa on varauduttu apupolttoaineen syöttöön käynnistyksen ohella myös tarvittaessa normaalissa polttoainetilanteessa. Leijupetipoltossa sähkönkulutus on arviolta 75–80 kWh/t lietettä (25–27 % TS). Apupolttoaineen kulutus on noin 10 kWh/t lietettä (25 % TS) (Pöyry Finland 2019, s. 69–70.)

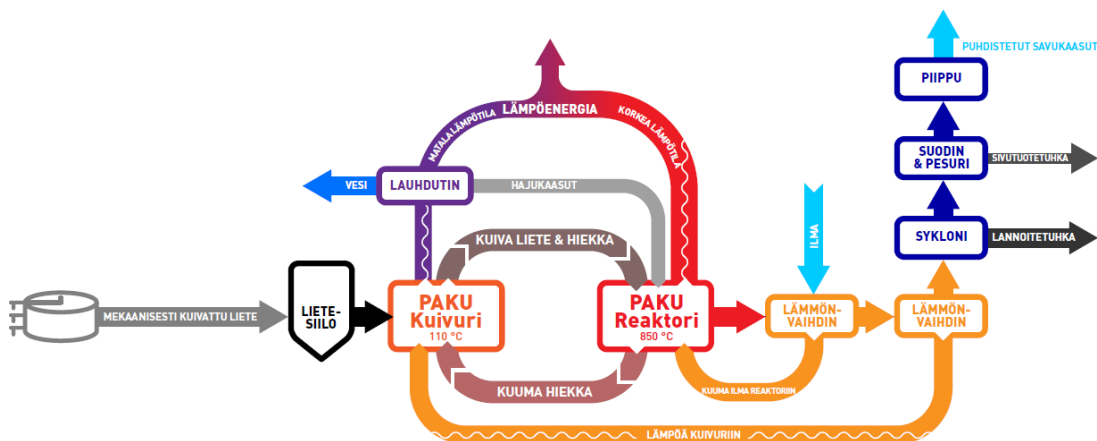
4.4.2 PAKU-prosessi

Suomalainen Endev Oy on cleantech-yritys, jonka niin kutsuttu PAKU-prosessi mahdollistaa lietteen polton. Prosessin ansiosta lietteeseen sitoutuneet

haitalliset aineet saadaan poistettua ja hyödylliset lannoitteet, kuten fosfori ja typpi, saadaan hyödynnettyä. (Endev Oy:n www-sivut 2024.)

Prosessi alkaa mekaanisesti kuivatun lietteen syöttämisellä kiertomassakuivuriin, jossa lietteen joukkoon sekoitetaan hiekkaa ja liete kuivataan yli 95 % kuiva-ainepitoisuuteen. Tämän jälkeen hiekka ja liete johdetaan seoksena 850 °C polttoyksikköön. Tässä lämpötilassa lietteeseen sitoutuneet haitalliset orgaaniset yhdisteet tuhoutuvat. Hiekka palautetaan polttoyksiköstä takaisin kuivuriin, ja savukaasut johdetaan lämmönvaihtimien kautta savukaasujen käsittelyyn. Savukaasuista poistetaan tuote- ja sivutuotetuhka ja pestään rikkiyhdisteet ennen kuin ne syötetään savupiippuun. Syklonilla erotettua, ns. tuotetuhkaa, suunnitellaan hyödynnettävän lannoitteena. Tuotetuhkan osuus on noin 90 % koko tuhkamäärästä. Savukaasujen käsittelystä syntyvä sivutuotetuhka sisältää mm. raskasmetalleja, eikä sitä voida hyödyntää lannoitteena. (Pöyry Finland 2019, s. 64–65.)

Prosessista syntyvää lämpöenergiaa, ja reaktorista ja lauhduttamalla kuivurista syntyvää höyryä voidaan käyttää kaukolämpöverkossa. PAKU-prosessi on valmistajan mukaan energiaomavarainen, kun lietteen kuiva-ainepitoisuus on vähintään 20 %. Prosessin kulku on tarkemmin havainnollistettu kuvassa 6. (Endev Oy:n www-sivut 2024.)



Kuva 6: PAKU-prosessi (Endev Oy:n www-sivut 2024)

Rovaniemellä Napapiirin Energia ja Vesi aloitti PAKU-prosessiin perustuvan lietteenpolttolaitoksen koekäytön heinäkuussa 2019. Yhdestä tonnista liettä

voidaan tuottaa 1 MWh:n verran lämpöenergiaa, jota voidaan hyödyntää kaukolämpönä tai tarvittaessa sähköntuotannossa. Prosessissa syntyvä lämpö riittää 300–400 omakotitalon lämmitykseen. (Endev Oy 2019.)

PAKU-tekniikka soveltuu pienelle kapasiteetille. Rovaniemen polttolaitoksen kokoluokka on 12 000 t lietettä/a (20–25 % TS). PAKU-laitosten arvioidaan olevan kannattavia, kun lietemäärä on yli 10 000 t lietettä/a (30 % TS). (Pöyry Finland 2019, s. 66.)

4.4.3 Poltto yhteispolttolaitoksissa

Yhteispoltossa ensisijaisena tavoitteena on lietteen hävittäminen. Lietettä saa polttaa vain kattiloissa, jotka täyttävät jätteen polton määräykset ja joiden ympäristöluvassa liete on hyväksytty polttoaineeksi. (Pöyry Finland 2019, s. 71.)

Yhteispoltossa termisesti tai mekaanisesti kuivattua lietettä poltetaan muiden polttoaineiden, jätteiden tai lietteiden kanssa. Lietteelle tarvitaan yleensä omat vastaanotto- ja syöttöjärjestelyt ja lietteen syötön tulee olla automaattisesti pysäytettävissä tarvittaessa. Lietteen korkea kosteuspitoisuus yleensä heikentää polttoprosessin energiataloutta. Tämän lisäksi lietteen poltto saattaa aiheuttaa kerrostumien muodostumista kattilan pinnoille, savukaasujen määrän lisääntymistä, korroosiota tai höyrytuotannon vähenemistä. Yhteispolttolaitoksilla käytetään pääasiassa mädätettyä lietettä, koska stabiloimaton liete on hankalaa käsitellä ja varastoida sekä aiheuttaa hajuhaittoja. (Pöyry Finland 2019, s. 72–73.)

