

Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen

Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 56

Helsinki 2019



Julkaisun jakelu:

Vesilaitosyhdistys
Ratamestarinkatu 7 B
00520 Helsinki

puh. (09) 868 9010
sähköposti: vvy@vvy.fi
kotisivu www.vvy.fi

ISSN-L 2242-7279
ISSN 2242-7279

ISBN 978-952-6697-60-50-5

Helsinki 2019

KUVAILEHTI			
<i>Julkaisija</i>	Suomen Vesilaitosyhdistys ry		
<i>Tekijät</i>	Pöyry Finland Oy		
<i>Julkaisun nimi</i>	Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen		
<i>Julkaisusarjan nimi ja numero</i>	Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 56		
<i>Julkaisun teema</i>			
<i>Saatavuus</i>	Julkaisu on saatavissa Vesilaitosyhdistyksen verkkosivuilta.		
<i>Tiivistelmä</i>	<p>Hankkeessa selvitettiin puhdistamolietteen termisiä käsittelytekniikoita ja niiden potentiaalia tulevaisuuden lietteenkäsittelytekniikoiksi Suomessa.</p> <p>Puhdistamolietteen tuotantomääriä ja sijaintia selvitettiin käyttäen lähtökohtana lietteen tuotantopaikkaa. Kootusta aineistosta luotiin karttaesitykset, joissa kuvataan lietteen tuotantomääriä, mahdollisia keskitettyjen käsittelylaitosten aluejakoja sekä keskimääräisiä kuljetusmatkoja keskitettyihin laitoksiin.</p> <p>Tarkastellut tekniikat olivat terminen kuivaus, märkähiilto, torrefiointi, pyrolyysi, kaasutus, erillispoltto ja yhteispoltto. Tekniikoista kuvattiin niiden toimintaperiaate, tuotteet ja sivutuotteet, ympäristövaikutukset, taloudellisuus, kustannukset sekä tekninen valmiusaste ja kehittämisen aktiivisuus. Tekniikoiden ominaisuuksista koottiin graafisia esityksiä, joilla pyrittiin tuomaan esille tekniikoiden ominaisuuksia ja eroavaisuuksia.</p> <p>Tekniikoille toteutettiin hiilijalanjäkilaskennat, joissa huomioitiin mädätetyn ja mekaanisesti kuivatun lietteen termisen käsittelyn päästöt ja päästöhyvitykset. Lisäksi nollavaihtoehtoina laskettiin hiilijalanjäljet mädätykselle ja kompostoinnille.</p> <p>Termisten käsittelymenetelmien potentiaalia arvioitiin laajalla asiantuntijajoukolla huomioiden teknisiä, kaupallisia ja yhteiskunnallisia näkökulmia. Hankkeessa kerättyjen tietojen pohjalta koostettiin kustakin termisestä käsittelytekniikasta tiivis yhteenveto.</p>		
<i>Avainsanat</i>	Puhdistamoliete, terminen käsittely, terminen kuivaus, märkähiilto, torrefiointi, pyrolyysi, kaasutus, poltto		
<i>Rahoittaja/toimeksiantaja</i>	Suomen Vesilaitosyhdistys ry		
	<i>ISBN</i> 978-952-6697-60-50-5	<i>ISSN</i> 2242-7279	
	<i>Sivu</i> 125	<i>Kieli</i> suomi	<i>luottamuksellisuus</i> julkinen
<i>Julkaisun jakelu</i>	Vesilaitosyhdistys, www.vvy.fi		

BESKRIVNINGSBLAD			
<i>Publicerat av</i>	Finlands Vattenverksförening r.f.		
<i>Författare</i>	Pöyry Finland Oy		
<i>Publikationens titel</i>	Termiska behandlingsmetoder för kommunal slam och deras tillämplighet i Finland		
<i>Publikationsseriens titel och nummer</i>	Vattenverksföreningens duplikatserie nr 56		
<i>Publikationens tema</i>			
<i>Tillgänglighet</i>	Publikationen finns på Vattenverksföreningens webbsida.		
<i>Sammanfattning</i>	<p>I projektet kartlades termiska behandlingsmetoder och deras potential som slamhanteringstekniker i Finland.</p> <p>Slammängder och -platser utredades med reningsverk som produktionsplats. Från materialet gjordes det kartor där man ser slammängder, möjliga zoner för centraliserade termiska behandlingsanläggningar samt transportväglängder till anläggningar.</p> <p>Kartlagda tekniker var termisk torkning, hydrotermisk karbonisering, torrefiering, pyrolys, förgasning, separat förbränning och samförbränning. För varje teknik beskrevs funktionsprincip, produkter och biprodukter, miljöpåverkan, ekonomi, kostnader, teknisk mognadsgrad och hur aktivt de utvecklades. I olika grafiska presentationer redovisas teknikernas egenskaper och skillnader mellan teknikerna.</p> <p>De olika teknikernas koldioxidutsläpp från hantering av rötat och mekaniskt torkat slam beräknades, inklusive emissioner och negativa utsläpp. Som nollvariant räknades koldioxidutsläpp för rötning och kompostering.</p> <p>Potentialen av olika behandlingsmetoder värdesattes av en bred expertgrupp med hänsyn till ekonomiska och tekniska aspekter. Utav det insamlade materialet gjordes en sammanfattning av varje teknik.</p>		
<i>Nyckelord</i>	Kommunal slam, termisk behandling, termisk torkning, hydrotermisk karbonisering, torrefiering, pyrolys, förgasning, förbränning		
<i>Finansiär/uppdragsgivare</i>	Finlands Vattenverksförening r.f.		
	<i>ISBN</i> 978-952-6697-60-5-5	<i>ISSN</i> 2242-7279	
	<i>Sidantal</i> 125	<i>Språk</i> finska	<i>Konfidentialitet</i> offentlig
<i>Distribution av publikationen</i>	Vattenverksföreningen, www.vvy.fi		

DESCRIPTION SHEET			
<i>Publisher</i>	Finnish Water Utilities Association		
<i>Contributors</i>	Pöyry Finland Oy		
<i>Name of publication</i>	Thermal treatment methods of sewage sludge and their suitability for Finland		
<i>Name and number of publication series</i>	Finnish Water Utilities Associations's publication series no 56		
<i>Subject of publication</i>			
<i>Availability</i>	The publication is available online: www.vvy.fi		
<i>Abstract</i>	<p>The project examined different thermal treatment methods of sewage sludge and their potential for future sludge treatment techniques to be used in Finland.</p> <p>The volumes and production locations of sewage sludge were studied by using the place of production as a starting point. As a result, maps were prepared to describe the sludge production volumes, potential area divisions for centralized treatment plants and the average transport distances to the centralized plants.</p> <p>The studied methods included thermal drying, hydrothermal carbonization, torrefaction, pyrolysis, gasification, mono-incineration and co-incineration. The study described their operation principles, products and by-products, environmental impacts, financial effects, costs and technical maturity and how actively the methods are developed. The features of the methods were compiled into graphs to highlight their properties and differences.</p> <p>Carbon footprint calculations were also made for the studied methods taking into consideration the thermal treatment emissions and emission compensations of anaerobically digested, mechanically dried sludge. Additionally, the carbon footprints of anaerobic digestion and composting were calculated as zero alternatives.</p> <p>The potential of thermal treatment methods was assessed by a wide group of specialists taking into account technical, commercial and social points of view. Based on the information gathered during the project, a concise summary of each thermal treatment method was prepared.</p>		
<i>Key words</i>	Sewage sludge, thermal treatment, thermal drying, wet carbonization, torrefaction, pyrolysis, gasification, incineration		
<i>Financed/ sponsored by</i>	Finnish Water Utilities Association		
	<i>ISBN</i> 978-952-6697-60-50-5	<i>ISSN</i> 2242-7279	
	<i>Pages</i> 125	<i>Language</i> Finnish	<i>Confidentiality</i> public
<i>Distribution</i>	Finnish Water Utilities Association, www.vvy.fi		

Esipuhe

Tässä julkaisussa on esitetty nykyisin käytössä ja kehitteillä olevia puhdistamolietteen termisiä käsittelymenetelmiä sekä arvioitu niiden ominaisuuksia, kehitysastetta, toteutustapaa sekä soveltuvuutta Suomeen. Lisäksi työssä selvitettiin Suomessa syntyvän puhdistamolietteen määrää ja sijaintia. Raportin tavoite on tuottaa tietoa termisistä lietteen käsittelymenetelmistä vesihuoltokentän tarpeisiin ja toimia pohjamateriaalina jatkoselvityksille.

Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen - julkaisu on Vesihuoltolaitosten kehittämisrahaston rahoittama laitoslähtöinen hanke, jonka sisältö on valmisteltu Vesilaitosyhdistyksen viemärlaitosryhmän ohjauksessa. Ohjausryhmänä hankkeessa toimi VVY:n viemärlaitosryhmä: Petri Tuominen, Jyväskylän Seudun Puhdistamo Oy; Mari Heinonen, Helsingin seudun ympäristöpalvelut (HSY); Marko Jänntti, Järvenpään Vesi; Hannu Roikola, Kempeleen Vesihuolto Oy; Mirva Levomäki, Turun seudun puhdistamo Oy sekä Tiina Oksanen, Riihimäen Vesi. Ohjausryhmän kokouksiin osallistuivat myös Jouko Tuomi, Turun seudun puhdistamo Oy ja Saijariina Toivikko, VVY. Hankkeen toteutti Pöyry Finland Oy.

Hankkeen yhteydessä 7.5.2019 järjestettiin laajapohjainen asiantuntijatyöpaja, johon osallistui 20 asiantuntijaa eri organisaatioista. Työpajassa arvioitiin lieteuotteiden markkinoiden mahdollisuuksia ja uhkia sekä eri tekniikoiden vahvuuksia ja heikkouksia. Työpajan tulokset on raportoitu kappaleessa 5.2.

Vesilaitosyhdistys kiittää kaikkia julkaisun tekemiseen ja työpajaan osallistuneita heidän aktiivisesta panoksestaan.

Helsingissä 25.6.2019

Suomen Vesilaitosyhdistys ry

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	9
2	Puhdistamolietteen tuotanto ja käsittelylaitosten sijainti.....	10
2.1	Puhdistamolietteen tuotanto Suomessa	10
2.1.1	Puhdistamolietteen tuotantomäärät.....	10
2.1.2	Puhdistamolietteen tuotannon sijoittuminen Suomessa	11
2.2	Lietteen termisten käsittelylaitosten potentiaaliset sijaintialueet.....	14
2.2.1	Keskisuuren kapasiteetin laitokset	14
2.2.2	Suuren kapasiteetin laitokset	16
2.3	Kuljetusmatkat	19
2.3.1	Keskisuuren kapasiteetin laitokset	19
2.3.2	Suuren kapasiteetin laitokset	21
3	Puhdistamolietteen termiset käsittelytekniikat	23
3.1	Terminen kuivaus.....	25
3.1.1	Tekniikan kuvaus	25
3.1.2	Tuotteet ja sivutuotteet.....	30
3.1.3	Ympäristövaikutukset.....	31
3.1.4	Taloudellisuus ja kustannukset	31
3.1.5	Tekniikan valmiusaste ja referenssit	32
3.2	Märkähiilto (HTC).....	34
3.2.1	Tekniikan kuvaus	34
3.2.2	Tuotteet ja sivutuotteet.....	36
3.2.3	Ympäristövaikutukset.....	38
3.2.4	Taloudellisuus ja kustannukset	38
3.2.5	Tekniikan valmiusaste ja referenssit	39
3.3	Torrefiointi.....	39
3.3.1	Tekniikan kuvaus	39
3.3.2	Tuotteet ja sivutuotteet.....	42
3.3.3	Ympäristövaikutukset.....	43
3.3.4	Taloudellisuus ja kustannukset	43
3.3.5	Tekniikan valmiusaste ja referenssit	44
3.4	Pyrolyysi.....	45
3.4.1	Tekniikan kuvaus	45
3.4.2	Tuotteet ja sivutuotteet.....	48
3.4.3	Ympäristövaikutukset.....	49
3.4.4	Taloudellisuus ja kustannukset	50
3.4.5	Tekniikan valmiusaste ja referenssit	51
3.5	Kaasutus.....	55
3.5.1	Tekniikan kuvaus	55
3.5.2	Tuotteet ja sivutuotteet.....	57
3.5.3	Ympäristövaikutukset.....	58
3.5.4	Taloudellisuus ja kustannukset	58
3.5.5	Tekniikan valmiusaste ja referenssit	59
3.6	Poltto erillispolttolaitoksissa.....	62
3.6.1	Tekniikan kuvaus	62
3.6.2	Tuotteet ja sivutuotteet.....	66
3.6.3	Ympäristövaikutukset.....	69
3.6.4	Taloudellisuus ja kustannukset	69
3.6.5	Tekniikan valmiusaste ja referenssit	70
3.7	Poltto yhteispolttolaitoksissa.....	71

3.7.1	Tekniikan kuvaus	71
3.7.2	Tuotteet ja sivutuotteet.....	74
3.7.3	Ympäristövaikutukset.....	75
3.7.4	Taloudellisuus ja kustannukset	75
3.7.5	Tekniikan valmiusaste ja referenssit.....	75
3.8	Tekniikoiden ominaisuuksien koostaminen ja vertailu	76
3.8.1	Lämpötila ja viipymäaika	76
3.8.2	Fosforin kierrätys ja haitta-aineiden poisto	79
3.8.3	Laitosten mittakaava	83
3.8.4	Kustannukset.....	85
3.8.5	Tekniikoiden valmiusaste ja referenssit.....	87
3.9	Tekniikkakohtaiset koostetaulukot	89
3.10	Uudet tekniikat	98
3.10.1	Terminen hydrolyysi (THP)	98
3.10.2	Hydroterminen nesteytys (HTL)	98
3.10.3	Ylikriittinen vesikaasutus (SCGW).....	98
3.10.4	Biopohjaisen raakaöljyn tuotanto	98
4	Hiilijalanjälki	100
4.1	Laskennan rajausta.....	100
4.2	Tulokset	103
5	Tekniikoiden potentiaalinen arviointi.....	107
5.1	Puhdistamolietteen käsittely ja hyödyntäminen Suomessa	107
5.1.1	Lietetuotteiden hyödyntämiskohteet ja markkinat	107
5.1.2	Maantieteelliset olosuhteet.....	107
5.1.3	Jätevedenpuhdistamot ja jätevesiliete Suomessa	108
5.2	Tekniikoiden arviointi asiantuntijatyöpajassa	108
5.2.1	Lietetuotteiden markkinoiden mahdollisuudet ja uhat	108
5.2.2	Tekniikoiden vahvuudet ja heikkoudet.....	110
5.3	Yhteenveto tekniikoiden potentiaalista.....	112
5.3.1	Terminen kuivaus.....	112
5.3.2	Märkähiilto	112
5.3.3	Torrefiointi.....	113
5.3.4	Pyrolyysi	113
5.3.5	Kaasutus.....	114
5.3.6	Erillispoltto	114
5.3.7	Yhteispoltto	115
6	Yhteenveto.....	116
7	Viitteet.....	118
	Liitteet.....	124

LIITE 1 MUOVIN HAJOAMISLÄMPÖTILAT

1 JOHDANTO

Puhdistamolietteen hyödyntäminen ja sen käsittelytekniikat ovat merkittävässä kehitysvaiheessa. Ravinteiden kierrätyksen tärkeydestä on keskusteltu paljon viime vuosina, ja puhdistamolietteen on todettu olevan merkittävä ravinteiden ja orgaanisen aineen virta, joka tulisi saada kiertoon. Toisaalta puhdistamolietteen hyödyntämiselle on asetettu rajoituksia niin lainsäädännön kuin markkinoiden taholta.

Suomessa on vuoden 2019 hallitusohjelmassa määritetty kunnianhimoiset tavoitteet fossiilivapaan ja hiilineutraalin talouden saavuttamiseksi. Lietteiden käsittelyssä pyritään enenevässä määrin löytämään ratkaisuja, jotka mahdollistavat ravinteiden kierrätyksen ja lietteen sisältämän energian hyödyntämisen. Biokaasun tuotanto jätevesilietteestä todennäköisesti yleistyy entisestään, mutta mädätteen jatkokäyttöön kaivattaisiin luotettavia ratkaisuja.

Nykyisin valtaosa jätevesilietteistä käsitellään Suomessa mädättämällä ja/tai kompostoimalla (VVY 2017). Parhaillaan selvitetään aktiivisesti myös uusia käsittelyvaihtoehtoja, jotka mahdollistaisivat lietteen hyödyntämisen myös, mikäli lietteen hyödyntämismahdollisuudet eivät jatkossa ole nykyisillä käsittelymenetelmillä mahdollisia tässä mittakaavassa. Yhtenä potentiaalisena haasteena lietteen hyödyntämiselle pidetään jäteveden orgaanisten haitta-aineiden, lääkeaineiden ja mikro-muovien sitoutumista lietteeseen puhdistamoprosessissa. Tiettyjen termisten käsittelymenetelmien, kuten pyrolyysin ja polton, on todettu poistavan tehokkaasti orgaanisia haitta-aineita ja lääkeaineita (Kainulainen 2017; Pöyry Switzerland 2017)

Termiset käsittelymenetelmät voivat tarjota potentiaalisia ratkaisuja erityisesti ravinteiden kierrätykseen, sillä termisesti käsitellyille tuotteille voi olla jatkossa helpompaa löytää hyödyntämiskohteita kuin mädätteille ja kompostoiduille lietetuotteille. Termisillä menetelmillä voidaan myös tehostaa energian hyödyntämistä. Toisaalta termisissä käsittelyissä voidaan menettää osa lietteen hyödyllisistä aineista, ja ne vaativat usein ulkopuolista energiaa ja kemikaalien käyttöä.