Yhteispoltolle kannattava kokoluokka on yleensä vähintään 5 000 t lietettä/a (30 % TS). Yhteispoltossa lietteelle ei yleensä vaadita yhtä korkeaa lämpöarvoa, vaan 2,2–4,8 MJ/kg on riittävä lämpöarvo lietteelle. Lietteen yhteispoltto on laajasti käytössä oleva menetelmä, ja Suomessa lietettä poltetaan yhteispoltossa Haapavedellä, Riihimäellä ja Raumalla. (Pöyry Finland 2019, s. 75–76.)

4.4.4 Jätteenpolttolaitokset

Yhdyskuntajätteen seassa on mahdollista polttaa puhdistamolietettä pienenä osuutena. Lietteen suositeltava osuus polttoaineesta on enintään 10–20 %. Lietteen lämpöarvo on samaa suuruusluokkaa yhdyskuntajätteen kanssa, kun sen kuiva-ainepitoisuus on 65 %. Liete vaatii omat syötejärjestelyt, sillä muiden jätteiden syöttöjärjestelyt poikkeavat lietteen syöttöjärjestelyistä. Savukaasujen käsittelyyn ei lietteen poltto kuitenkaan aiheuta merkittäviä toimenpiteitä, koska vaatimukset ovat jätteen poltossa samat, vaikka polttoaineena käytettäisiin lietettä. Tällä hetkellä ainoastaan Riihimäen jätteenpolttolaitos käyttää lietettä polttoaineena. Jätteenpolton tuhkien loppusijoituskohte on kaatopaikka. (Pöyry Finland 2019, s. 72–74.)

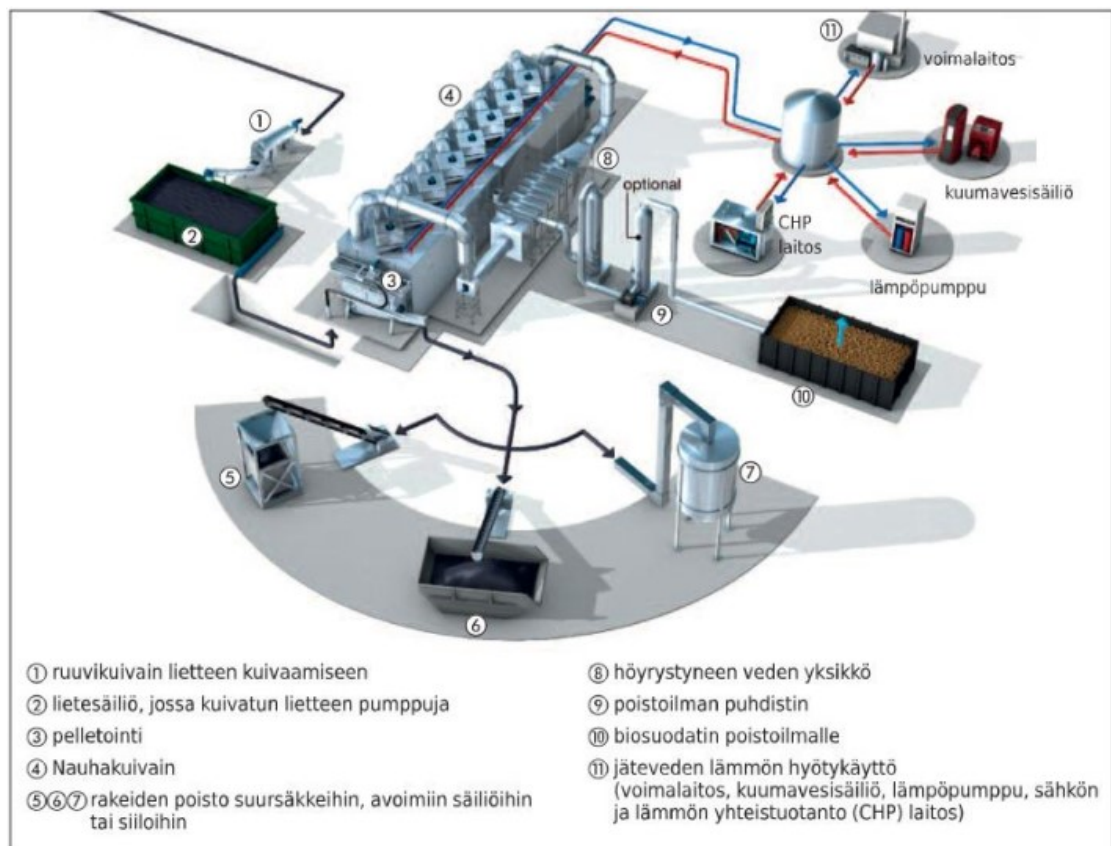
4.5 Muut termiset käsittelymenetelmät

Yhdyskuntalietettä voidaan käsitellä polttamisen lisäksi myös muilla termisillä menetelmillä. Näitä ovat terminen kuivaus, märkähiilto (HTC), pyrolyysi, torrefiointi sekä kaasutus. Nämä menetelmät ovat endotermisia, eli energiaa vaativia, eikä niitä voi käyttää suoraan energiantuotannossa. Näistä prosesseista syntyviä tuotteita voidaan kuitenkin käyttää esimerkiksi poltossa.

4.5.1 Terminen kuivaus

Termisessä kuivauksessa lietteen kosteuspitoisuutta alennetaan lämmön avulla. Menetelmää käytetään esikäsittelynä useille muille termisille käsittelymenetelmille, mutta sitä voidaan käyttää myös itsenäisenä käsittelyprosessina. Termisen kuivauksen avulla lietteen massaa saadaan laskettua ja lämpöarvoa nostettua. Menetelmän ansiosta liete saadaan myös stabiloitua ja hygienisoitua sekä lietteen käsiteltävyys ja kuljetettavuus paranevat. Liete voidaan kuivata osittain, noin 40–50 % tai 60–85 % kuiva-ainepitoisuuteen, tai täysin noin 85–95 % kuiva-ainepitoisuuteen. Haluttu kuiva-ainepitoisuus riippuu lietteen käyttötarkoituksesta. (Pöyry Finland 2019, s. 25.)