Lietteiden termisistä käsittelymenetelmistä on Suomessa varsin vähän kokemusta, ja tietoa niistä on rajallisesti saatavilla. Tässä raportissa kuvataan nykyisin käytössä olevia termisiä lietteenkäsittelymenetelmiä ja arvioidaan niiden potentiaalia ja soveltuvuutta Suomeen. Raportissa kuvataan myös Suomessa tuotettava jätevesilietteiden määrä ja sijainti, ja lietemääriä tarkastellaan mahdollisten keskitettyjen käsittelylaitosten näkökulmasta. Raportin tavoite on tuottaa tietoa termisistä lietteiden käsittelymenetelmistä vesihuoltokentän tarpeisiin ja toimia pohjamateriaalina jatkoselvityksille sekä lietteenkäsittelymenetelmien kehittämiseksi ja käyttöönotolle.

2 PUHDISTAMOLIETTEEN TUOTANTO JA KÄSITTELYLAITOSTEN SIJAINTI

2.1 PUHDISTAMOLIETTEEN TUOTANTO SUOMESSA

2.1.1 Puhdistamolietteen tuotantomäärät

Osana työtä selvitettiin puhdistamolietteen tuotantoa Suomessa lietemääriin ja niiden sijaintiin pohjautuen. Lähtökohtana selvityksessä käytettiin lietteen tuotantopaikkaa eli jätevedenpuhdistamoa, eikä esimerkiksi lietteen nykyistä käsittelypaikkaa. Jätevesilietteen tuotantomääristä koottiin aineisto, jossa puhdistamokohtaisesti on esitetty puhdistamon tuottama lietemäärä märkäpainona sekä kuiva-aineena ilmaistuna. Aineistossa on myös puhdistamoiden sijaintitieto koordinaattimuodossa ja/tai osoitetietona.

Pääosa tiedoista saatiin YLVA-järjestelmästä, josta koottiin vuoden 2016 tiedot jätelajista 19 08 05 (asumisvesien käsittelyssä syntyvät lietteet). YLVA-järjestelmän tietoja täydennettiin puuttuvien tietojen osalta laitoksilta kysytyillä tiedoilla sekä korjattiin selviä virheellisyyksiä mm. kiintoainepitoisuuksien osalta.

Isoimpien kaupunkien osalta tehtiin tietojen suuruusluokan tarkastus suhteuttamalla lietemäärä asukaslukuun. Tarkastuksen perusteella ilmenneet merkittävästi poikkeavat tiedot tarkastettiin ja korjattiin virheellisten tietojen osalta.

Puuttuvien pienten paikkakuntien lietemääriä arvioitiin asukasluvun pohjalta siten, että kunnan asukasluku on kerrottu luvulla 0,8 ja tuotettu lietteen kiintoainemäärä on laskettu 20 suurimman kaupungin/puhdistamon asukasmääräpohjaisen ominaislietteentuotantomäärän (kg TS/as/a) pohjalta. Kerroin 0,8 kuvaa suurimpien kaupunkien ja pienten paikkakuntien välistä eroa viemäriverkoston liittymisasteessa. Liittymisasteen on siis arvioitu olevan keskimäärin 20 % matalampi pienillä paikkakunnilla kuin suurimmissa kaupungeissa. Lietteen kokonaismäärä on laskettu oletetun kiintoainepitoisuuden 20 % TS pohjalta.

Niiden paikkakuntien osalta, joissa lietteen kuiva-ainepitoisuus on vuoden 2016 tiedoissa < 15 %, oletettiin kuiva-ainepitoisuudeksi 15 %. Tämä oletus tehtiin siitä syystä, että termisiin käsittelylaitoksiin ei ole käytännössä järkevää kuljettaa hyvin märkää lietettä korkeampien kuljetus- ja käsittelykustannusten vuoksi. Näin ollen tilanteessa, jossa siirrytään käyttämään termistä käsittelymenetelmää, on tarkoituksenmukaista myös muuttaa lietteen mekaanista kuivausta siten, että kuiva-ainepitoisuudeksi saadaan vähintään 15 %.

Metsäteollisuuden yhteiskäsittelylaitosten lietteitä, jotka käsitellään polttamalla metsäteollisuuden kattiloissa, ei ole sisällytetty tarkasteluun, koska näissä laitoksissa asumisjätevesilietettä sellaisenaan ei muodostu ja ne eivät tulisi mahdollisiin lietteen termisiin käsittelylaitoksiin. Metsäteollisuuden yhteiskäsittelylaitoksissa asumisjätevedestä peräisin oleva osuus on tyypillisesti kokonaislietemäärästä pieni (Rauman, Mäntän ja Kaskisten tehtaat).

Lietteen kokonaismäärää verrattiin VVY:n (2017) selvitykseen lietteen hyödyntämisestä. Seuraavassa taulukossa on esitetty lietteiden kokonaismäärä tässä selvityksessä kootussa aineistossa ja VVY:n selvityksessä. Taulukon tiedoista nähdään, että kuiva-aineena mitattuna lietemäärä tämän selvityksen aineistossa on noin 6700 t tai 4,5 % pienempi kuin VVY:n selvityksessä. Kokonaispainona esitetty ero on selvästi suurempi, mikä kuitenkin pääosin johtuu laitoksilta saatujen tietojen perusteella tehdyistä korjauksista, joissa esimerkiksi sakeutetun lietteen (kuiva-ainepitoisuus n. 1-5 %) mukaan ilmoitettu määrä korjattiin vastaamaan todellista tilannetta, jossa liete kuivataan me-

kaanisesti. Nämä yksittäiset korjaukset aiheuttavat merkittävän vaikutuksen kokonaismäärään. Tässä selvityksessä esitettyä kokonaismäärää voidaan kuitenkin pitää todenmukaisempana arviona siitä lietemäärästä, joka keskitetyn lietteenkäsittelyn järjestelmissä kuljetettaisiin keskitettyyn käsittelylaitokseen.

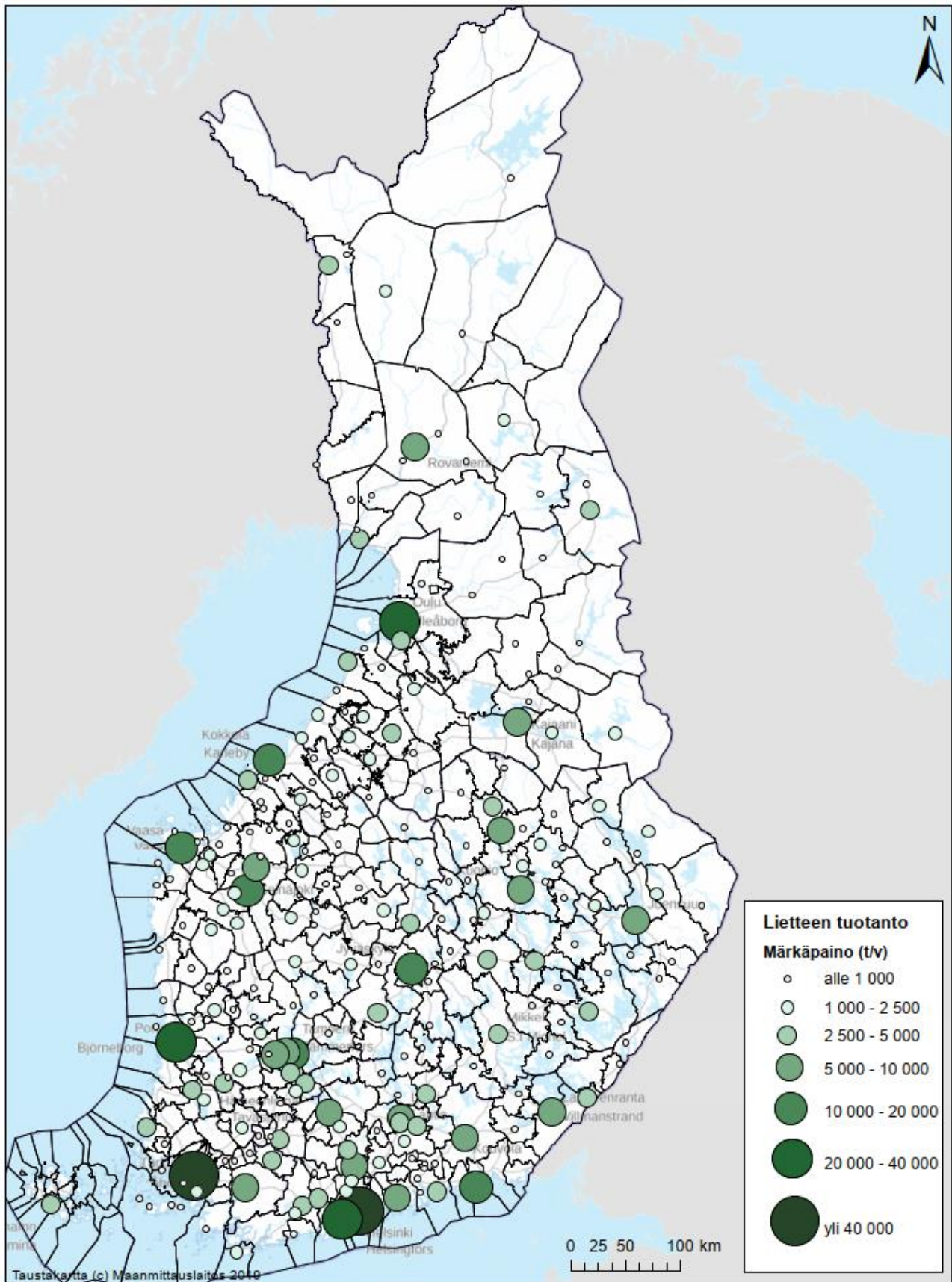
Molemmissa selvityksissä lähtötietoina käytettiin vuoden 2016 lietetietoja. VVY:n selvityksen lähtökohtana on ollut lietteen vastaanottomäärä käsittelylaitoksissa, mistä johtuen lietemäärät eivät ole täysin vertailukelpoisia. Myös vertailukohtana käytetyssä VVY:n selvityksessä on puutteita ja epätarkkuuksia, kuten selvityksessä todetaan.

Taulukko 2.1. Lietteiden määrää kuvaavan aineiston vertailu VVY:n (2017) raporttiin

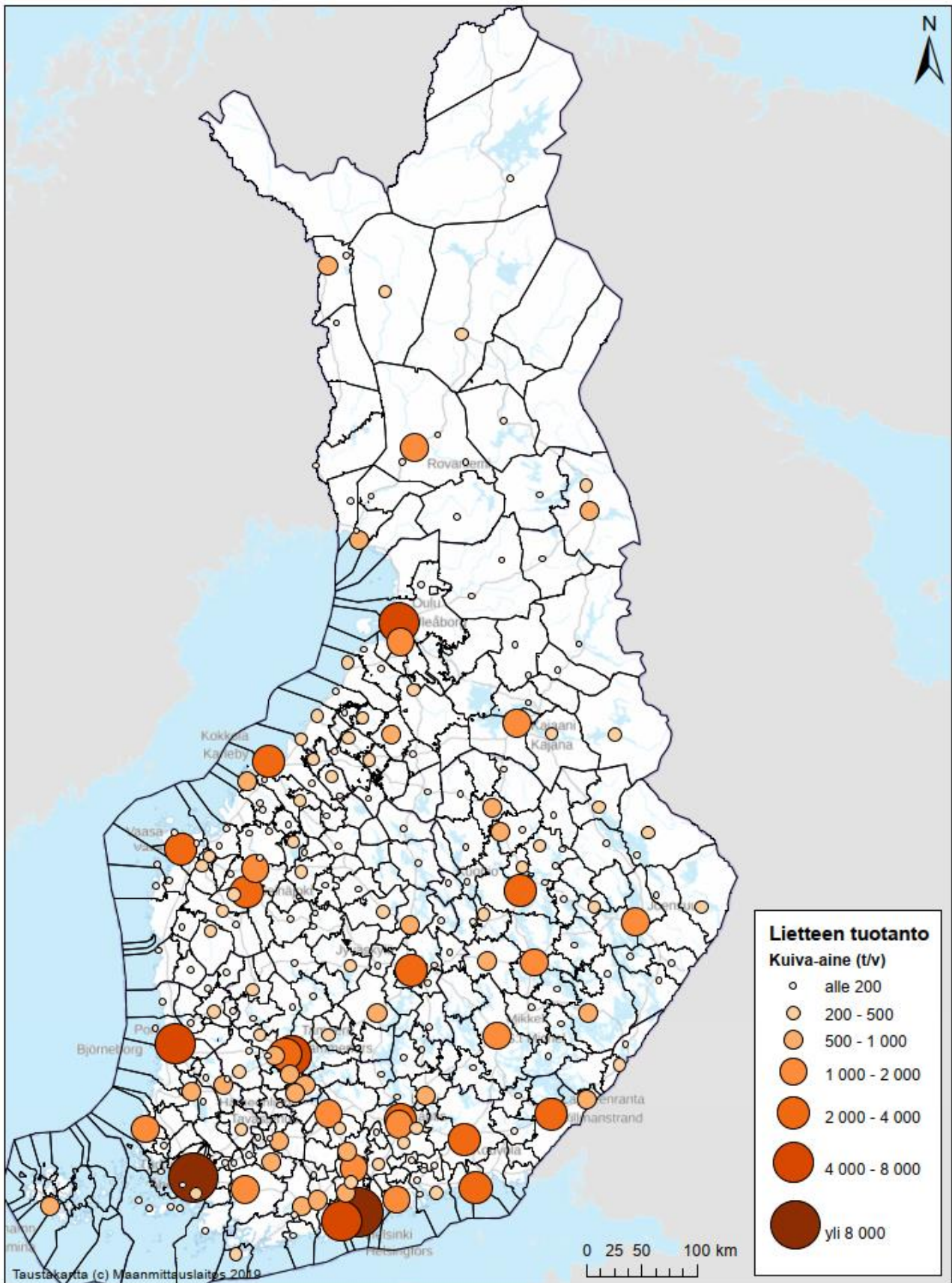
	Lietteiden kuiva-aine (t)	Lietteiden kokonaispaino (t)
VVY (2017) raportin tiedot	147000	832200
Tämän selvityksen aineisto	140328	639926
Suhteellinen ero	-4,5 %	-23,1 %

2.1.2 Puhdistamolietteiden tuotannon sijoittuminen Suomessa

Kootusta lietteiden tuotantomäärä- ja sijaintiaineistosta tehtiin paikkatietoon pohjautuvia karttaesityksiä. Seuraavissa karttakuvissa on esitetty lietteiden tuotantopisteet lietteiden märkäpainon ja kuivaainemäärän perusteella.



Kuva 2.1 Lietteen tuotantomäärät Suomessa märkápainona



Kuva 2.2 Lietteen tuotantomäärät Suomessa lietteen kuiva-ainemääränä

2.2 LIETTEEN TERMISTEN KÄSITTELYLAITOSTEN POTENTIALISET SIJAINALUEET

Lietteen tuotantomäärien perusteella muodostettiin kaksi aluejakoa perustuen lietteen käsittelymääriin termisissä käsittelylaitoksissa. Käsittelymenetelmät voidaan karkeasti jakaa kapasiteettiin keskiuurten ja suurten kapasiteetin laitoksiin. Keskiuurten laitosten suuruusluokkana tässä selvityksessä käytettiin 5000 – 10 000 t TS/a ja suurten > 10 000 t TS/a.

Joitakin käsittelytekniikoita, kuten termistä kuivausta ja pyrolyysiä, voidaan teknisesti toteuttaa myös tarkasteltua keskiuurta laitospäätä pienemmässä mittakaavassa, mutta käytännössä käsittelyn taloudellisuuden kannalta keskittäminen vähintään keskiuuriin yksiköihin on järkevää.

Tekniikoita, jotka on edullista toteuttaa keskiuudessa laitoskoossa:

- Terminen kuivaus
- Märkähiilto
- Torrefiointi
- Pyrolyysi
- Erillispoltto (arina- tai PAKU-tekniikalla)
- Yhteispoltto – kun puhdistamoliete viedään polttolaitokseen, jossa jo poltetaan muuta

Tekniikoita, jotka voidaan toteuttaa suuressa laitoskoossa:

- Pyrolyysi
- Kaasutus
- Erillispoltto (leijupetitekniikalla)
- Yhteispoltto

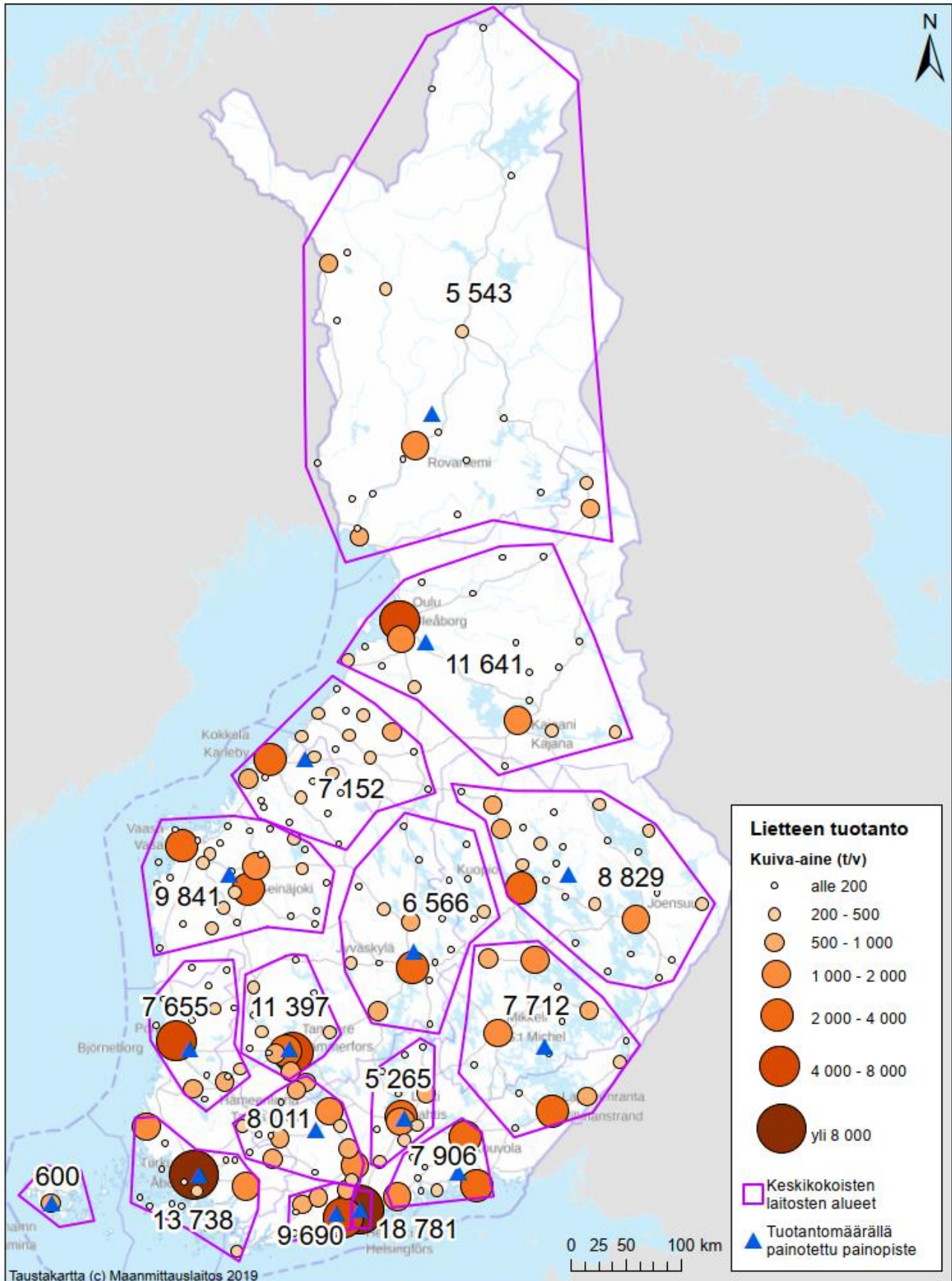
Tätä pienempien alueiden esittäminen paikkatietotarkastelussa ei ole erityisen informatiivista, koska käytännössä pienet käsittelylaitokset olisi järkevintä sijoittaa suurimpien kaupunkien ja aluekeskusten jätevedenpuhdistamoiden läheisyyteen.

Esitetyt aluejaot ovat esimerkinomaisia, ja niissä ei ole voitu huomioida kunkin alueen erityispiirteitä. Aluejakoja ei tule pitää suosituksena optimaalisesta aluejaosta, vaan esimerkinomaisena mahdollisena aluejakona. Esitetyissä aluejaoissa on oletettu koko Suomen jakaantuvan tietyn kapasiteettiluokan alueisiin. Käytännössä kuitenkin keskitettyjen käsittelylaitosten mahdollisesti yleistyessä Suomeen muodostuisi todennäköisesti hyvin erisuuruisiin kapasiteetteihin pohjautuvia alueita.

2.2.1 Keskiuuren kapasiteetin laitokset

Tarkastelussa jaettiin lietteen tuotantopisteet tuotetun kuiva-ainemäärän perusteella alueisiin, joissa tuotantomäärä on noin 5 000 – 10 000 t TS/a. Ahvenanmaa jätettiin omaksi alueekseen johtuen kuljetuksen haastavuudesta Manner-Suomeen. Helsingin Viikinmäen alue, Turun seudun alue ja Oulun seudun alue ylittävät 10 000 t TS/a rajan. Turun ja Oulun tapauksissa katsottiin kuitenkin järkeväksi yhdistää lähialueiden puhdistamoita alueeseen, koska alueen reuna-alueilla muodostuu vain pieni osa koko alueen liettemäärästä, eivätkä ne erillisinä olisi riittäviä keskiuuren laitoksen tarpeisiin.

Kartassa on esitetty vihreällä alueelliset painopistekohdat, joihin lietteen tuotannon ja sijainnin mukaan määritetty painopiste sijoittuu. Painopiste kuvaa kohtaa, johon kuljetettuna lietteen kuljetusmäärä (tonnia * km) olisi pienimmillään. Tarkastelu on tehty suoraan koordinaattien perusteella, joten tieverkoston aiheuttamaa vaikutusta kuljetusmatkoihin ei ole huomioitu.



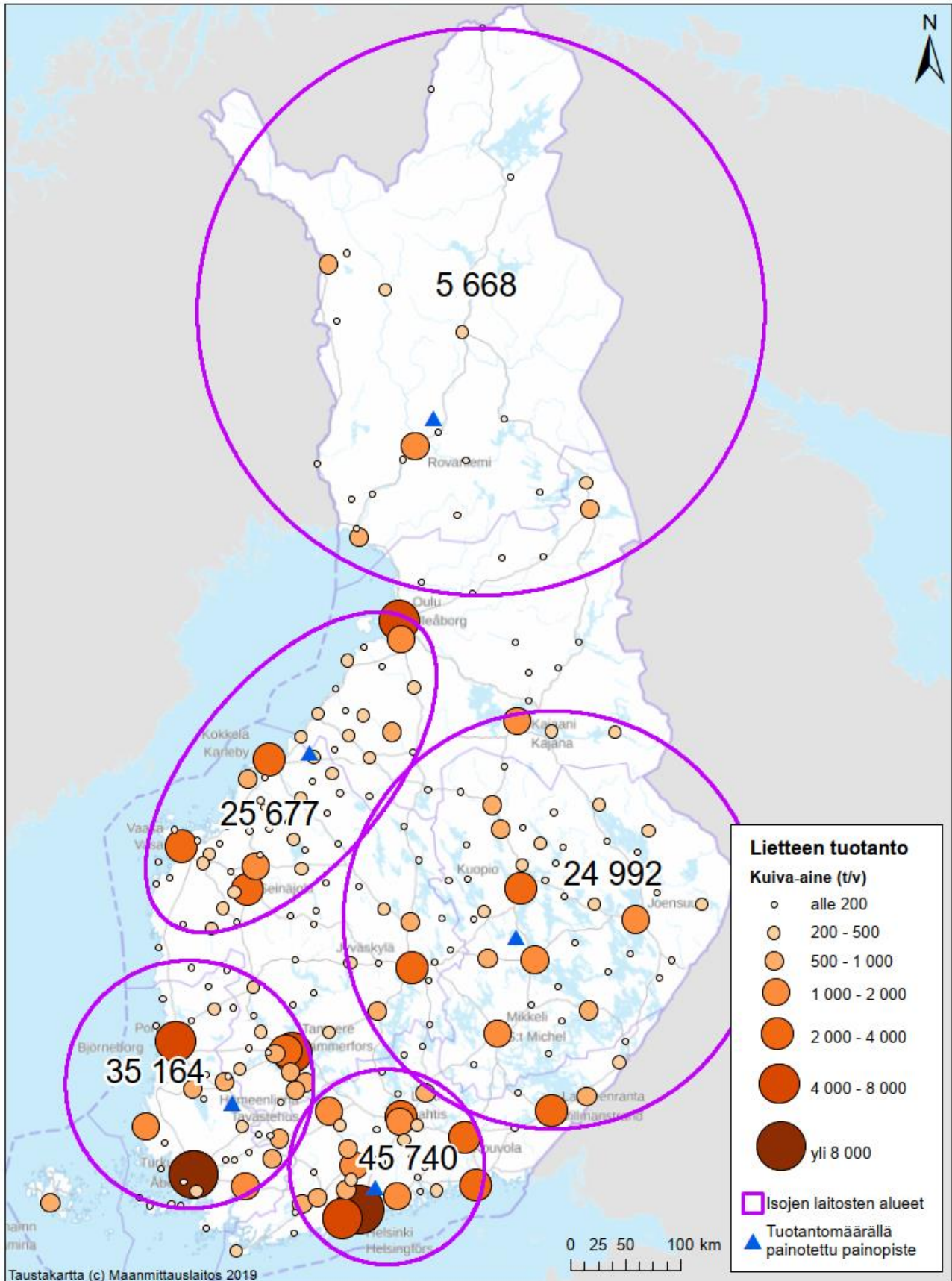
Kuva 2.3. Esimerkki mahdollisesta lietteenkäsittelyn aluejaosta keskiuuren kapasiteetin laitosten lietemääriin pohjautuen. Potentiaalisia tekniikoita tässä kokoluokassa ovat terminen kuivaus, märkähiilto, torrefiointi, pyrolyysi, erillispoltto (arina- tai PAKU-tekniikalla) sekä yhteispoltto.

2.2.2 Suuren kapasiteetin laitokset

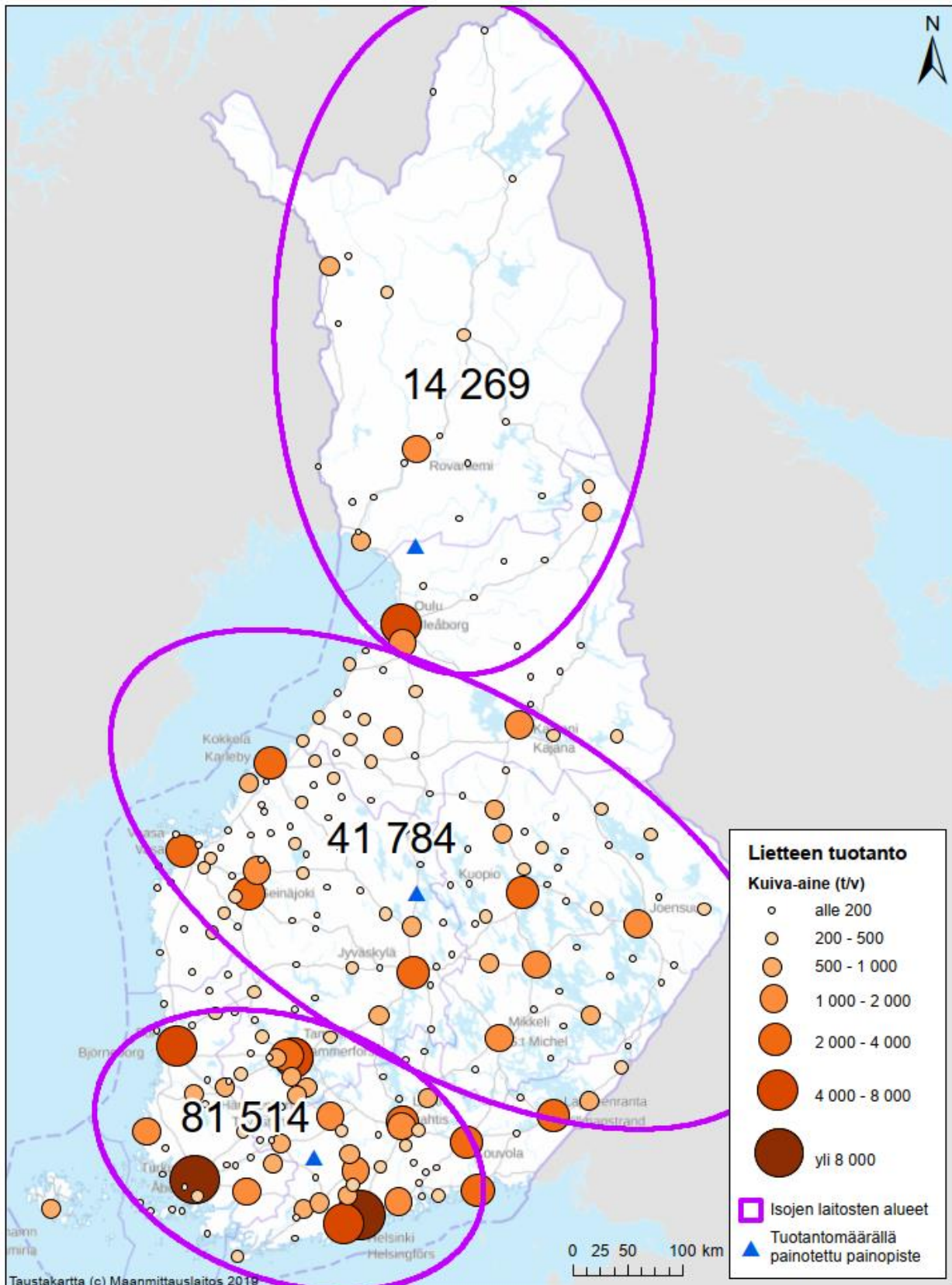
Seuraavissa kuvissa on esitetty kaksi esimerkkiä suurten alueiden jakoon.

Ensimmäisessä tapauksessa (Kuva 2.4) Suuren kapasiteetin laitosten kapasiteettia varten Suomeen muodostettiin viisi aluetta, joista neljän lietemäärä vastaa suuren kokoluokan laitoksia. Lapin alueen lietemäärä jää alle 10 000 t TS/a, mutta pitkien etäisyyksien vuoksi sitä ei liitetty muihin alueisiin. Etelä-Suomessa aluejako voitaisiin toteuttaa useilla tavoilla. Tässä aluejaossa Etelä-Suomi Hämeenlinnasta itään päin kuuluu Uudenmaan, Hämeen ja Kymenlaakson pääpiirteissään muodostamaan alueeseen, ja Tampereesta länteen päin Varsinais-Suomen, Satakunnan ja Pirkanmaan muodostamaan alueeseen. Myös esimerkiksi pääkaupunkiseudun lietemäärä yksinään olisi riittävä suuren mittakaavan käsittelylaitokselle, samoin esimerkiksi Tampereen, Porin ja Hämeenlinnan yhdessä muodostaman alueen lietemäärä.

Toisessa esimerkissä (Kuva 2.5) Suomen lietteet on jaettu kolmeen suuralueeseen. Tässä tapauksessa Lounais-Suomen alue käsittää yli puolet koko Suomen lietemäärästä. Oulu on sisällytetty Pohjois-Suomen alueeseen, ja näin pohjoisen lietemäärä on kasvanut suureen kokoluokkaan.



Kuva 2.4. Esimerkki mahdollisesta lietteenkäsittelyn aluejaosta suuren kapasiteetin laitosten liete­määriin pohjautuen. Potentiaalisia tekniikoita tässä kokoluokassa ovat pyrolyysi, kaasutus, erillis­poltto (leijupetiteknikalla) sekä yhteispoltto.



Kuva 2.5. Esimerkki mahdollisesta lietteenkäsittelyn aluejaosta suuren kapasiteetin laitosten liete-
 määriin pohjautuen. Potentiaalisia tekniikoita tässä kokoluokassa ovat pyrolyysi, kaasutus, erillis-
 poltto (leijupetekniikalla) sekä yhteispoltto.

2.3 KULJETUSMATKAT

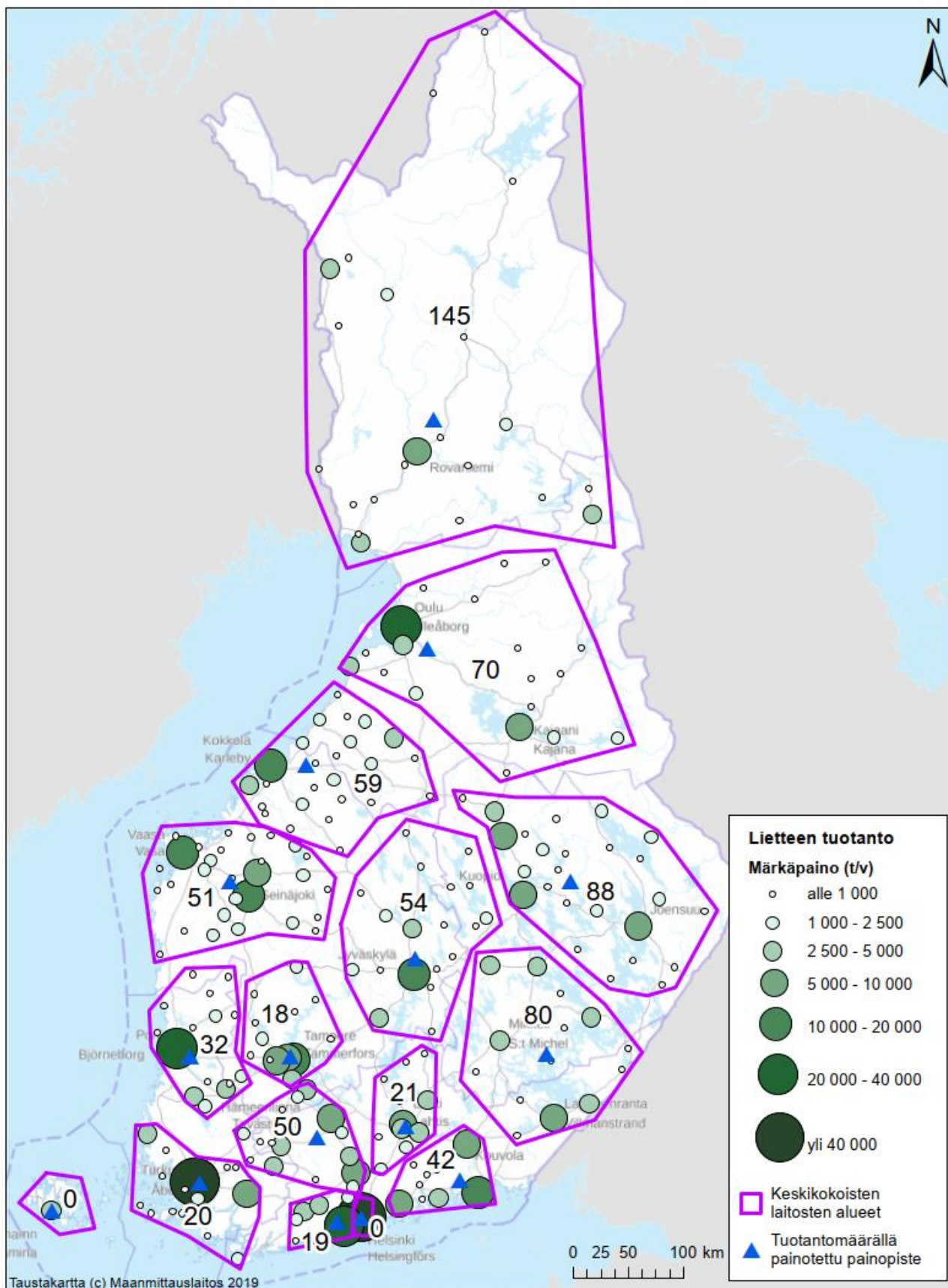
Lietteen kuljetusmatkoja arvioitiin perustuen edellä esitettyihin aluejakoihin, olettaen käsittelylaitoksen sijoituspaikaksi alueen lietteentuotannon painopistekohdat. Painopisteeseen sijoitettu käsittelylaitos minimoi alueen kuljetusmatkat.