Termisessä kuivauksessa kuivaaminen tapahtuu johtamalla kuumennettua materiaalia kosketuksiin lietteen kanssa, jolloin lietteestä haihtuu vettä. Lämmönsiirtomateriaaleina voidaan käyttää esimerkiksi höyryä, termoöljyä, ilmaa, vettä tai palokaasuja. Kuivauksen lämpötila on noin 70–180 °C riippuen tekniikasta ja lämmönlähteestä. Kuivaimet voidaan jakaa matalan lämpötilan (alle 80 °C), keskilämpötilan (80–130 °C) ja korkean lämpötilan (yli 130 °C) kuivaimiin. Viipymäaika kuivauksessa on tyypillisesti 30–120 minuuttia, riippuen käytettävästä tekniikasta, lämmönsiirtoaineen lämpötilasta sekä kuivauksen tavoitetasosta. Kuivaus on yleensä tehottomampaa ja hitaampaa matalammilla lämpötiloilla, jolloin laitteet täytyy mitoittaa suuremmiksi. Myös tarvittavan lämmitys- tai ohivirtausilman määrä on matalammilla lämpötiloilla suurempi. Matalamman lämpötilan lämmönlähteitä voi olla kuitenkin jossain kohdeissa saatavilla edullisesti. Matalan lämpötilan lämmönlähteitä ovat esimerkiksi kaukolämpö ja jätelämpö. (Pöyry Finland 2019, s. 26.) Termisen kuivauksen esimerkkilaitoskokonaisuus on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7: Esimerkki termisen kuivauksen laitoskokonaisuudesta (Pöyry Finland 2019, s. 28)

Termisesti kuivattu liete voidaan käyttää sellaisenaan maanparannusaineena tai se voidaan edelleen johtaa polttoon ja muihin termisiin käsittelymenetelmiin. Liete voidaan myös rakeistaa ja näin parantaa sen käsiteltävyyttä. (Pöyry Finland 2019, s. 30.)

Termisen kuivauksen tekniikoita on olemassa useita. Pyörivässä rummussa tapahtuva rumpukuivaus on ollut käytössä 1970-luvulta lähtien ja sitä käytetään erityisesti suuren mittakaavan laitoksissa. Nauhakuivauksessa liete levitetään kuivausviiralle, jossa kuivauskaasu johdetaan sen läpi. Menetelmä on laajasti käytössä, ja Suomessa sitä käytetään Joensuun ja Haapaveden laitoksilla. Keski-Euroopassa yleinen tekniikka on aurinkokuivaus, joka soveltuu erityisesti pienille lietemäärille. Suomessa sen toimivuus on kuitenkin epävarmaa ilmasto-olosuhteiden takia. Pienimmät kaupalliset laitteet ovat suurusluokaltaan 3 000 t/a linkokuivattua lietettä ja suurimmillaan 100 000 t/a linkokuivattua lietettä. (Pöyry Finland 2019, s. 27–30.)

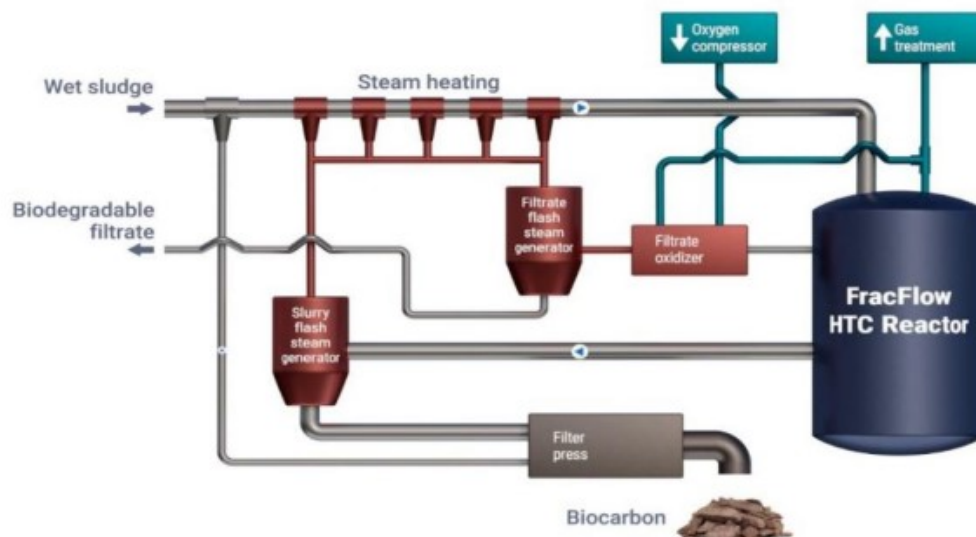
Terminen kuivaus kuluttaa lämpöenergiaa noin 0,8–1,1 kWh / kg H₂O haihduttavaa vesimäärää kohti. Lämmön lisäksi menetelmä vaatii sähköenergiaa tekniikan mukaan noin 4–5 kWh/m³ lietettä. Menetelmän taloudellinen käyttö vaatii saataville edullisen energianlähteen, jolla tuottaa termisen kuivauksen lämmöntarve. (Lehtoranta, Malila, Fjäder, Laukka, Mustajoki & Äystö 2021, s. 31.)

4.5.2 Märkähiilto (HTC)

Märkähiilto (Hydrothermal Carbonization, HTC) tarkoittaa prosessia, jossa kuiva-ainepitoisuudeltaan 8–15 % biomassa käsitellään anaerobisesti korkeassa, noin 20–35 bar:n paineessa ja noin 180–250 °C lämpötilassa. Prosessin aikana käsitelty liete saadaan kuivattua mekaanisesti n. 50–70 % kuiva-ainepitoisuuteen. Käsittelyn viipymäaika on tavallisesti noin 2–5 tuntia. (Pöyry Finland 2019, s. 34.)