Kuljetusmäärien arviointi on toteutettu märkätonneihin pohjautuen. Tieverkostoa pitkin tapahtuvan kuljetusmatkan on arvioitu olevan 1,3 kertaa suoran etäisyyden pituinen (Tilastokeskus 2013, Parkarinen 2014, Tervahauta 2015).

2.3.1 Keskisuuren kapasiteetin laitokset

Keskisuuren kapasiteetin laitosten aluejakoon pohjautuen lasketut kuljetusmatkat alueittain on esitetty seuraavassa kuvassa (Kuva 2.6)

Keskikokoisten alueiden tapauksessa laskennallinen lietteen kokonaiskuljetusmäärä on n. 28,5 milj.km * t / a, ja keskimääräinen kuljetusmatka on noin 50 km.

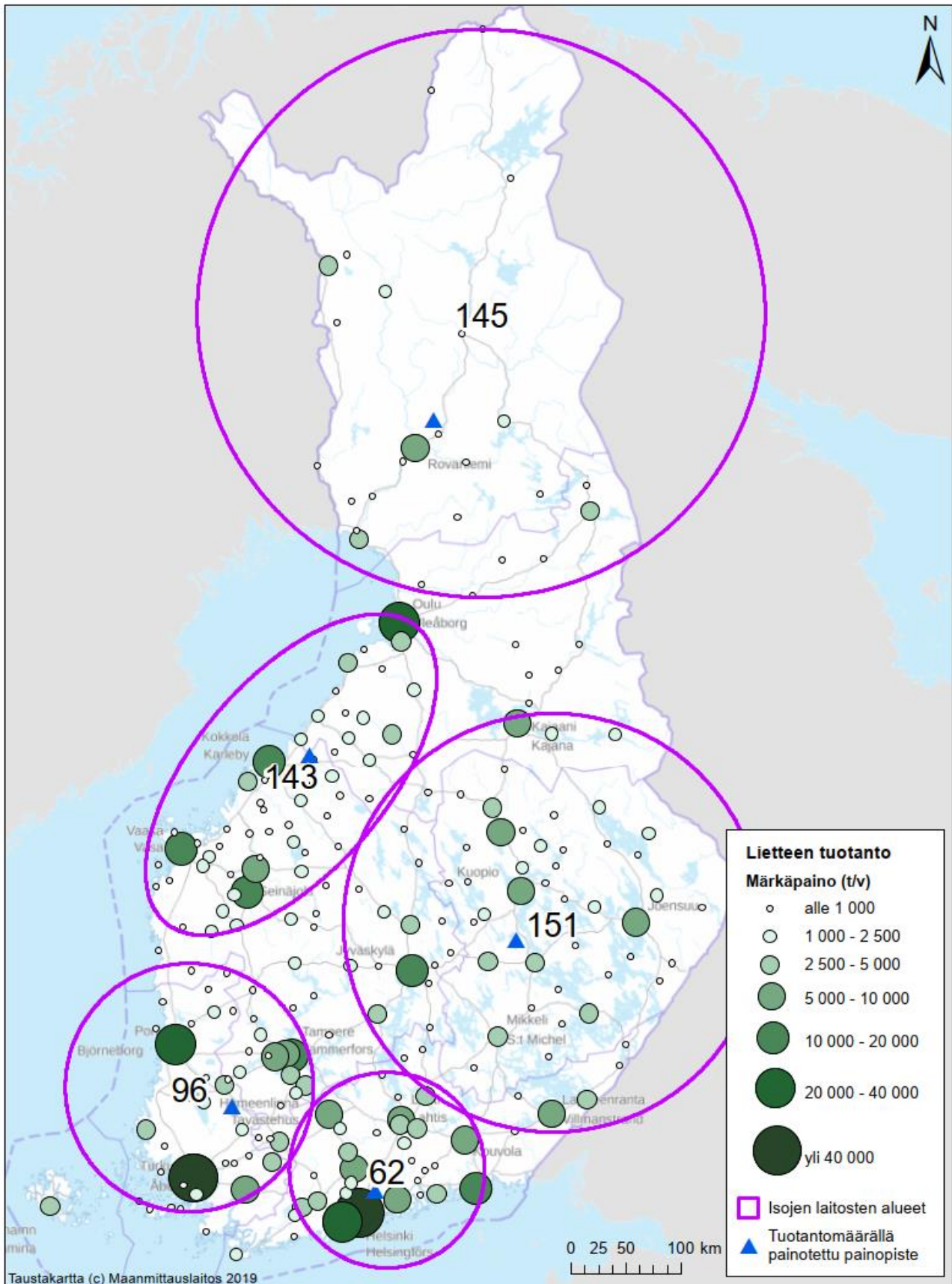


Kuva 2.6. Keskimääräinen lietteen kuljetusmatka (km) käsittelylaitokseen keskikokoisten alueiden tapauksessa. Koko maan keskiarvo on tässä tapauksessa noin 50 km.

2.3.2 Suuren kapasiteetin laitokset

Keskisuuren kapasiteetin laitosten aluejakoon pohjautuen lasketut kuljetusmatkat alueittain on esitetty seuraavassa kuvassa (Kuva 2.7)

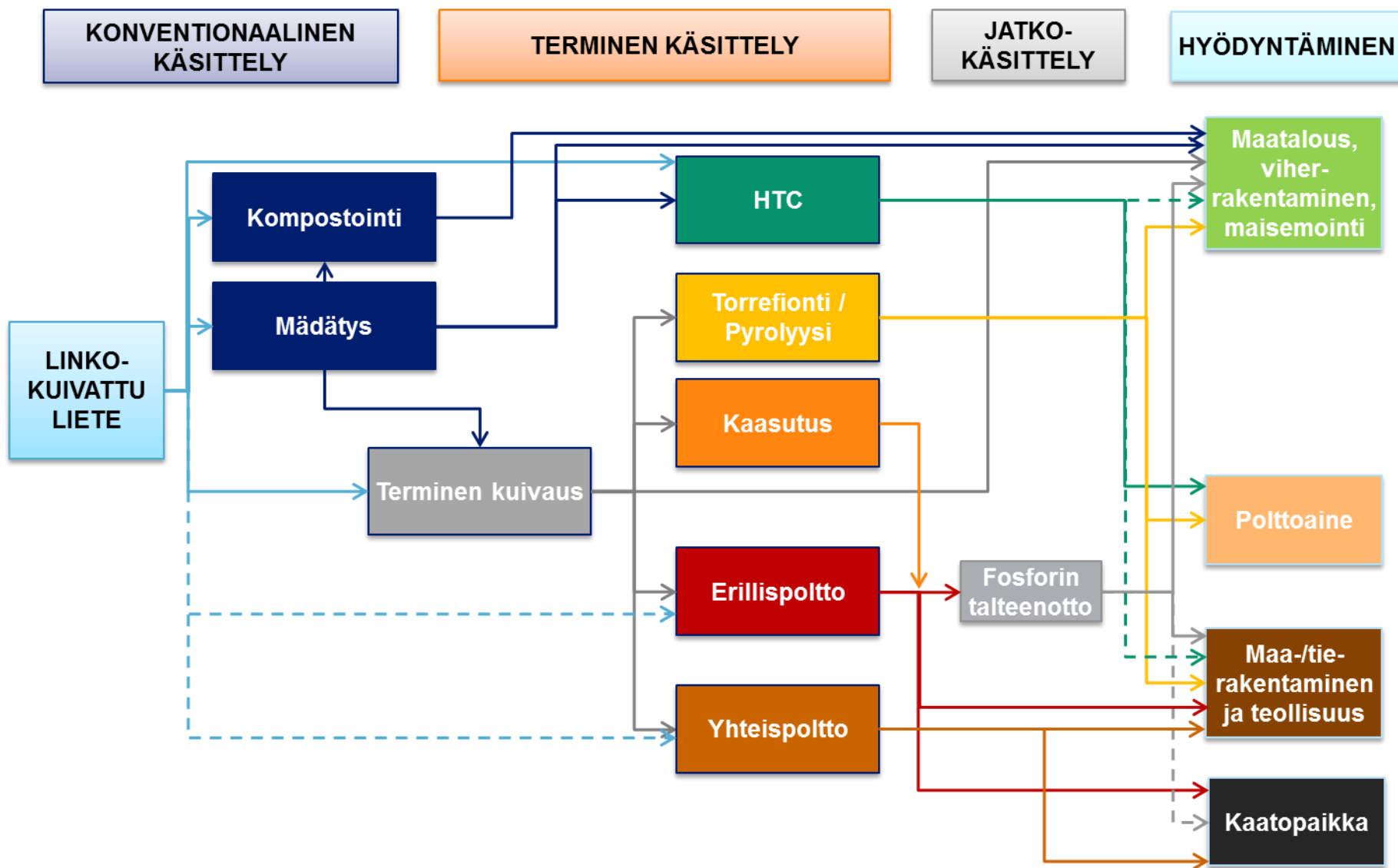
Suurten alueiden tapauksessa laskennallinen lietteen kokonaiskuljetusmäärä on n. 67,4 milj.km³/a, ja keskimääräinen kuljetusmatka on noin 110 km.



Kuva 2.7. Keskimääräinen lietteen kuljetusmatka (km) käsittelylaitokseen suurten alueiden tapauksessa. Koko maan keskiarvo on tässä tapauksessa noin 110 km.

3 PUHDISTAMOLIETTEEN TERMISET KÄSITTELYTEKNIIKAT

Tässä selvityksessä tarkasteluun valittiin tekniikat, jotka ovat lähimpänä täyden mittakaavan kaupallista toteutusta. Tarkastellut tekniikat ovat terminen kuivaus, märkähiilto (HTC), torrefiointi ja pyrolyysi, kaasutus ja poltto. Tarkastellut tekniikat, niitä edeltävä käsittely ja kiinteän lopputuotteen hyödyntämis- ja loppusijoitustavat on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 3.1 Lietteen termisen käsittelyn tekniikoita ja kiinteän lopputuotteen hyödyntämismahdollisuuksia

3.1 TERMINEN KUIVAUS

3.1.1 Tekniikan kuvaus

Tekniikan luonne ja tavoite

Lietteen terminen kuivaus on tekniikka, jossa lietteen kosteuspitoisuutta alennetaan lämmön avulla. Termistä kuivausta käytetään useiden muiden termisten käsittelymenetelmien esikäsittelyinä parantamaan prosessien toimintaa ja energiataloutta.

Termistä kuivausta voidaan käyttää myös itsenäisenä käsittelyprosessina, ja termisesti kuivattu liete voidaan jatkokäsittellä rakeistamalla, mikä parantaa materiaalin käsiteltävyyttä. Termisesti kuivattua lietettä voidaan käyttää sellaisenaan maanparannusaineena tai se voidaan johtaa polttoon tai muihin termisiin käsittelyihin (torrefiointi, pyrolyysi).

Termisen kuivauksen keskeiset vaikutukset lietteen ominaisuuksiin ovat

- Massan vähentäminen
- Lämpöarvon nostaminen
- Stabilointi ja hygienisointi
- Parempi käsiteltävyys ja kuljetettavuus

Käyttötarkoituksesta riippuen liete voidaan kuivata osittain, n. 40 – 50 % tai 60 – 85 % kuiva-ainepitoisuuteen, tai täysin eli n. 85 – 95 % kuiva-ainepitoisuuteen. Haluttu kuiva-ainepitoisuus riippuu termisesti kuivatun lietteen jatkokäsittelystä. Hygienian, varastoinnin ja homehtumisen estämisen kannalta sopiva kuiva-ainepitoisuus on 85–90 % TS.

Lietteen kuivauksessa ja käsittelyssä lietteen käsiteltävyydestä tulee huomioida seuraavat perusperiaatteet:

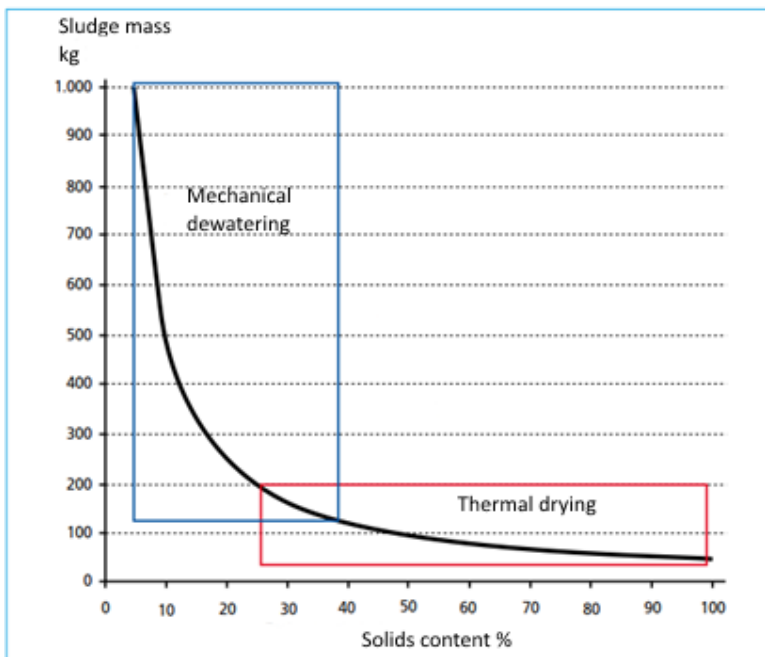
- 15 – 40 % kuiva-ainepitoisuudella liete on pumpattavissa esim. mäntäpumpuilla tai siirrettävissä ruuvi- tai hihnakuljettimilla
- Yli 70 % kuiva-ainepitoisuudella liete on kiinteää ja siirrettävissä ruuvi- tai hihnakuljettimilla
- 50 – 60 % kuiva-ainepitoisuusaluetta tulee välttää, koska siinä liete on tahmeaa ja liisterimäistä. Tällä alueella lietettä on vaikea käsitellä ja se tarttuu helposti kiinni kuivauspintoihin. Kontaktikuivauksessa tämän alueen välttämiseksi kuivattua lietettä kierrätetään prosessissa.

Lietteessä oleva vesi on sitoutunut lietteeseen eri tavoin (Flaga 2007):

- Vapaa vesi, joka on lietepartikkelien välissä sitoutumattomana → voidaan poistaa laskeutuksella
- Vapaa kapillaarivesi, joka on sitoutunut adheesiolla ja koheesiolla lietepartikkeleihin → voidaan poistaa mekaanisella kuivauksella
- Fysikaalisesti osittain sitoutunut vesi, joka on sitoutunut lietepartikkelien sisälle → voidaan poistaa osittain mekaanisesti polymeerien käytöllä
- Sidottu vesi, joka on sitoutunut lietteeseen
 - kemiallisesti (sitoutuneena yhdisteisiin) → voidaan poistaa osittain mekaanisesti polymeerien käytöllä
 - fysikaalisesti (kolloideihin) → voidaan poistaa osittain mekaanisesti polymeerien käytöllä
 - biologisesti (solujen sisään) → voidaan poistaa vain rikkomalla solurakenteet esim. kuumennuksen avulla

Lietteen kuivauksen eri vaiheissa voidaan veden sitoutumistapojen vuoksi korkeintaan päästä tiettyihin kuiva-ainepitoisuuksiin (Flaga 2007):

- Sakeutuksella n. 6 % TS
- Mekaanisella kuivauksella n. 38 % TS
- Termisellä kuivauksella 100 % TS



Kuva 3.2. Mekaanisella ja termisellä kuivauksella saavutettavat kuiva-ainepitoisuudet ja lietteen massa eri kuiva-ainepitoisuuksilla (Pöyry Switzerland 2017)

Toimintaperiaate

Termisessä kuivauksessa kuumennettu materiaali johdetaan kosketuksiin lietteen kanssa, jolloin lietteestä haihtuu vettä. Saavutettava kuiva-ainepitoisuus riippuu kuivauslämpötilasta, viipymääjasta, lämmönsiirrosta lietteen ja lämmittävän materiaalin välillä, lietteen sekoittumisesta ja ilman kosteudesta.