Märkähiilossa märkä liete syötetään reaktoriin, jonka tilavuus pysyy vakiona eikä reaktorista poisteta kaasua reaktion aikana. Reaktorin kaasutila kyllästyy vesihöyryllä, joka johtaa paineen nousuun. Prosessissa syntyy lämpöä, mutta useimmiten lietettä täytyy lämmittää ulkoisella energialla. Käsittelyn jälkeen liete viilennetään lämmönvaihtimien avulla, jonka jälkeen liete kuivataan mekaanisesti suodatuspuristimella. Kuivattu kiintoainefraktio voidaan sen jälkeen johtaa jatkokäyttöön, joka on yleensä poltto. Kuivan märkähiilletyn lietteen lämpöarvo on sen verran korkea, että sitä voidaan polttaa ilman apupolttoainetta. Vaihtoehtoisesti märkähiillettyä lietettä voitaisiin käyttää myös maanparannusaineena. Prosessista syntyvä rejektiovesi voidaan johtaa mädättämöön, jossa veden sisältämä biohajoava aines hajoaa ja näin lisää biokaasun tuotantoa. (Pöyry Finland 2019, s. 34–36.)

Märkähiilto vapauttaa prosessin aikana lämpöä, mutta vaatii toimiakseen ulkoista energiaa. 30 % kuiva-ainepitoinen liete kuluttaa prosessissa sähköä 26 kWh/t ja lämpöä 170 kWh/t (Pöyry Finland 2019, s. 36). Esimerkkikuva märkähiiltoprosessista on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8: Esimerkki märkähiiltoprosessista (Pöyry Finland 2019, s. 35)

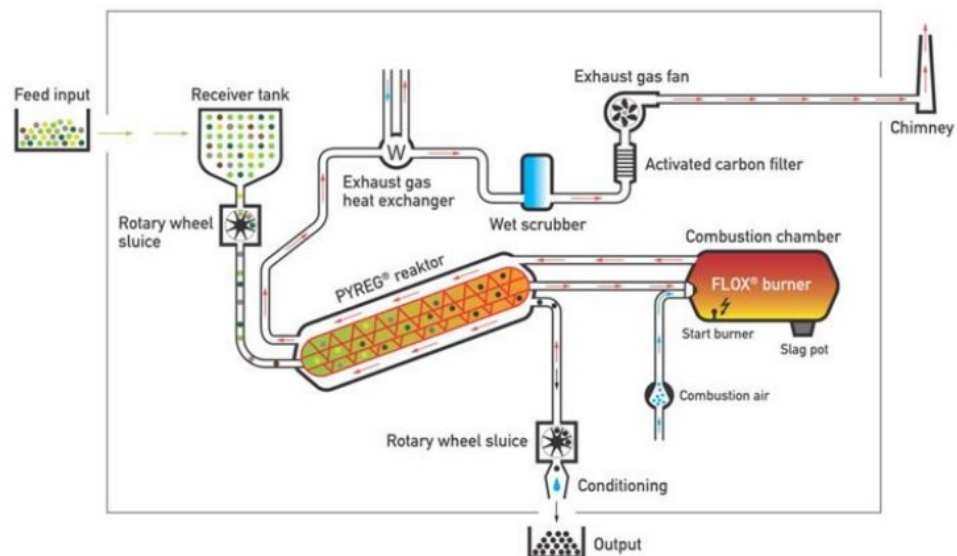
Suomessa on vuonna 2020 valmistunut Stora Enson Heinolan sellu- ja pape-ritehtaalle lietteen märkähiiltolaitos, jonka kapasiteetti on noin 25 000 t/a lietettä (kuiva-ainepitoisuus 30 %). Laitoksella on tarkoitus käsitellä sellu- ja

paperimassan valmistuksessa syntyviä biolietteitä biohiileksi, jota käytetään polttoaineena tehtaan voimalaitoksella turpeen korvaajana. (Aatsinki 2021, s. 67.) Muualla maailmalla toteutettujen märkähiiltoreaktorien suuruusluokat ovat luokkaa 7 000–25 000 t/a lietettä (n. 30 % TS) (Pöyry Finland 2019, s. 35).

4.5.3 Pyrolyysi

Pyrolyysi on hapettomissa olosuhteissa tapahtuva prosessi, jota käytetään yleisimmin orgaanisen materiaalin ominaisuuksien muuttamiseksi. Lietteen pyrolyysissä on tavoitteena tuottaa tilavuudeltaan ja massaltaan pienempää pyrolyysihiiltä, jota voidaan käyttää maanparannusaineena, kompostoinnin lisäaineena, suodatusmateriaalina sekä polttoaineena. (Pöyry Finland 2019, s. 45.)

Pyrolyysissä liete kuumennetaan ensin 100 °C:een, kunnes lietteeseen sitoutunut vesi on haihtunut täysin. Tämän jälkeen lämpötila nostetaan jopa 350 °C:een, jolloin tapahtuvat varsinaiset pyrolyysi- eli hiiltymisreaktiot. Tämän jälkeen liete kuumennetaan edelleen 350–700 °C, jossa hiiltyminen edelleen etenee. Viipymäaika tässä lämpötilassa on noin 10–60 min. Tämän jälkeen materiaali poistetaan reaktorista, jäähdytetään ja kostutetaan 10–20 % kostuuteen, jolla estetään itsesytyvyyttä. (Pöyry Finland 2019, s. 45–46.) Esimerkki pyrolyysin prosessikaaviosta on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9: Esimerkki pyrolyysin prosessikaaviosta (Pöyry Finland 2019, s. 45)

Pyrolyysilaitoksia on tällä hetkellä kahta kokoluokkaa: pieniä ruuvitekniikkaan perustuvia laitoksia sekä suuria pyöröuunitekniikan laitoksia. Pienien laitosten mittakaava on noin 5 000–15 000 t lietettä/a, kun kuiva-ainepitoisuus on 30 %. Suurten laitosten koko vaihtelee 25 000–300 000 t lietettä/a (30 % TS) välillä. Täyden mittakaavan pyrolyysilaitoksia on maailmalla muutamia, joista useimmat tuottavat pyrolyysihiiltä polttoaineeksi. (Pöyry Finland 2019, s. 47–51.)

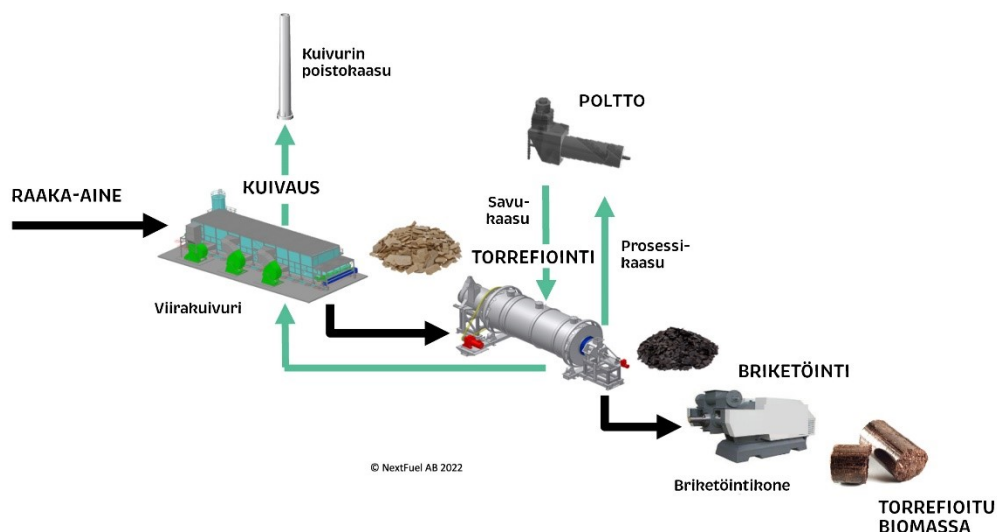
Pyrolyysin kokonaislämmöntarve on noin 550–800 kWh/t lietettä (30 % TS). Osa lämmöntarpeesta on kuitenkin mahdollista kattaa polttamalla lietteestä muodostuvaa kaasua. Lietteeseen voidaan myös sekoittaa biomassaa pyrolyysin syötteen mukana, jolloin saadaan lisättyä prosessiin ulkopuolista energiaa. Prosessin sähkönkulutus on arviolta 60–90 kWh/t lietettä (30 % TS). (Pöyry Finland 2019, s. 50.)

4.5.4 Torrefiointi

Torrefioinnissa biomassaa käsitellään termisesti anaerobisissa olosuhteissa 200–350 °C lämpötilassa. Tämän ohella merkittävä parametri on lämmitysnopeus, joka on yleensä alle 50 °C/min. Viipymääjan pituus riippuu syöttömateriaalin palakoosta, mutta se on yleensä 5–60 min. (Pöyry Finland 2019, s. 40.)

Prosessi alkaa kuumentamalla biomassaa lämpötilaan, jossa vapaa kosteus alkaa haihtua. Tämän jälkeen esikuivauksessa lämpötila nostetaan 100 °C, jolloin kaikki vapaa vesi haihtuu. Jälkikuivauksen aikana lämpötila nostetaan torrefiointilämpötilaan, ja biomassaan kemiallisesti sitoutunut vesi haihtuu. Tämän jälkeen tapahtuu varsinainen torrefiointi 200–350 °C lämpötilassa, jossa tapahtuvat orgaanisen materiaalin termokemialliset muutokset. Lopuksi massa jäähdytetään alle 200 °C:ksi ennen kuin se päästetään kosketuksiin ilman kanssa. Näin vältetään sen itsesytyvyys. Prosessista syntyy kiinteä hiilifraktio, jota voidaan käyttää polttoaineena. Tämän lisäksi muodostuu höyryjä ja kaasuja, jotka voidaan johtaa polttoon tai tiivistää öljymäiseksi nesteeksi,

jota voidaan myös käyttää polttoaineena. (Pöyry Finland 2019, s. 40–42.) Biomassan torrefiointin periaatekaavio on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10: Biomassan torrefiointin periaatekaavio (Joensuu Biocal www-sivut, 2024)

Kuivausvaiheen lämmöntarve on 500–700 kWh/t lietettä, kun kuiva-ainepitoisuus on n. 30 %. Tähän päälle itse torrefiointi kuluttaa lämpöenergiaa 50–100 kWh/t. Torrefiointin lämmöntarpeesta osa on mahdollista kattaa polttamalla torrefiointissa muodostuvia kaasuja. Sähkönkulutus on arviolta 60–90 kWh/t lietettä. (Pöyry Finland 2019, s. 43.)

Maailmalla on muutamia torrefiointilaitoksia, joilla käsitellään erilaisia biomassoja. Lietteen torrefiointia on tutkittu jonkin verran, mutta vielä ole esimerkiksi yhtäkään täyden mittakaavan lietteen torrefiointilaitosta. (Pöyry Finland 2019, s. 44.) Taloudellisesti järkevän mittakaavan laitoksen arvioidaan kuitenkin olevan yli 15 000 t lietettä/a (30 % TS) (Pöyry Finland 2019, s. 42).

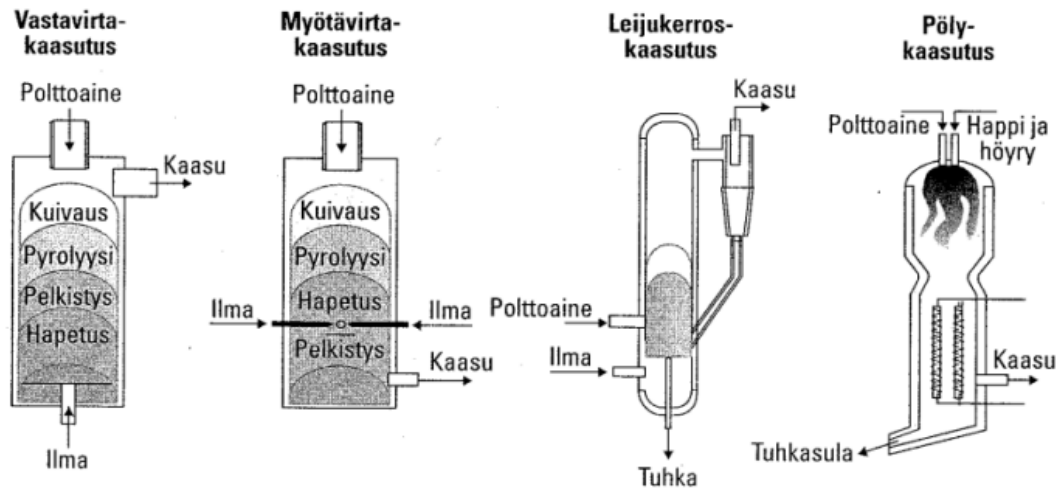
4.5.5 Kaasutus

Kaasutuksessa biomassasta tuotetaan energiaa sisältävää kaasua rajallisesti hapellisissa olosuhteissa. Kaasutus tapahtuu normaalisti 800–900 °C lämpötilassa. Prosessissa kaasutusreaktoriin syötetään happea noin 30 % siitä

määrästä, jota tarvittaisiin täydellisesti tapahtuvaan palamisreaktioon. Tällöin osa biomassasta hapettuu ja tuottaa kaasutusprosessin ylläpitoon tarvittavaa lämpöä. Viipymäaika on lyhyt, noin 2–10 sekuntia. (Pöyry Finland 2019, s. 55.)