Kuivaus koostuu kolmesta vaiheesta (Flaga 2007):

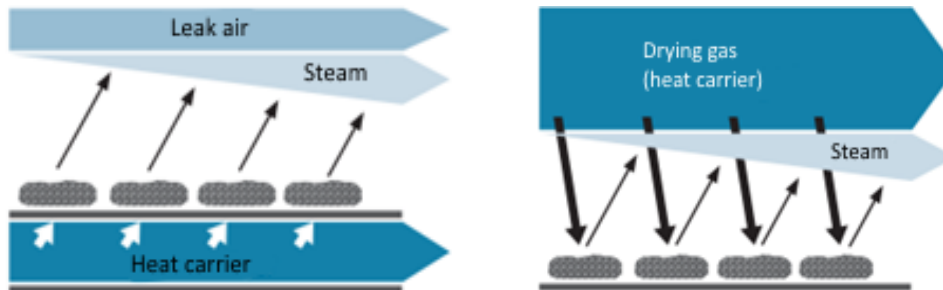
1. Esikuivaus, jossa lietteen lämpötila nousee kuivauslämpötilaan
2. Varsinainen kuivausvaihe, jossa vettä haihtuu kuivauslämpötilassa (n. 50 – 85 °C)
3. Jälkikuivaus, jossa lämpötila nousee kun haihtuminen lietteen pinnalta on nopeampaa kuin vapautuminen partikkelien sisältä. Jälkikuivauksessa saavutetaan kuivauslämpötilasta ja ilmankosteudesta riippuva tasapainokosteus.

Termisen kuivauksen lämpötila on n. 70 – 180 °C riippuen tekniikasta ja lämmönlähteestä. Kuivaimet voidaan jakaa lämpötila-alueen perusteella matalan lämpötilan (< 80 °C), keskilämpötilan (n. 80 – 130 °C) ja korkean lämpötilan (> 130 °C) kuivaimiin. Viipymäaika kuivauksessa on tekniikasta, lämmönsiirtoaineen lämpötilasta ja kuivauksen tavoitetasosta riippuen tyypillisesti noin 30 – 120 min.

Matalammilla lämpötiloilla kuivaus on tehottomampaa ja tarvittava viipymäaika pidempi, jolloin laitteet on mitoittettava suuremmiksi. Lisäksi lämmitys- tai ohivirtausilman määrä on matalammilla lämpötiloilla suurempi kuivattua lietetonnin kohden. Toisaalta matalamman lämpötilan lämmönlähteitä, kuten kaukolämpöä tai jätelämpöä, on joissain kohteissa saatavilla edullisesti.

Tekniikat

Termisen kuivauksen tekniikoita on useita, ja yleisimmin käytetyt tekniikat voidaan jakaa toimintaperiaatteensa mukaisesti kontakti- ja konvektiokuivaukseen (Kuva 3.3). Näiden lisäksi on olemassa harvemmin käytettyjä säteily- ja aurinkokuivaimia sekä yhdistelmäkuivaimia, jotka hyödyntävät sekä kontakti- että konvektiokuivausta (Flaga 2007).



Kuva 3.3. Kontakti- (vas.) ja konvektiokuivauksen (oik.) periaate

Kontaktikuivauksessa liete on kontaktissa kuumennettuun pintaan. Kontaktipinta kuumennetaan yleensä epäsuorasti kuivurin vaipassa kulkevan materiaalin (esim. höyry, öljy) avulla. Lietteen ohi ohjataan ilmaa, joka poistaa muodostuvan höyryn.

Kontaktikuivauksen etuja ovat poistokaasujen pieni määrä ja hyvä energiahyötysuhde. Haittapuolena taas on lietteen epätasainen kuumentuminen (Lohiniva et al. 2001). Kontaktikuivaukseen perustuvia kuivaustekniikoita ovat mm. kiekko kuivaus ja ohutkalvokuivaus.

Yleisesti käytetty kontaktikuivaustekniikka on kiekko kuivaus, jossa liete johdetaan kosketuksiin kuumennettujen pyörivien kiekkojen kanssa. Kiekot kuumennetaan epäsuorasti johtamalla lämmönsiirtaine kiekkojen sisällä oleviin kanaviin.

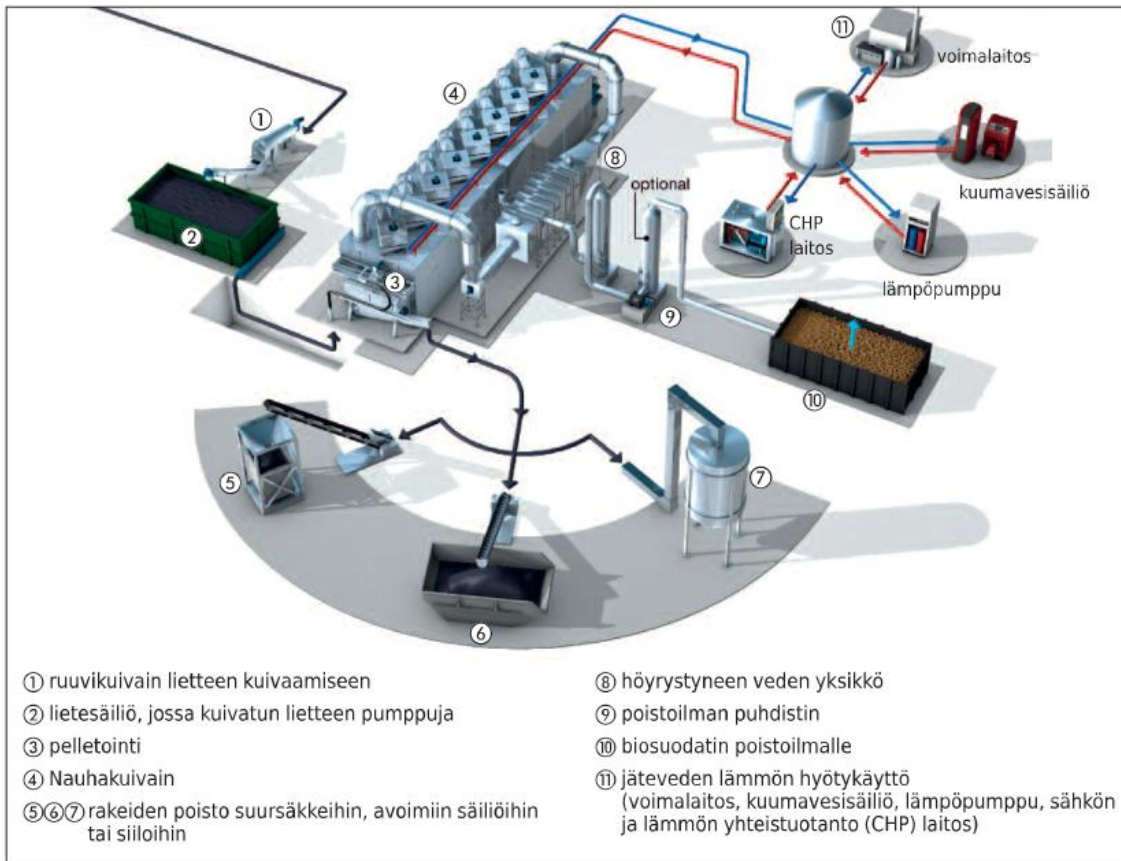
Konvektiokuivauksessa kuumennettu kaasu (esim. ilma) johdetaan suoraan kontaktiin lietteen kanssa. Näissä tekniikoissa energiahyötysuhde on heikompi ja poistoilmaa tuotetaan enemmän. Lisäksi pölyä muodostuu enemmän (Lohiniva et al. 2001). Konvektioon perustuvia kuivaustekniikoita ovat esim. rumpukuivaus, nauhakuivaus ja leijupetikuivaus.

Rumpukuivauksessa kuivaus tapahtuu pyörivässä rummussa, johon johdetaan kuivattava liete ja kuivausilma. Liete muuttuu kuivuessaan rakeiseksi. Rumpukuivain on ollut käytössä 1970-luvulta lähtien ja se on käytössä erityisesti suuren mittakaavan kuivauslaitoksissa.

Nauha- eli hihnakuivauksessa liete levitetään kuivausviirille, ja kuivauskaasu johdetaan lietekerroksen läpi. Nauhakuivaus on laajalti käytössä oleva ja tunnettu menetelmä, ja se on käytössä myös Suomessa Joensuun ja Haapaveden laitoksilla.

Aurinkokuivaus on laitosten lukumäärässä mitattuna hyvin yleinen kuivaustekniikka Keski-Euroopassa, ja se soveltuu erityisesti pienille lietemäärille (Pöyry Switzerland 2017) Suomen ilmasto-oloissa aurinkokuivauksen toimivuus on kuitenkin epävarmaa.

Lämmönsiirtomateriaaleina tuotantopisteestä kuivaukseen käytetään yleensä höyryä, termoöljyä, ilmaa, vettä tai palokaasuja. Lämmönsiirtomateriaaleista lämpö voidaan siirtää lämmönvaihtimilla kuivausilmaan (konvektiokuivaus), tai materiaali voidaan johtaa laitteen lämmityselementteihin (kontaktikuivaus).



Kuva 3.4. Esimerkki lietteen termisen kuivauksen laitoskokonaisuudesta. (Lähde: Huber)

Syötteen ja esikäsittely

Liete kuivataan mekaanisesti ennen termistä kuivausta. Mekaanisessa kuivauksessa saavutettu kuiva-ainepitoisuus vaikuttaa merkittävästi termisen kuivauksen energiataloudellisuuteen. Tietyillä kuivaimilla voidaan kuivata jopa kuiva-ainepitoisuudeltaan vain 6 % TS lietettä (STELA 2019), mutta suositeltava kuiva-ainepitoisuus on vähintään 18 – 20 % (Flaga 2007).

Liete voidaan syöttää termiseen kuivaukseen eri tavoin. Syöttötapa vaikuttaa kuivauksen tehokkuuteen ja tuotteen rakenteeseen. Esimerkiksi nauhakuivaukseen liete voidaan syöttää pursottamalla, pneumaattisella kuljettimella tai nauhakuljettimella. Pursotinsyöttö (extruder) saa aikaan kuivatulle lietteelle pellettimäisen rakenteen (Kuva 3.5). Rumpukuivaimissa raemaisen tuotteen muodostumista edesautetaan kierrättämällä osa kuivatusta tuotteesta kuivauksen alkupäähän, jolloin kuivuriin tulevan syötteen kuiva-ainepitoisuus on yli 60 % (Thamer et al. 2006). Näiden teknikoiden ohella varsinainen rakeistus tai pelletointi voidaan tehdä jälkikäsittelynä kuivatulle lietteelle, ks. Jälkikäsittely ja varastointi.

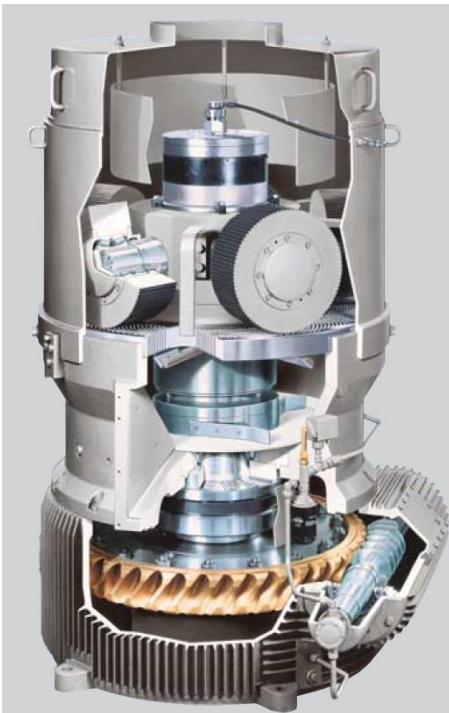


Kuva 3.5. Lietteen syöttö nauhakuivaimelle pursottimella (Huber)

Lietteen mädätys ennen termistä kuivausta vähentää lietteen orgaanisen aineen (haihtuvan kiintoaineen, VS) ja typen määrää. Termisesti kuivatussa lietteessä tämä näkyy korkeampana inertin kiintoaineen suhteellisena osuutena ja matalampana lämpöarvona sekä typen pienempänä määränä termisesti kuivatussa lietteessä ja poistokaasussa.

Jälkikäsittely ja varastointi

Termisen kuivauksen lopputuote on käsittelytekniikasta riippuen valtaosin joko pölymäistä tai rakeista, jolloin valtaosa lietteestä on n. 1 – 4 mm rakeina (Flaga 2007). Termisesti kuivattu liete voidaan jatkokäsitellä rakeistamalla, mikä parantaa materiaalin käsiteltävyyttä ja varastoitavuutta. Rakeistuksesta käytetään tekniikasta riippuen useita nimityksiä, mm. granulointi, pelletöinti ja briketöinti. Pelletöinnissä kuivattu liete puristetaan mekaanisesti kestäviksi pelleteiksi, jotka poikkeavat mm. kovuudeltaan pursotintekniikalla aikaansaadusta pellettimateriaalista (Kuva 3.6).



Kuva 3.6. Kuivattun lietteen pelletöintilaitte ja pelletöityä lietettä (KAHL Recycling)

Termisesti kuivatun lietteen varastointi tulee toteuttaa esimerkiksi tiiviillä varastosäiliöillä siten, että liete ei ime itseensä kosteutta ulkoilmasta. Varastoinnissa tulee huomioida täysin kuivatun lietteen (> 85 % TS) mahdolliset palo- ja räjähdysriskit, jotka ovat erityisesti suuria pölymäisen lietteen kohdalla. Toisaalta < 85 % TS liete voi homehtua varastoitaessa (Lohiniva et al. 2001). Palo- ja räjähdysriskejä voidaan hallita kuivaamalla liete matalampaan kuiva-ainepitoisuuteen, minimoimalla lietteen varastointi (johtaminen suoraan jatkokäsittelyyn), rakeistamisella, ilmatiiviillä varastoinnilla sekä typpikaasun syöttämisellä varastosäiliöön. (Sitra 2007; Flaga 2007). Useilla laitoksilla on toteutettu myös typpikaasun syöttömahdollisuus suoraan kuivaimeen.

Relevantti laitoksen mittakaava

Termisiä kuivauslaitteita on saatavilla hyvin erilaisille kapasiteeteille. Pienimmät kaupallisesti saatavilla olevat laitteet ovat suuruusluokkaa 3000 t/a linkokuivattua lietettä, riippuen syötteen ja tuotteen kosteudesta. Suurimpien laitteiden kapasiteetti on jopa 100 000 t/a linkokuivattua lietettä, ja monilinjaisena on toteutettu jopa noin 500 000 t/a kuivauslaitoksia.

Taloudellisesti kannattavinta terminen kuivaus on suhteellisen suurissa yksiköissä, joissa energiataloudellisuus on pieniä yksiköitä parempi. Taloudellinen kannattavuus riippuu pitkälti saatavilla olevan energian kustannuksista ja lopputuotteen hyödyntämisestä sekä kysynnästä. (Pöyry Switzerland 2017; Sitra 2007). Arvioidaan, että pienin järkevä kokoluokka termiselle kuivaukselle on noin 10 000 t/a (30 % TS).

3.1.2 Tuotteet ja sivutuotteet

Prosessin tuotteet

Termisesti kuivattua lietettä voidaan käyttää maanparannusaineena, polttoaineena, tai muiden termisten käsittelyiden, kuten torrefioinnin, pyrolyysin tai kaasutuksen, raaka-aineena.

Kuivatun lietteen määrä riippuu tulevan ja lähtevän lietteen kuiva-ainepitoisuuksista. Esimerkiksi kuivattaessa termisesti 1000 kg linkokuivattua lietettä (30 % TS) kiintoainepitoisuuteen 90 % TS (jäljempänä: 30 % TS → 90 % TS), on termisesti kuivatun lietteen massa laskennallisesti 333 kg, josta kuiva-ainetta on 300 kg.

Terminen kuivaus hygienisoi lietteen tehokkaasti kun käytetään riittävän korkeaa lämpötilaa ja kuivatusaika. Lannoitustuotteiden tyyppinimiluettelon mukaisesti termisesti kuivatun lietteen kuiva-ainepitoisuuden tulee olla vähintään 90 %, tai hygienisoituminen on hyväksynnän yhteydessä validoitava (Evira 2017). Tyyppinimiluettelossa (Evira 2017) esitetään esimerkiksi lämpökäsittelylle 80 °C viipymäajan ollessa 2 tuntia. Naturvårdsverket suosittelee vähintään 70 °C lämpökäsittelyn viipymäksi vähintään 30 min (Naturvårdsverket 2013).

Orgaanisten haitta-aineiden pitoisuuksien ei ole todettu muuttuvan merkittävästi termisessä kuivauksessa (Kainulainen 2017). Myös raskasmetallit säilyvät termisesti kuivatussa tuotteessa, mutta niiden pitoisuudet suomalaista lietettä käsiteltäessä alittavat tyyppillisesti lainsäädännön asettamat rajat.

Termisen kuivauksen lämpötilat ovat muovien hajoamisen kannalta pääosin liian alhaisia, joten voidaan arvioida, että termisellä kuivauksella ei saavuteta mikromuovien poistoa (LIITE 1).