Kaasutusprosessi alkaa kuivausvaiheesta, jossa materiaalista poistetaan kaikki termisestä kuivauksesta jäänyt jäännöskosteus. Tämän jälkeen materiaali siirtyy pyrolyysivaiheeseen, jossa orgaanista ainetta hajotetaan termisesti muodostaen kaasuja ja öljyä. Hapetusvaiheessa osa tuotetusta kaasusta poltetaan prosessin vaatiman lämmön tuottamiseksi. Tämän jälkeen pelkistysvaiheessa tapahtuu varsinaiset kaasutusreaktiot, joissa hiili reagoi veden, vedyn tai hiilidioksidin kanssa ja muodostaa tuotekaasua, joka koostuu hiilimonoksidista (CO), metaanista (CH₄) ja vetykaasusta (H₂) sekä muista kevyistä hiilivedyistä. Tuotekaasu täytyy tämän jälkeen vielä puhdistaa partikkeleista suodattamalla, jonka jälkeen se voidaan polttaa polttokattilassa tai kaasumoottorissa. Prosessin aikana muodostuu myös öljyä, joita voidaan polttaa tai tiivistää nestemäiseksi polttoaineeksi. (Pöyry Finland 2019, s. 55; Aatsinki 2021, s. 45–47.)

Kaasutukseen käytettäviä tekniikoita on useita, joista tärkeimmät ovat kiinteäpeti-, leijupeti- ja pölykaasutus. Kiinteäpetikaasutuksessa liete syötetään reaktoriin ylhäältä ja se on reaktorissa paikallaan. Tekniikka on mahdollista toteuttaa vasta-, myötä- tai ristivirtaperiaatteella riippuen kaasujen syöttösuunnasta lietteen syöttösuuntaan suhteutettuna. Kiinteäpetikaasutuksella pystytään vapauttamaan 60–70 % lietteen energiasta. Leijupetikaasutus muistuttaa periaatteeltaan leijupetipolttoa, jossa biomassaa leijutetaan kaasutusreaktorissa. Leijupetikaasutuksella pystytään vapauttamaan 65–75 % lietteen energiasta. Pölykaasutuksessa sekä liete, happi että höyry johdetaan reaktorin yläosaan. Tekniikalla voidaan vapauttaa jopa 80 % lietteen energiasta. (Pöyry Finland 2019, s. 56.) Lietteiden kaasutustekniikoiden periaatekuvia on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11: Eri kaasutustekniikoiden periaatekuvia (Pöyry Finland 2019, s. 56)

Kaasutus on lietteen käsittelymenetelmänä melko uusi. Tällä hetkellä maailmalla on käytössä kolme täyden mittakaavan kaasutuslaitosta, joista yksi sijaitsee Japanissa ja kaksi Saksassa. Kaasutus vaatii toimiakseen suuren määrän ulkoista energiaa. Japanin kaasutuslaitos kuitenkin pystyy tuottamaan sähköä noin 150 kW:n teholla, joka kattaa laitoksen sähköntarpeesta noin 30 %. Laitoksen kokonaissähköntarve on noin 120 kWh/t lietettä (20–30 TS). (Pöyry Finland 2019, s. 58–59.)

Kaasutuslaitokset ovat kokoluokaltaan 7 000–35 000 t/a lietettä (30 % TS). On kuitenkin olemassa myös pieniä, vain 1 700 t/a (30 % TS) laitoksia. Taloudellisesti kannattavan laitoksen kokoluokan kuitenkin arvioidaan olevan yli 30 000 t/a (30 % TS) mittakaavassa. (Pöyry Finland 2019, s. 58–59.)

5 CASE: SATAKUNNAN AMMATTIKORKEAKOULU

Satakunnan ammattikorkeakoulu suunnitteli kahteen WC-tilaan tutkimus- ja opetuskäyttöön suljettua vesikiertoa, jossa tilojen harmaat ja mahdollisesti mustat jätevedet olisi puhdistettu paikan päällä omalla jätevedenpuhdistamolla ja puhdas hygienisoitu vesi olisi hyödynnetty WC-istuinten huuhteluvetenä. Suljettu kierto ei kuitenkaan toteutunut. Tämän työn tarkoituksena on kuitenkin selvittää, olisi puhdistuksesta syntyvää lietettä voinut käyttää osittain Porin kampuksen energiantarpeen kattamiseen.

Jätevettä syntyy Suomessa vuosittain noin 500 miljoonaa kuutiometriä. Lietettä taas syntyi vuonna 2020 kuivapainoltaan 135 000 tonnia. Tästä voidaan arvioida kaavan (1) mukaisesti, että yksi kuutiometri jätevettä sisältää kuivapainona lietettä n. 0,27 kg:

$$m(\text{liete}) = \frac{135\,000\,000\text{ kg TS}}{500\,000\,000\text{ m}^3(\text{jätevesi})} = 0,27\text{ kg TS/m}^3(\text{jätevesi}) \quad (1)$$

Suljettuun kiertoon suunnitellut WC-tilat ovat kampuksen muihin WC-tiloihin verrattuna pienellä käytöllä, eikä niissä ole erillisiä vesimittareita, joiden avulla tilojen kuluttamaa vesimäärää saisi mitattua. Molemmissa WC-tiloissa on kaksi koppia, jotka sisältävät WC-istuimen, käsienpesualtaan ja bideesuihkun. Lisäksi koppien ulkopuolella on kaksi käsienpesuallasta. Puuttuvien vesimittarilukemien vuoksi tulevissa laskelmissa käytetään kampuksen kirjastoa vastapäätä sijaitsevien WC-tilojen vesimittaritietoja. Kirjastoa vastapäätä sijaitsevissa WC-tiloissa on yhteensä 13 WC-istuinta, 13 bideesuihkua, 13 käsienpesuallasta WC-koppien sisällä ja kahdeksan koppien ulkopuolella. (Mäkinen, 2024.)

Satakunnan ammattikorkeakoulun Porin kampus on otettu käyttöön syyskuussa 2017, joten vesimittarilukemat ovat n. 6,5 vuoden ajalta. Tänä aikana kirjastoa vastapäätä sijaitsevat WC-tilat ovat lämmönjakohuoneen vesimittarilukemien mukaan kuluttaneet kylmää vettä 798 m³ ja lämmintä vettä 227 m³. (Mäkinen, 2024.)

Vuodessa kylmää vettä kuluu siis n. 123 m³ ja lämmintä vettä n. 35 m³, eli yhteensä käyttövettä menee n. 158 m³/a. Kirjastoa vastapäätä sijaitsevilla WC-tiloissa on yhteensä 13 WC-istuinta, kun taas suljettuun kiertoon suunnitelluissa tiloissa on yhteensä 4 WC-istuinta. Näin ollen suljettuun kiertoon suunniteltujen tilojen käyttövesimäärän voidaan arvioida olevan 30 % kirjastoa vastapäätä sijaitsevien WC-tilojen käyttöveden kulutuksesta. Kaavassa (2) on laskettu suljettuun kiertoon suunniteltujen tilojen käyttöveden määrä.

$$V(\text{Käyttövesi}) = 158 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} * 0,3 = 47,4 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \quad (2)$$

Todellisuudessa jäteveden vuosittainen määrä on käyttövettä suurempi. Kirjastoa vastapäätä olevat WC-tilat ovat kuitenkin huomattavasti suuremmalla käytöllä keskeisen sijaintinsa ansiosta, että arvio suljettuun kiertoon suunniteltujen WC-tilojen käyttöveden määrästä on todennäköisesti liian suuri. Tämän vuoksi aiemmin laskettua käyttöveden määrää voidaan käyttää tilojen tuottaman jäteveden vuosittaisena määränä. Näin ollen tiloista lähtee jätevettä 47,4 m³/a. Aiemmin kaavassa (1) lasketun lietteen osuuden jätevedestä ansiosta voidaan arvioida, että tiloista syntyy kuivapainoltaan lietettä noin 12,8 kg TS/a kaavan (3) mukaisesti:

$$m(\text{Liete}) = 0,27 \frac{\text{kg TS}}{\text{m}^3(\text{jätevesi})} * 47,4 \frac{\text{m}^3(\text{jätevesi})}{\text{a}} = 12,8 \frac{\text{kg TS}}{\text{a}} \quad (3)$$

Satakunnan ammattikorkeakoulun Porin kampus kulutti sähköä vuonna 2022 n. 3 070 MWh/a ja kaukolämpöä n. 522 MWh/a. Suurin osa kampuksen lämmöntarpeesta katetaan geotermisellä energialla, joka on otettu käyttöön vuonna 2021. Vertailuna vuonna 2020 kaukolämpöä kului n. 2 680 MWh/a, kun geotermistä energiaa ei ollut vielä käytössä. Geotermisen energia kattaa siis n. 80 % kampuksen lämmöntarpeesta. Rakennuksessa on opetustilojen lisäksi myös K-supermarket ja apteekki, joiden energiankulutus on sisällytetty saatuun dataan. (Lindgren, 2024.)

5.1 Menetelmien vertailu

Suljetusta kierrosta syntyisi vuosittain todella pieni määrä lietettä, vain noin 13 kg. Vaikka suljettuun kiertoon liitettäisiin Porin kampuksen kaikki WC-tilat, lietteen vuosittainen määrä ei siltikään olisi tarpeeksi paljon käsittelymenetelmien vaatimasta laitoskoosta. Hajoamiseen perustuvien menetelmien laitoskoko on vähintään 300 t lietettä vuodessa. Erillispoltossa järkevä laitoskoko vaatii käsiteltävää lietettä vähintään 40 000 t vuodessa, tosin PAKU-prosessissa riittäisi 10 000 t lietettä vuodessa. Yhteispoltossakin käsiteltävää lietettä olisi oltava vähintään 5 000 t vuodessa. Muut termiset käsittelymenetelmät vaativat vähintään 5 000–15 000 t käsiteltävää lietettä vuodessa. Satakunnan ammattikorkeakoulun WC-tiloista ei olisi saatavilla näin suuria lietemääriä.

Termisillä käsittelymenetelmillä, pois lukien poltolla, ei sellaisenaan pysty tuottamaan lietteestä hyödynnettävää energiaa. Terminen kuivaus, märkähiilto, pyrolyysi, ja torrefiointi kuivaa lietteen helpommin käsiteltävään muotoon, joka voidaan myöhemmässä vaiheessa polttaa. Kaasutuksessa lopputuotteena on kaasu, joka on myös mahdollista polttaa.

Kompostoitu liete on lämpöarvoltaan kompostoitonta lietettä heikompa. Se siis voidaan käsittelyn jälkeen polttaa, mutta kompostoitomasta lietteestä on mahdollista saada enemmän energiaa. Mädätyksessä lopputuotteena on biokaasu, joka on lämpöarvoltaan 25 MJ/m³. Suljetussa kierrossa syntyy kuitenkin niin vähän lietettä, että pelkästään lietettä mädättämällä ei saada merkittävää määrää biokaasua poltto varten.

Lietteen poltto erillispolttona ei vaikuta järkevältä ratkaisulta, sillä lietettä syntyisi vuosittain liian pieni määrä. Liete voitaisiin polttaa yhteispoltossa joko arina- tai leijupetikattilassa, mutta näin pienellä lietemäärällä kyse olisi enemmän lietteestä eroon pääsemisestä, kuin energiantuotannossa hyödyllisenä polttoaineena toimimisesta.

Tämän hetken tekniikoista PAKU-prosessi vaikuttaa lupaavimmalta. Satakunnan ammattikorkeakoulu voisi halutessaan tutkia PAKU-prosessin toimimista

pienemmässä mittakaavassa. Tähänkin tarvittaisiin kuitenkin huomattavasti suuremmat lietemäärät, kuin mitä suljettuun kiertoon kaavailtuista WC-tiloista on mahdollista saada. Jos lietettä kerättäisiin kampuksen jokaisesta WC-tilasta, voisi olla mahdollista kerätä lietemäärä, jolla PAKU-prosessin tutkiminen pienessä mittakaavassa voisi olla järkevää.