Termisesti kuivattu jätevesiliete on hyväksytty lannoitevalmisteiden tyyppinimiluetteloön tyyppinimellä 3A2/5 Kuivarae tai -jauhe. Suomessa terminen kuivaus ja termisesti kuivatun lietteen lannoitekäyttö ei ole yleistynyt. Termisen kuivauksen on todettu vähentävän rautasaostettua lietettä käsiteltäessä fosforin saatavuutta kasveille (Lemming et al. 2017).

Sivutuotteet ja jätteet

Termisessä kuivauksessa muodostuu kaasuseos, johon haihtuva vesihöyry, tuuletusilma ja prosessissa vapautuvat kaasut sitoutuvat. Poistokaasujen määrä riippuu merkittävästi prosessityypistä ja toimintaparametreista. Suuruusluokkana poistokaasujen määrä on noin 8 000 – 1 0000 m³ / t H₂O_{poistettu}. Käsitellyn lietteen määrän suhteutettuna tämä vastaa noin 5 500 – 7 500 m³ / t lietettä (30 % TS → 90 % TS).

Muodostuvien kaasujen kosteuspitoisuus on korkea ja ne sisältävät suuria pitoisuuksia epäpuhtauksia, kuten orgaanista ainetta, kiintoainetta ja typpiyhdisteitä sekä pölyä (Lohiniva et al. 2001). Termisen käsittelyn poistokaasut onkin käsiteltävä haju- ja hiukkaspäästöjen välttämiseksi.

Merkittävin hajupäästöjen aiheuttaja poistokaasussa on ammoniakki, joka voidaan poistaa kemiallisesti, esim. happopesurilla. Happopesurin tuotteena muodostuu ammoniakkipitoista liuosta, kuten ammoniumsulfattia tai ammoniakivettä. Liuosta voidaan käyttää esim. nestemäisenä typpilannoitteena tai lannoiteteollisuuden raaka-aineena, mutta käytännössä kysyntä näihin tarkoituksiin on vähäistä kuljetus- ja levityskustannusten sekä liuoksen sisältämien epäpuhtauksien ja teollisuuden tarpeisiin nähden matalan typpipitoisuuden vuoksi. Mikäli tuotettua liuosta ei saada johdettua hyötykäyttöön, se yleensä joudutaan johtamaan viemäriin. Tuotetun liuoksen määrä riippuu lietteen typpipitoisuudesta ja kuivausprosessin toiminnasta. Esimerkiksi pitoisuudeltaan 20 % ammoniumsulfattiliuosta muodostuu arviolta noin 15 – 25 L / t H₂O_{poistettu} tai 10 – 15 L / t lietettä (30 % TS → 90 % TS).

Mikäli vaaditaan erityisen matalaa hajuvaikutusta, voidaan poistokaasut käsitellä lisäksi biologisella suodattimella. Ennen poistoilman käsittelyä biosuodattimella täytyy poistoilma jäähdyttää, jolloin poistoilmasta tiivistyy vesihöyryä vedeksi. Muodostuva jätevesi sisältää merkittäviä määriä kiintoainetta, orgaanista ainetta ja typpeä. Muodostuvan jäteveden määrä on tyypillisesti suuruusluokkaa 0,5 – 0,7 m³ / t H₂O_{poistettu} tai 0,35 – 0,45 m³ / t lietettä (30 % TS → 90 % TS).

3.1.3 Ympäristövaikutukset

Termisen kuivauksen merkittävimmät suorat ympäristövaikutukset liittyvät termisen kuivauksen poistoilman käsittelyyn. Käsittelemättömänä poistoilma aiheuttaa merkittäviä hajupäästöjä. Hajupäästöt voidaan saada tyypillisesti tasolle <2 500 hy/m³ kemiallisella pesulla ja tasolle < 500 hy/m³ käyttämällä lisäksi biosuodatinta.

Kuivatuksen tekniikasta ja kuivaustasosta riippuen termisesti kuivatussa materiaalissa voi olla pölyämistä aiheuttavaa hienoa ainetta. Pölyäminen tulee huomioida materiaalin varastoinnissa ja käsittelyssä. Pölyämistä voidaan estää esimerkiksi pelletöinnillä.

Jätevesilietteen kuljetuksista ja varastoinnista voi aiheutua hajuhaittoja, melua ja tärinää. Laitoksen toiminnasta voi aiheutua toiminnan luonne huomioiden normaalia melua ja tärinää.

3.1.4 Taloudellisuus ja kustannukset

Energiatalous

Terminen kuivaus vaatii yleensä lämpöenergiaa haihdutettua vesimäärä kohti noin 0,7 – 1,0 kWh_{th} / kg H₂O, mikä vastaa n. 500 – 700 kWh_{th} / t lietettä (30 % TS → 90 % TS). Lämmön lisäksi laitteistot kuluttavat tekniikasta riippuen sähköenergiaa tyypillisesti noin 20 – 50 kWh_{el} / t lietettä (30 % TS → 90 % TS).

Suurehkon lämmönkulutuksen vuoksi termisen kuivauksen taloudellinen käyttö vaatii, että saatavilla on edullinen energianlähde, esim. biokaasua käyttävän CHP-laitoksen, lietteen polton tai teollisuusprosessien ylijäämlämpö. Mikäli lietteen käsittelyssä ei tuoteta kuivauksen tarvitsemää energiaa, käytetään muuta lämmönlähdettä, kuten erillisen polttolaitoksen tuottamaa lämpöä.

Investointikustannukset

Investointikustannukset on arvioitu ns. Turn Key -hintana, ja investoinnin poisto on laskettu käyttäen korkokantana 5 % ja poistoaikana 20 vuotta.

Termisen kuivauksen investointikustannukset koostuvat kuivauslaitteistosta ja sen oheisprosesseista, kuten syöttöjärjestelyistä, varastoista, kaasujen käsittelystä, rakennuksista ja infrastruktuurista. Mikäli poistokaasut tulee käsitellä biosuodattimella, ovat kaasujen käsittelyn kustannukset huomattavasti korkeammat kuin pelkkää happopesuria käytettäessä.

Kokonaisinvestoinnin arvioidaan olevan kapasiteettiin suhteutettuna suuruusluokkaa 150 – 200 EUR / t/a linkokuivattua lietettä (30 % TS). Esimerkiksi 30 000 t/a linkokuivattua lietettä (30 % TS) käsittelevän laitoksen investointikustannus olisi noin 5 – 8 milj. EUR. Elinkaarikustannuksiksi käsiteltäviä lietemääriä kohden muutettuna (poistoaika 20 vuotta, korkokanta 5 %) investointikustannus on noin 15 – 20 EUR/t (30 % TS).

Käyttökustannukset

Käyttökustannuksissa on huomioitu käsittelyn suorat kustannukset, sisältäen energian, kemikaalit ja henkilöstökulut. Lietteiden ja lopputuotteen kuljetuskustannuksia käsittelyyn tai käsittelylaitoksesta käyttökohteeseen ei ole huomioitu, mutta jätteiden käsittelykustannukset on huomioitu. Hyödynnettyille tuotteille on käytetty nollahintaa.

Käyttökustannukset riippuvat useista tekijöistä, kuten tulevan ja kuivatun lietteen kuiva-ainepitoisuuksista, saatavilla olevan energian hinnasta, tarvittavasta poistokaasujen käsittelystä ja laitoksen mittakaavasta. Poistokaasun käsittelytapa vaikuttaa käyttökustannuksiin, sillä mahdollisen biosuotimen vaatima lauhdutus tuottaa merkittävän määrän jätevettä, joka aiheuttaa tapauksesta riippuen joko ylimääräistä kuormaa ja kustannuksia jätevedenpuhdistamolla tai jätevesimaksuja.

Ilman biosuodatinta, olettaen sähkönkulutukseksi $30 \text{ kWh}_{\text{el}} / \text{t}$ lietettä (30 % TS → 90 % TS) ja lämmönkulutukseksi $600 \text{ kWh}_{\text{th}} / \text{t}$ lietettä (30 % TS → 90 % TS), sähkön hinnalla 100 EUR/MWh ja lämmön hinnalla 30 EUR/MWh ovat arvioidut käyttökustannukset noin 30 – 40 EUR / t lietettä (30 % TS → 90 % TS). Kokonaiskustannukset olisivat siis noin 45 – 60 EUR / t lietettä (30 % TS).

3.1.5 Tekniikan valmiusaste ja referenssit

Tekniikan valmiusaste ja kehittämistilanne

Terminen kuivaus on yleisesti käytössä olevaa tekniikkaa, jonka käytöstä on kokemusta jo useiden vuosikymmenten ajalta. Tekniikan valmiusastetta kuvaava TRL-luku (Technology Readiness Level) on 9, eli tekniikka on todettu toimivaksi ja menestyväksi käytössä aidossa toimintaympäristössä (Taulukko 3.2).

Tekniikkaa kehitetään edelleen muun muassa energiatehokkuuden osalta. Kuivaustekniikoiden ja valmistajien välillä on kilpailua, mikä edesauttaa kehitystä. Termisen kuivauksen laitteistoja on markkinoilla useita eri tyyppisiä ja eri lämpötiloissa sekä eri lämmönsiirtomateriaaleilla toimivina, joten erilaisiin kohteisiin voidaan löytää valmiina sopiva laitteisto.

Referenssilaitokset

Länsi-Euroopassa on käytössä yli sata täyden mittakaavan lietteen termistä kuivauslaitosta, joista valtaosaa käytetään esikäsitellynä muille termisille käsittelyprosesseille (Pöyry Switzerland 2017). Pelkästään Saksassa oli vuonna 2012 käytössä 114 kuivauslaitosta (UBA). Suomessa kuivauslaitoksia on tietyvästi käytössä kolme: Haapaveden Ympäristöpalvelut Oy:n laitos, Joensuun Vesi Oy:n laitos ja Lakeuden Etappi Oy:n laitos Ilmajoella.

Haapavesi

Haapaveden Ympäristöpalvelut Oy:n kuivauslaitoksessa liete käsitellään Veolian/Krügerin toimittamassa BioCon-nauhakuivurissa, jossa on kolme kuivauskammiota. Ensimmäisessä kammiossa kuivausilman lämpötila on 120 – 180 °C, toisessa ja kolmannessa 75 – 100 °C. Kuivurin ympäristöluvun mukainen suurin sallittu käsittelymäärä on 1 500 t TS/a, mikä vastaa noin 80 % laitoksen maksimikapasiteetista 10 % TS lietteelle. Kuivatun lietteen kiintoainepitoisuus on tyypillisesti 90 – 93 %. Valtaosa käsitellystä lietteestä tulee Haapaveden jätevedenpuhdistamolta, jonka käsittelemästä jätevedestä suurin osa on meijerijätevettä. Kuivattavan lietteen kiintoainepitoisuus on ollut v. 2009 keskimäärin noin 12 % ja vaihdellut välillä 9 – 18 %.

Kuivausprosessin energianlähteenä käytetään laitoksen yhteydessä toimivan Vapo Oy:n voimalaitoksen höyryä, josta lämpö siirretään lämmönvaihtimilla kuivausilmaan. Höyryn kulutus v. 2009 oli keskimäärin 1 085 kWh/t H₂O.

Kuivattu liete poltetaan Vapo Oy:n voimalaitoksessa. Kuivatun, polttoon johdetun lietteen lämpöarvo on ollut 2,5 – 3,0 MWh/ TS. Myös kuivurin poistokaasut ja lietteen vastaanottoilojen poistokaasut johdetaan polttokattilaan. Lietteestä on saatu noin 35 % kuivauksen kuluttaman höyryn energiasta. Heikkoa energiataloutta selittää lietteen matala kiintoainepitoisuus. Sähköenergian kulutus on ollut noin 47 – 52 kWh/t H₂O. Kuivattu liete voidaan polton ohella johtaa myös maanparannuskäyttöön. (PSAVI 2013)

Joensuun Vesi Oy

Joensuun Vesi Oy:n lietteen terminen kuivausjärjestelmä on Sevar'in toimittama nauhakuivain, jossa liete kuivataan kuumalla ilmalla (120 – 160 °C). Kuivain on otettu käyttöön vuonna 2000. (VTT 2001)

Termiseen kuivaukseen syötettävä liete on mädätettyä, mekaanisesti kuiva-ainepitoisuuteen 20 – 25 % kuivattua lietettä. Kuivatun lietteen kiintoainepitoisuus on 80 - 85 %. Lämmönlähteenä käytetään öljykattilaa. Termisen kuivauksen poistoilma käsitellään täytekappalepesurilla, jolla ilmasta poistetaan ammoniakkia, rikkivetyä ja orgaanisia hiilivetyjä. Poistoilman lauhde johdetaan rejektinä takaisin puhdistamolle. (ISY 2008)

Termisesti kuivattu liete johdetaan kompostoinnin raaka-aineeksi mekaanisesti kuivatun lietteen seassa. Kuivatulle tuotteelle ei saada lisäarvoa, joten saavutettava hyöty on pieni käsittelyn energiankulutukseen ja muihin käsittelyn kustannuksiin nähden. (Paganus 2019)

Lakeuden Etappi, Ilmajoki

Lakeuden Etappin biokaasulaitoksessa käsitellään jätevesilietettä, biojätettä ja teollisuuslietteitä. Laitoksen kapasiteetti on 41 000 t/a lietettä (TS 17 %) ja yhteensä 14 000 t/a biojätteitä ja teollisuuden lietteitä. Kuivattu mädäte pelletoidaan lannoiterakeeksi, jota markkinoidaan maanparannuskäyttöön. Lannoiteraketta voidaan tuottaa enimmillään n. 8 000 t/a. Mädätysjännös linkokuivataan 30 % kuiva-ainepitoisuuteen ennen termistä kuivausta, jossa kuiva-ainepitoisuus nostetaan 90 %:iin. Kuivauksen poistokaasut käsitellään ammoniakkipesurilla ja biosuotimella. (Jääskeläinen 2009)

Vuonna 2018 laitos käsitteli noin 28 600 t jätevesilietettä, 4 900 t biojätettä ja 2 100 t rasvakaivo-lietettä. Kuivaraetta tuotettiin noin 3600 t (Lakeuden Etappi 2019). Lannoiterakeen menekki maa-

talouteen on ollut hyvä, ja sitä on käytetty erityisesti uusien peltojen perustamisessa. Tuotteen hintaluokka on tällä hetkellä 5 EUR/t, jolla katetaan käytännössä lastauksen ja asiakaspalvelun kustannukset. Haittapuolena nähdään prosessin energiantensiivisyys, sillä valtaosa laitoksen tuottamasta biokaasusta kuluu kuivauksen tarvitseman lämmön tuottamiseen. (Bäcklund 2019)

3.2 MÄRKÄHIILTO (HTC)

3.2.1 Tekniikan kuvaus

Tekniikan luonne ja tavoite

Märkähiilto (Hydrothermal Carbonization, HTC) on prosessi, jossa kosteaa biomassaa käsitellään hapettomissa oloissa korkeassa paineessa ja noin 180 – 250 °C lämpötilassa. Märkähiillolla käsitelty liete voidaan kuivata mekaanisesti jopa n. 50 – 70 % kuiva-ainepitoisuuteen. Kuivan hiilifraktion ohella prosessissa syntyy nestefraktio (rejekti) ja kaasufraktio. Käsittelyn viipymäaika on yleensä muutamia tunteja, tyypillisesti n. 2 – 5 h. (Ylivainio et al. 2019; Mendler 2012)

Märkähiilto on kemiallisesti monimutkainen prosessi, jossa biomassan orgaanista ainetta hydrolysoituu eli hajoaa pienemmiksi orgaanisiksi molekyyleiksi reaktiossa veden kanssa. Biomassasta poistuu vetyä ja happea, ja tällöin vapautuu hiilidioksidia. Pienemmiksi molekyyleiksi hajotettu biomassa voi muodostaa uudelleen kompleksisempia orgaanisia yhdisteitä. (Ylivainio et al. 2019; Mendler 2012)

Märkähiiltoa on tutkittu pääasiassa erilaisille biomassoille niiden poltto-, varastointi- ja kuljetusominaisuuksien parantamiseksi. Laajimmin tutkittu sovelluskohde märkähiillolla käsitellylle biomassalle on käyttö polttoaineena kivihiilen korvaajana. Lietteen käsittelyssä lähtökohta on ollut lietteen kuivattavuuden parantaminen mekaanisin menetelmin sekä lietteen käyttö polttoaineena. Märkähiillolla voidaan käsitellä sekä mädätettyä että mädättämätöntä lietettä, mutta mädätetyn lietteen käsittely vaatii enemmän ulkoista energiaa (Mendler 2012).

Mekaanisesti kuivatun märkähiilletyn lietteen lämpöarvo on riittävän korkea autotermiseen poltoon, eli sitä voidaan polttaa ilman apupolttoainetta (C Green 2019). Lietteen märkähiillon tuotetta voitaisiin mahdollisesti käyttää myös maanparannusaineena, sillä sen arvioidaan lisäävän maan hiilipitoisuutta lisäten huokoisuutta ja lisäävän eroosion kestoa sekä veden ja ravinteiden pidätyskykyä. Lisäksi on tutkittu mahdollisuutta käyttää märkähiillettyä lietettä suodatinmateriaalina tai adsorbenttina. (Ylivainio et al. 2019)

Fosforin talteenottoon märkähiillon yhteydessä on kehitteillä tekniikoita, jotka perustuvat kemialliseen fosforin liuotukseen ja saostukseen hyödynnettävässä muodossa. Nämä tekniikat ovat kuitenkin vielä kehitysasteella, eikä niitä ole täydessä mittakaavassa toteutettu.

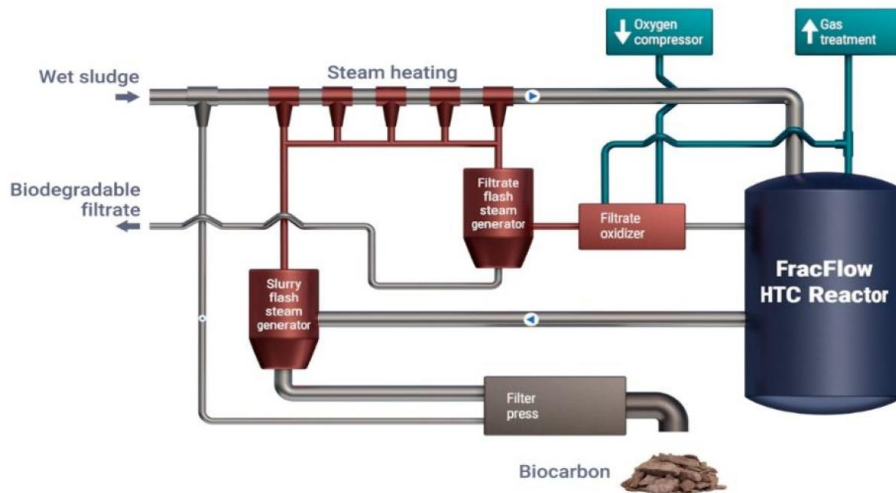
Toimintaperiaate

Märkähiilto tapahtuu reaktorissa, jonka tilavuus pysyy vakiona eikä reaktorista poisteta kaasua käsittelyn aikana. Reaktorin kaasutila kyllästyy vesihöyryllä ja paine nousee noin 20 – 35 bar tasolle. Lämpötila on noin 180 – 250 °C ja viipymäaika tyypillisesti muutamia tunteja (n. 2 – 5 h). Prosessi tuottaa lämpöä, mutta useimmiten biomassaa täytyy lisäksi lämmittää ulkoisella energialla. Prosessissa voidaan käyttää katalyyttiä reaktioiden nopeuttamiseksi. (Buttmann 2018; Ylivainio et al. 2019)

Liete syötetään reaktoriin märkänä, kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti n. 8 – 15 %. Mekaanisesti kuivattua lietettä käsiteltäessä syötemateriaalia tulee yleensä laimentaa. Laimennukseen voidaan

käyttää märkähiilokäsittelyn jälkeisen kuivauksen rejektivettä. (C Green; Mendler 2012). Liete kuumennetaan ennen reaktoriin syöttämistä tai reaktorissa esimerkiksi termoojlyllä tai höyryllä.

Märkähiilokäsittelyn jälkeen liete viilennetään lämmönvaihtimin. Jäähdytetty liete kuivataan mekaanisesti suodatuspuristimella (chamber/filter press) noin 50 – 70 % kuiva-ainepitoisuuteen. Kuivauksesta saatava kiintoainefraktio johdetaan jatkokäyttöön, yleensä polttoon. Rejektivesi voidaan johtaa mädättämöön, jossa sen sisältämä biohajoava aines hajoo lisäten biokaasun tuotantoa.



Kuva 3.7. Esimerkki märkähiiltoprosessista. Tässä esimerkkitapauksessa prosessin tarvitsema lämpö tuotetaan osittaisella märkähapetuksella (C Green 2019)

Tekniikat

Syötteen ja esikäsittely

Liete johdetaan käsittelyyn sakeutettuna tai mekaanisesti kuivattuna noin 8 – 15 % kiintoainepitoisuudessa. Liete voi olla mädätettyä tai mädättämätöntä. Mikäli liete on kuivattu mekaanisesti > 15% kiintoainepitoisuuteen, tulee liete laimentaa sopivaan kiintoainepitoisuuteen. Laimennuksessa voidaan käyttää myös märkähiilokäsittelyn jälkeen tapahtuvan mekaanisen kuivauksen rejektivettä.

Jälkikäsittely ja varastointi

Märkähiilletty liete kuivataan mekaanisesti. Mekaanisesti kuivattu märkähiilletty liete voidaan pelletoida varastoinnin ja käsiteltävyyden parantamiseksi. Pelletöinnissä ei tarvita kemikaaleja (C Green 2019). Prosessiin voidaan sisällyttää fosforin talteenottokäsittely, joka toteutetaan varsinaisen märkähiiloreaktorin jälkeen (ks. kappale 3.2.2.)

Relevantti laitoksen mittakaava

Maailmalla toteutetut ja laitetoimittajien markkinoimat märkähiiloreaktorit ovat suuruusluokkaa 7 000 - 25 000 t/a biomassaa tai lietettä (n. 30 % TS) (AVA-CO2 2012; Ingelia; C Green 2019; Buttman 2018). Arvioidaan, että taloudellisesti kannattava laitoksen kokoluokka on vähintään lietettä 10 000 t/a 30 % TS (30 000 t/a 10 % TS). Tekniikka perustuu määrän lietteen käsittelyyn, joten märkähiilolaitoksen sijoittaminen puhdistamon yhteyteen on logistisesti edullista. Mekaanisesti kuivattu liete voidaan kuitenkin myös laimentaa prosessia varten.

3.2.2 Tuotteet ja sivutuotteet

Prosessin tuotteet

Prosessin päätuote on märkähiillon kuivattu kiintoaine- eli hiilifraktio. Hiilen kuiva-ainepitoisuus on suodatuspuristimella tapahtuvan kuivauksen jälkeen tyypillisesti n. 50 – 70 %. Osa orgaanisesta aineesta hajoaa prosessissa ja sitoutuu rejektiveteen sekä kaasufraktioon, joten haihtuvan kiintoaineen (VS) osuus on alempi kuin lietteessä. Esimerkiksi HSY:n kokeissa (Kainulainen 2017) VS:n osuus kokonaiskiintoaineesta aleni märkähiilossa 59 %:sta 42%:iin. Kokonaisuutena kiintoainees-ta poistuu käsittelyssä noin 25 % (Buttmann 2018).



Kuva 3.8 Märkähiillettyä lietettä mekaanisen kuivauksen ja pelletöinnin jälkeen (C Green 2019)

Valtaosa hiilestä (n. 50 – 80 %), valtaosa fosforista ja noin puolet typestä sitoutuu kiintoainefraktioon (Ylivainio et al. 2019; Kainulainen 2017). Fosforin käyttökelpoisuuden kasveille on kuitenkin todettu vähenevän sekä raudalla saostetun että ilman rautasaostusta saadun lietteen märkähiilokäsittelyssä (Ylivainio et al. 2019). Puhdistamolietteestä valmistetun märkähiilletyn kiintoaineen ylempi lämpöarvo on tyypillisesti 12 – 15 MJ/kg, riippuen materiaalin tuhkapitoisuudesta (C Green 2019).

Märkähiilossa liete hygienisoituu täysin (Ylivainio et al. 2019). Raskasmetallit sitoutuvat pääosin hiilifraktioon, ja niiden pitoisuus suhteessa kuiva-ainemassaan kasvaa kiintoainemassan vähentyessä. HSY:n kokeissa (Kainulainen 2017) raskasmetallien pitoisuudet alittivat yhtä kontaminaatioksi epäiltyä tapausta lukuun ottamatta lannoitetuotteille asetetut maksimiarvot. Lähimpänä rajaa olivat kadmiumin (0,9 mg/kg TS), kuparin (540 mg/kg TS) ja elohopean (0,59 mg/kg TS) pitoisuudet. Lannoitetuotteiden maksimipitoisuudet ovat: kadmium 1,5 mg/kg TS; kupari 600 mg/kg TS; elohopea 1,0 mg/kg TS.

Märkähiillon vaikutuksia lietteen haitta-ainepitoisuuksiin on tutkittu varsin vähän. Weiner et al. (2013) tutkivat märkähiillon vaikutusta 10 orgaanisen haitta-aineen ja lääkeaineen poistoon. Tutkitut aineet olivat atratsiini, bisfenoli-A (BPA), PCB 2, 2-kloorinaftaleeni, DDT, diklofenaakki, dinitrotolueeni, β -HCH, ibuprofeeni, nonyylifenolit (NP) ja triallaatti. Käytetyt lämpötilat olivat 200 ja 255 °C ja viipymäajat 4h ja 16 h.

Tutkituista aineista atratsiini (70 – 100% poisto), BPA (70 – 90 %) ja tetrabutyyliini (80 – 100 %) ja triallaatti (50 – 100 %) poistuivat varsin tehokkaasti. Dinitrotolueeni (20 – 100%), β -HCH (20 – 100 %), nonyylifenolit (40 – 80%) poistuivat vaihtelevat olosuhteista riippuen. DDT poistui käsittelyssä, mutta noin 40 % siitä muuntui haitalliseksi DDE:ksi. Samoin diklofenaakki poistui käsittelyssä, mutta sen hajoamistuotteita esiintyi edelleen. Ibuprofeenista poistui vain 30 – 50 %. Yleisesti poisto oli

tehokkaampaa korkeammassa lämpötiloissa ja pidemmällä viipymäajoilla. Osa haitta-aineista poistui tehokkaammin, kun liuoksessa oli mukana orgaanista ainesta.

HSY:n kokeissa (Kainulainen 2017) märkähiilto lisäsi PAH-yhdisteiden määrää: PAH 16-yhdisteiden pitoisuus oli ennen käsittelyä 0,7 mg/kg TS ja käsittelyn jälkeen 3,4 mg/kg TS. Bisfenoli A:n määrä laski hieman (0,96 → 0,6 mg / kg TS), samoin kuin DEHP:n (19 → 14 mg/ kg TS). PFOS:n määrä kasvoi arvosta 0,003 mg/kg TS arvoon 0,052 mg/kg TS. BDE-aineiden määrä putosi arvosta 490 µg/kg TS alle määrittämissä rajat. Tutkituista lääkeaineista ofloksasiini, siprofloksasiini, tetrasykliini ja triklosaani vähenivät käsittelyssä alle määrittämissä rajat. Sen sijaan estroni E1:n määrä lisääntyi ollen hiilellä 0,28 µg.

Kokonaisuutena tutkimusten mukaan märkähiilto pienentää haitta-ainepitoisuuksia, mutta mm. tiettyjen lääkeaineiden poistossa tekniikka ei ole tehokas ja voi lisätä PAH-yhdisteiden määrää. Haitta-aineiden hajotessa myös syntyy prosessissa säilyviä, haitallisia hajoamistuotteita. Haitta-aineiden poisto riippuu prosessin olosuhteista, ja on yleensä parempi korkeammassa lämpötiloissa ja pidemmällä viipymäajoilla.

Muovien hajoamisen kannalta märkähiillon lämpötila-alue on useimpien muovien osalta liian alhainen (LIITE 1). Käsittelyn korkea paine voi osaltaan myös vaikuttaa muovien hajoamiseen, mutta tästä tarvittaisiin lisää tutkimustietoa.

TerraNova GmbH:n kehittämässä tekniikassa valtaosa fosforista (> 80 %) voidaan saada sitoutumaan reaktivesivirtaan pH:n säädöllä happamaksi (pH 1,5...3). Fosforia voidaan ottaa talteen reaktivedestä kalsiumfosfaattina lisäämällä kalsiumsilikaattihydraattia (CSH). Raskasmetallien pitoisuus tuotetussa lannoitetuotteessa on matala. Fosfaattipitoisuus tuotetussa lannoitetuotteessa on > 16 % ja sen kasveille saatavuutta kuvaava liukoisuus sitruunahappoon > 75 %. Typeä, tai kaliumia on tuotteessa vain vähän. Fosforin kokonaissaanto prosessissa on 60 – 80 %. Fosforin talteenottotekniikkaa ei ole käytössä yrityksen referenssilaitoksessa. (Buttmann 2018)

AVA-CO2 on kehittänyt fosforin talteenottotekniikkaa (AVA cleanphos), joka perustuu märkähiillon hiilituotteen happoliuotukseen, nanosuodatukseen ja saostukseen. Tuotteena muodostuu fosforihappoa. Yrityksen mukaan fosforin talteenotto tällä tekniikalla on energiatehokkaampaa kuin polttotuhkasta. Tekniikkaa on pilotoitu, mutta ei toteutettu täydessä mittakaavassa. (AVA-CO2 2015)

Sivutuotteet ja jätteet

Märkähiilto prosessissa mekaanisessa kuivauksessa syntyy merkittävä määrä typpipitoista rejektia. Rejektiveteen päätyy n. 5 – 20 % lietteen hiilestä ja noin puolet lietteen typestä. Rejektissä on myös merkittävä määrä erilaisia orgaanisia ja epäorgaanisia yhdisteitä, joihin sisältyy mm. rikkiä ja pienehkö määrä fosforia (C Green 2019). Rejektiveteen voi muodostua PAH-yhdisteitä, jotka haavoittavat heikosti jäteveden käsittelyprosessissa ja voivat siten lisätä puhdistamon lähtevän COD:n määrää.

Rejektiveden kiintoainepitoisuuksiksi mädättämättömän lietteen märkähiiltoissa Escala et al. (2011) raportoivat 2,5 – 2,8 % ja kokonaisorgaanisen hiilen (TOC) määräksi n. 1,3 – 1,4 %, josta > 90 % on liukoisessa muodossa (DOC). Typpipitoisuudet olivat n. 2600 – 4700 mg/L, ja ammoniumtyypin pitoisuudet n. 1100 – 2200 mg/L. Mädätetyn lietteen märkähiillon rejektiveden ammoniumtyypin pitoisuudet olivat 2100 – 2200 mg/L, ja keskimäärin mädättämättömän lietteen käsittelyä korkeampia.

Yleensä rejektivesi jäädytetään ja johdetaan takaisin puhdistamolle, mistä kuitenkin aiheutuu puhdistamolle lisäkuormitusta. (Ylivainio et al. 2019; Kainulainen 2017). Rejektivesi voi olla niin korkeasti kuormittunutta, että se täytyy erikseen esikäsitellä ennen johtamista puhdistamolle (Mendler 2012). Rejektivesi voidaan johtaa myös mädättämöön biokaasun tuotannon lisäämiseksi (C Green 2019). Tässä tulee kuitenkin huomioida ammoniuminhibition riski mädättämöissä.

Kaasufraktio muodostuu valtaosin hiilidioksidista, ja se sisältää syötteen hiilestä noin 2 – 5 % (Yli-vainio et al. 2019). Kaasu ei kuitenkaan sisällä juurikaan typpeä tai epäorgaanisia aineita (C Green 2019). Kaasut johdetaan käsittelyyn, joka tyypillisesti muodostuu lauhdutuksesta ja vesipesurista (C Green 2019). Kaasujen käsittelyssä muodostuu jätevesiä, jotka tulee johtaa käsiteltäväksi.

3.2.3 Ympäristövaikutukset

Märkähiiltokäsittelyssä muodostuu kaasuja, jotka tulee käsitellä hajuhaittojen välttämiseksi vastaa-vasti kuin termisen käsittelyn poistokaasut. Esimerkiksi lauhdutuksella ja vesipesurilla voidaan poistaa suurin osa poistokaasun sisältämästä orgaanisesta aineksesta. Poistokaasussa on merkit-tävä määrä hiilidioksidia, joka muodostuu prosessissa orgaanisen aineen hajotessa.

Jätevesilietteen kuljetuksista ja varastoinnista voi aiheutua hajuhaittoja, melua ja tärinää. Laitoksen toiminnasta voi aiheutua toiminnan luonne huomioiden normaalia melua ja tärinää.

3.2.4 Taloudellisuus ja kustannukset

Energiatalous

Märkähiiltoprosessissa vapautuu lämpöä, mutta prosessi vaatii toimiakseen ulkoista energiaa. Pro-sessin lämmöntuotanto on pienempi käytettäessä mädätettyä lietettä, joten ulkoisen energian tarve on tällöin korkeampi. (Mendler 2012)

Buttmann (2018) raportoi Kiinassa sijaitsevan märkähiiltolaitoksen kuluttavan sähköä noin 20 kWh/ t lietettä (23 % TS) ja lämpöä noin 130 kWh/t lietettä (23 % TS). Kuiva-ainepitoisuuteen 30 % TS muunnettuna kulutus on 26 kWh/ t ja lämmönkulutus n. 170 kWh/t. Escalan et al. (2011) mukaan prosessin ulkopuolisen lämmön tarve on n. 50 kWh/ t lietettä (30 % TS) ja sähkönkulutus merkityk-settömän pieni.

C Greenin tekniikka perustuu märkähapetukseen ja lämmön talteenottoon flash-höyrystimellä, jol-loin ulkopuolista lämpöä ei tarvita mutta sähkönkulutus on korkeampi. C Green (2019) arvioi laitok-sen sähkönkulutukseksi noin 250 kWh/t TS (75 kWh/t lietettä, 30 % TS), kun käsittelyyn tulevan lietteen kuiva-ainepitoisuus on 30 % TS ja käytetään nestemäistä happea. Mikäli happi tuotetaan laitoksessa PSA-tekniikalla (pressure swing adsorption), on sähkönkulutus n. 450 kWh/t TS (135 kWh/t lietettä, 30 % TS). Lämmön suhteen tekniikka on omavarainen. (C Green 2019).

Investointi- ja käyttökustannukset

Investointikustannukset on arvioitu ns. Turn Key -hintana, ja investoinnin poisto on laskettu käyttä-en korkokantana 5 % ja poistoaikana 20 vuotta. Käyttökustannuksissa on huomioitu käsittelyn suo-rat kustannukset, sisältäen energian, kemikaalit ja henkilöstökulut. Lietteen ja lopputuotteen kulje-tuskustannuksia käsittelyyn tai käsittelylaitoksesta käyttökohteeseen ei ole huomioitu, mutta jätte-i-den käsittelykustannukset on huomioitu. Hyödynnettäville tuotteille on käytetty nollahintaa.