6 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Suomessa syntyy jätevettä vuosittain noin 500 miljoonaa kuutiometriä. Siitä lietteen osuus oli vuonna 2020 kuivapainoltaan 135 000 tonnia. Lietettä syntyy huomattava määrä vuosittain, ja siinä voisi olla merkittävä potentiaali energiantuotannossa. Tällä hetkellä lietettä ei juurikaan hyödynnetä energianlähteenä, sillä liete vaatii palakseen enemmän energiaa, kuin se tuottaa.

Lietettä on mahdollista käyttää energialähteenä joko valmistamalla siitä biokaasua tai polttamalla liete. Myös valmis biokaasu voidaan hyödyntää polttamalla. Nykyisin kuitenkin lietettä poltetaan vain pieniä määriä ja silloinkin tarkoituksena on päästä lietteestä eroon, eikä niinkään saada siitä hyötyä poltto-prosessissa.

Suomalainen PAKU-prosessi kuitenkin pystyy hyödyntämään lietettä ainoana polttoaineena ja tuottamaan kaukolämpöä. Tekniikka soveltuu verrattain pienelle laitokselle, mutta halutessaan Satakunnan ammattikorkeakoulu voisi alkaa tutkimaan PAKU-tekniikan toimivuutta vielä pienemmällä laitostuolla. Pieni laitostuoko voisi tulevaisuudessa olla hyödyllinen esimerkiksi syrjäseuduilla, missä kyläjätevesikaivoista eroteltaisiin liete ja hyödynnettäisiin kyläkotitalouksien lämmöntuotannossa.

Satakunnan ammattikorkeakoulun suunnittelema suljettu vesikierto ei ole toteutumassa, joten myöskään siitä syntyvää lietettä ei olla tulossa hyödyntämään missään muodossa. Suljetusta kierrosta saatava lietteen määrä olisi niin pientä, että sillä ei juuri voitaisi laskea esimerkiksi kampuksen kaukolämmön tarvetta. Lietettä tuskin syntyisi tarpeeksi merkittävä määrä kaukolämmöntarpeen alentamiseksi, vaikka suljettu kierto kattaisi kampuksen kaikki WC-tilat. Myös pienen laitostuon tutkiminen vaatisi joko suljetun vesikierron toteuttamisen, tai että Satakunnan ammattikorkeakoulu saa tutkimuksissa käytettävän lietteen muualta, tai tutkimus toteutettaisiin jätevedenpuhdistamon yhteydessä.

LÄHTEET

Aatsinki, T. 2021 Termiset käsittelymenetelmät energian ja ravinteiden talteenottoon puhdistamolietteestä. Viitattu 20.02.2024. https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/162959/Diplomityo_Aatsinki_Teemu.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Berninger, K. 2018. Puhdistamolietteselvitys. Yhteenveto toteutettujen hankkeiden tuloksista. Viitattu 02.04.2024. <https://tyrskyconsulting.fi/wp-content/uploads/Puhdistamolietteselvitys-2018.pdf>

Endev Oy. 2019. Puhdistamolietteen käsittely PAKU-laitoksessa. Kärkihankekiertue-Joensuu 30.01.2019. Viitattu 20.02.2024. https://www.vesiyhditys.fi/wp-content/uploads/2019/10/7_a_Endev_esitys_VVY_28.11.2019.pdf

Endev Oy:n www-sivut. 2024. Viitattu 20.02.2024. <https://www.endev.fi/>

Laitinen, J., Alhola, K., Manninen, K. & Säylä, J. 2014. Puhdistamolietteen ja biojätteen käsittely ravinteita kierrättäen. Viitattu 20.02.2024. https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Tutkimus_ja_kehittamishankkeet/Hankkeet/Puhdistamolietteen_ja_biojätteen_kasittely_ravinteita_kierrattaen

Lehtoranta, S., Malila, R., Fjäder, P., Laukka, V., Mustajoki, J. & Äystö, L. 2021. Jätevesien ravinteet kiertoon turvallisesti ja tehokkaasti. Viitattu 20.02.2024. <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/24373692-94ff-431b-b145-8d23c7c7d277/content>

Lindgren, S. 15.02.2024. Teams-keskustelu Satakunnan ammattikorkeakoulun projektitutkijan, Sanna Lindgrenin, kanssa.

Joensuu Biocal:n www-sivut. 2024. Viitattu 26.03.2024. <https://www.joensuu-biocoal.fi/>

Jätelaki 646/2011. Viitattu 13.03.2024. <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110646>

Mäkinen, R. 28.03.2023. Sähköpostikeskustelu Satakunnan ammattikorkeakoulun erikoistutkija, Riika-Mari Mäkisen, kanssa.

Pöyry Environment Oy. 2007. Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukyky -selvitys. Viitattu 20.02.2024. <https://media.sitra.fi/2017/02/27172733/LietteenkC3A4sittely-2.pdf>

Pöyry Finland Oy. 2019. Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen. Viitattu 20.02.2024. https://www.vvy.fi/site/assets/files/2916/puhdistamolietteen_termiset_kasittelymenetelmat_ja_niiden_soveltuvuus_suomeen.pdf

Tilastokeskus. 2014. Ympäristötilasto; Vuosikirja 2014. Viitattu 12.03.2024. https://www.stat.fi/tup/julkaisut/tiedostot/julkaisuluetteloymp_ymp_201400_2014_12020_net.pdf

Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta 151/2013. Viitattu 12.03.2024.
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2012/20120179>

Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013. Viitattu 12.03.2024.
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130331>

Vilpanen, M. & Seppälä, P. Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus. 2021. Viitattu 29.03.2024. [https://www.vvy.fi/site/assets/files/4691/yhdyskuntalietteen kasittelyn ja hyodyntamisen nykytilannekatsaus_2021.pdf](https://www.vvy.fi/site/assets/files/4691/yhdyskuntalietteen_kasittelyn_ja_hyodyntamisen_nykytilannekatsaus_2021.pdf)