Märkähiiltolaitosten arvioidut investointikustannukset vaihtelevat noin 3,5 milj. eurosta jopa 10 milj. euroon keskiuurille, noin 10 000 – 20 000 lietettä (30 % TS) käsitteleville laitoksille (Buttmann 2018; AVA-CO2 2012). Buttmann (2018) on arvioinut käyttökustannuksiksi vuodessa n. 550 000 EUR. Laskelmassa on oletettu käytettävän ilmaista jätelämpöä.

Kirjallisuustietojen pohjalta arvioidaan, että todelliset kustannukset ovat suuruusluokaltaan inves-toinnille 20 – 25 EUR / t (30 % TS) ja käyttökustannukset noin 30 – 40 EUR / t (30 % TS). Koko-naiskustannusten vaihteluväliksi arvioidaan siis noin 50 – 65 EUR / t (30 % TS)

3.2.5 Tekniikan valmiusaste ja referenssit

Tekniikan valmiusaste ja kehittämistilanne

Märkähiiltotekniikalla on toteutettu muutamia teollisen mittakaavan demonstrointilaitoksia ja tiittävästi yksi kaupallinen laitos. Olemassa olevilla laitoksilla on tehty kokeita jätevesilietteen märkähiiltokäsittelystä, mutta useimmilla niistä pääasiallinen käyttö on ollut muiden biomassojen käsittely polttoaineeksi. Lietteen käsittelymenetelmänä märkähiillon teknologisen valmiusasteasteen (TRL) arvioidaan olevan 7, eli teknologia on demonstroitu aidossa toimintaympäristössä (Taulukko 3.2).

Referenssilaitokset

Jining, Kiina

Saksalaisen TerraNova Energy GmbH:n märkähiiltoprosessi on ollut täydessä mittakaavassa käytössä vuodesta 2016. Laitos käsittelee n. 14 000 t/a linkokuivattua (23 % TS) lietettä. Laitoksen kapasiteettia on tarkoitus nostaa 40 000 tonniin vuodessa.

Karlsruhe, Saksa

Sveitsiläisen bioteknologiaan keskittyvän yrityksen AVA-CO2 AG:n pilot-laitos Karlsruhessa, Saksassa on ollut käytössä vuodesta 2010 (AVA-CO2 2010). Laitosta on kehitetty yhdessä Karlsruhe Institute of Technology:n (KIT) kanssa. Reaktorin tilavuus on 14,4 m³, ja laitoksen käsittelykapasiteetti 8400 t/a. Prosessin lämpötila on 220 °C ja paine 25 bar. Viipymäaika prosessissa on 2 – 5 h. (AVA-CO2 2012; Energie Forum Karlsruhe)

Heinola, Suomi

Suomessa täyden mittakaavan märkähiiltolaitos on rakenteilla Heinolan Stora Enson sellu- ja paperitehtaalle. Prosessissa on tarkoitus käsitellä sellutehtaan lietteitä polttoaineeksi korvaamaan turvetta laitoksen CHP-kattilassa. Laitoksen kapasiteetti on 25 000 t/a n. 30 % TS lietettä. Laitoksen suunniteltu käyttöönottoaikataulu on vuoden 2019 toisella neljänneksellä. (C Green 2019)

3.3 TORREFIOINTI

3.3.1 Tekniikan kuvaus

Tekniikan luonne ja tavoite

Torrefiointi on tekniikka, jossa biomassaa käsitellään termisesti hapettomissa oloissa noin 200 – 350 °C lämpötilassa. Prosessissa käsiteltävästä materiaalista poistuu kaikki kosteus, ja orgaaninen aines muuntuu termokemiallisten reaktioiden seurauksena. Prosessissa syntyy hiiltynyt kiinteä tuote sekä kaasuja ja höyryjä, jotka jäähtyessään tiivistyvät öljymäiseksi nesteeksi. Torrefiointi on tekniikkana lähellä hidasta pyrolyysiä, mutta prosessin lämpötila on matalampi. Lietteen käsittelyä torrefioinnilla on tutkittu, mutta sitä ei ole laitosmittakaavassa toteutettu.

Torrefiointi muuttaa käsiteltävän materiaalin ominaisuuksia useilla tavoilla. Keskeisimpiä muutoksia ovat (Ylivainio et al. 2019; Ribeiro et al. 2018):

- Materiaalista poistetaan kaikki kosteus
- Massa pienenee (orgaanista ainesta poistuu)
- Lämpöarvo kasvaa
- Hydrofobisuus lisääntyy, eli materiaali ei kostu niin helposti, mikä parantaa säilyvyyttä
- Materiaali on helpommin jauhautuvaa

- Biomassasta poistuu haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, happea ja vetyä. Happi/hiili- (O/C) ja vety/hiili (H/C) -suhteet alenevat.
- Aineen mikrohuokosrakenne hajoaa ja täyttyy terva- ja öljymäisillä yhdisteillä.
- Materiaali on tasalaatuisempaa

Torrefiointia käytetään tällä hetkellä pääasiassa erilaisten lignoselluloosapitoisten biomassojen käsittelyyn. Teollisessa tai tutkimusmittakaavassa torrefiointia käytetään mm. puuhakkeen, kuorikkeen, oljen ja muiden korjuujätteiden, elintarviketeollisuuden jätteiden, lannan ja metsäteollisuuden lietteiden käsittelyyn. Pääasiallisesti tavoitteena on biopohjaisten polttoaineiden tuotanto. Yksi merkittävä tekijä biomassan torrefioinnissa on, että torrefioitua biomassaa voidaan polttaa hiilikattiloissa ja syöttää hiilimyllyyn, jolloin biomassalla voidaan korvata fossiilista hiiltä ilman, että olemassa oleviin voimalaitoskattiloihin tarvitaan merkittäviä muutosinvestointeja.

Puhdistamolietteen torrefiointia on tutkittu varsin vähän, ja esimerkiksi pyrolyysiin verrattuna prosessin toimintamekanismeja ja lietteen ominaisuuksien vaikutusta torrefioitun tuotteen laatuun ei juuri tunneta (Pulka et al. 2019). Myös jätevesilietteen torrefioinnin tutkimuksessa lähtökohtana on useimmissa tehdyissä tutkimuksissa ollut polttoaineen tuotanto. (mm. Pulka et al. 2019, Karki et al. 2018, Poudel et al. 2015, Atienza-Martinez et al. 2013). Luonnonvarakeskus on tutkinut puhdistamolietteen torrefioinnin vaikutuksia lannoitekäytössä laboratoriomittakaavan kokeissa (Ylivainio et al. 2019).

Toimintaperiaate

Torrefiointi tapahtuu tyypillisesti noin 200 – 350 °C lämpötilassa. Lämpötilan ohella merkittävä prosessin parametri on lämmitysnopeus, joka tyypillisesti on < 50 °C/min. Viipymäaika torrefioinnissa on yleensä 5 – 60 min, ja riippuu pääasiassa syötemateriaalin palakoosta. (Pulka et al 2019; Ylivainio et al. 2019)

Torrefiointiprosessi koostuu viidestä päävaiheesta (Ribeiro et al. 2018):

1. Kuumennus: Biomassa kuumennetaan lämpötilaan, jossa vapaa kosteus alkaa haihtua
2. Esikuivaus: kuivaus 100°C:ssa, jolloin kaikki vapaa vesi haihtuu
3. Jälkikuivaus: lämpötila nousee torrefiointilämpötilaan, ja orgaaniseen ainekseen kemiallisesti sitoutunut vesi haihtuu
4. Torrefiointi: Prosessin päävaihe, jossa orgaanisen aineksen termokemialliset muutokset tapahtuvat. Lämpötila n. 200 – 350 °C
5. Jäähdytys: Tuote jäähdytetään < 200 °C lämpötilaan ennen päästämistä kosketuksiin ilman kanssa itsesytyvyyden estämiseksi

Torrefioitun lietteen lämpöarvo riippuu torrefioinnin lämpötilasta. Pulkan et al. (2019) tutkimuksissa lietteen alempi lämpöarvo nousi hieman ≤ 240 °C torrefioinnissa, mutta laski voimakkaasti tätä korkeammilla lämpötiloilla. Poudel et al. (2015) havaitsivat lämpöarvon kasvua lämpötilaan 350 °C asti, mutta tätä korkeamman lämpötilan käsittelyssä materiaalin lämpöarvo aleni pyrolyysireaktioiden vuoksi. Poudel et al. (2015) esittävätkin lämpötila-aluetta 300 – 350 °C optimaaliseksi polttoaineena käytettävän lietepohjaisen hiilen tuottamiseksi.

Kuten pyrolyysissäkin, torrefioinnissa muodostuu höyryjä, jotka tiivistyessään muodostavat tervamaisia öljyjä. Näiden yhdisteiden sitoutuminen torrefioitavaan materiaaliin mm. lisää itsesytyvyysriskiä ja voi aiheuttaa kohonneita haitta-ainepitoisuuksia. Jotta vältetään öljymäisten yhdisteiden sitoutuminen torrefioitavaan materiaaliin, tulee muodostuvia kaasuja jatkuvasti poistaa reaktorista. Tervamaiset aineet voivat myös aiheuttaa ongelmia, mikäli ne tiivistyvät esimerkiksi laitteiston putkien sisäpinnoille. Laitteiston pintojen säännöllinen puhdistustarve lisää merkittävästi tarvittavan huoltotyön määrää ja lisää tarvetta seisokeille.

Torrefioinnin lämpötila ja viipymäaika vaikuttavat tuotteen ominaisuuksiin. Ylivainio et al. (2019) tutkivat lietteen torrefiointia eri lämpötiloissa, osin myös torrefiointia korkeammassa lämpötiloissa,

pyrolyysin lämpötila-alueella. Kokeet toteutettiin panostoimisesti typpi-ilmakehäisessä uunissa. Seuraavassa kuvassa on esitetty lietettä käsiteltynä 200 – 450 °C lämpötiloissa 15 minuutin ajan. Korkeammissa lämpötiloissa lietteen väri muuttuu selvästi tummemmaksi ja lopulta punertavaksi.



Kuva 3.9 Eri lämpötiloissa torrefioituja ja pyrolysoituja lietteitä. Käsitelyn lämpötila vasemmalta lukien 200, 235, 275, 300 ja 450 °C. Viipymäaika käsittelyssä 15 minuuttia. (Ylivainio et al. 2019)

Tekniikat

Torrefiointireaktoreita on panos- ja jatkuvatoimisia. Panostoimiset (fixed bed) reaktorit ovat yksinkertaisia anaerobisia uuneja, joita lämmitetään ulkopuolelta esimerkiksi sähköllä. Reaktorityypeistä tärkeimmät ovat:

- Ruuvireaktori
- Rumpureaktori
- Kiertopetireaktori
- Tärinäarinareaktori
- Monikerrosreaktori

Euroopassa pisimmälle kehitetty on tärinäarinareaktori. Lietteiden käsittelyssä lietteiden rakenteen vuoksi todennäköisesti parhaiten toimivia tekniikoita olisivat ruuvi- ja rumputekniikat, joita myös pyrolysoinnissa käytetään.

Syötteen ja esikäsittely

Torrefiointiprosessin kannalta syötteen keskeisiä ominaisuuksia ovat palakoko ja kosteus. Palakoko vaikuttaa merkittävästi torrefioinnin viipymäaikaan ja siihen, torrefioituuko materiaali kokonaan. Termisesti kuivattu liete on yleensä raekooltaan pientä, joten täydellinen torrefioituminen voidaan saavuttaa suhteellisen helposti ja varsin lyhyellä viipymäajalla. Materiaalin kuivaaminen on prosessin energiantensiivisin vaihe, ja vaikuttaa vaadittavaan prosessointiaikaan. Näistä syistä liete on tarkoituksenmukaista kuivata termisesti ennen torrefiointikäsittelyä.

Jälkikäsittely ja varastointi

Torrefioitu materiaali on syötteen rakenteesta riippuen hienojakeista tai suurempina partikkeleina. Lietteiden kohdalla materiaalin rakenne riippuu termisen kuivauksen tekniikasta ja mahdollisesta rakeistuksesta, esim. pelletöinnistä, termisen kuivauksen jälkeen. Mikäli termisessä kuivauksessa lietettä ei ole pelletöity, on muodostuva torrefioitu materiaali myös hienojakeista. Torrefioitu materiaali voidaan pelletöidä tai briketoida kuljetus- ja varastointiominaisuuksien parantamiseksi. Itsesytyvyyden välttämiseksi torrefioitu liete tulee jäähdyttää ja varastointi tulee toteuttaa ilmatiiviissä säiliössä varustettuna inertin kaasun, tavallisesti typen, syötöllä.

Relevantti laitoksen mittakaava

Biomassaa käsittelevät torrefioinnin referenssilaitokset ovat kapasiteetiltaan > 20 000 t TS/a. Lietteen käsittelyssä taloudellisesti järkevän mittakaavan arvioidaan olevan > 15 000 t/a (30 % TS). Tarjolla olevilla laitteistoilla on teknisesti mahdollista toteuttaa myös pieniä, noin 5 000 t/a (30 % TS) käsitteleviä laitoksia. Näissä kuitenkin käsiteltyä lietetonnin kohden muodostuva hinta on suhteellisesti korkeampi.

3.3.2 Tuotteet ja sivutuotteet

Prosessin tuotteet

Torrefioinnin päätuote on kiinteä hiilifraktio, jonka pääasiallinen yleisin käyttötarkoitus on polttoaine. Torrefioidun lietteen käyttöä maanparannusaineena on kuitenkin myös tutkittu (Ylivainio et al. 2019).

Torrefioinnissa lietteen lämpöarvon on raportoitu kasvavan $\leq 240 \dots 350$ °C torrefiointilämpötiloissa, mutta laskevan korkeammassa lämpötiloissa. (Pulka et al. 2018; Poudel et al. 2015). Tutkimuksissa torrefioidun lietteen lämpöarvo on ollut useimmiten luokkaa 13 – 22 MJ/kg (Pulka et al. 2019; Karki et al. 2018; Poudel et al. 2015), vaikkakin myös huomattavasti alempia arvoja, jopa <4 MJ/kg, on raportoitu (Pulka et al 2019).

Ylivainio et al. (2019) totesivat torrefioinnin vähentävän rautasaostetun lietteen fosforin käyttökelpoisuutta kasveille. Orgaanisen aineen määrä väheni torrefioinnissa erityisesti > 250 °C lämpötiloissa ja > 15 min viipymäajoilla. Enimmillään orgaanisesta kuivan lietteen kiintoaineesta poistui jopa 44 %. Torrefioinnin lämpötila ja viipymäaika vaikuttavat materiaalin hiiltymisasteeseen, ja materiaalin väri muuttuu tummemmaksi korkeammassa lämpötiloissa (Ylivainio et al 2019).

Haitta-aineiden poistosta torrefioinnissa on vähän tietoa. Olisikin tarpeen tutkia orgaanisten haitta-aineiden ja lääkeaineiden hajoamista torrefioinnin lämpötiloissa. Eri muovilaatujen hajoamislämpötilojen (LIITE 1) pohjalta voidaan arvioida, että muoveista valtaosa säilyy torrefioidussa tuotteessa lämpötiloissa < 300 °C.

Sivutuotteet ja jätteet

Torrefioinnin sivutuotteet ja jätteet ovat pitkälti vastaavia kuin pyrolyysissä.

Torrefiointia edeltävässä termisessä kuivauksessa syntyy poistokaasuja, jotka tulee käsitellä. Käsitelyssä syntyy tekniikasta riippuen tyypipitoista liuosta ja/tai jätevettä (Kappale 3.1.2).

Torrefioidun hiilen ohella prosessissa syntyy kaasuja ja höyryjä, jotka voidaan johtaa polttoon. Mikäli höyryt tiivistetään, muodostuu öljyä, joita voidaan käyttää esimerkiksi polttoaineena. Höyryjen tiivistys voi aiheuttaa niiden tiivistymistä pinnoille, mikä aiheuttaa puhdistus- ja huoltotarvetta. Öljyyn sitoutuu yleensä suuria pitoisuuksia PAH-yhdisteitä. Öljyn valmistaminen myös lisää prosessin monimutkaisuutta. Tiivistymättömät kaasut sisältävät mm. häkää ja metaania, ja ne on useimmiten käytännöllisintä käsitellä polttamalla.

Mikäli prosessissa syntyvät kaasut poltetaan, tulee muodostuvat savukaasut yleensä käsitellä jätteenpolton vaatimusten mukaisesti. Kun laitoksessa käsitellään ja osin poltetaan jätteeksi luokiteltavaa lietemateriaalia, laitokseen sovelletaan jätteen polton lainsäädäntöä, mikäli pyrolyysikaasuja ei puhdisteta siten, että kaasun ei enää katsota olevan jätettä eikä kaasun polttamisesta voi aiheutua suurempia päästöjä kuin maakaasun polttamisesta (YSL 527/2014 §107 2. Mom.). Päästörajoja määrittelee jätteenpoltoasetus (VNa 151/2013) sekä ympäristönsuojelulain (527/2014) nojalla BAT-vaatimusten mukaisesti BREF-dokumenttien päästövaatimukset, mikäli laitos katsotaan ns. direktiivilaitokseksi, eli BAT-vaatimuksia sovelletaan.

Savukaasujen käsittelyssä syntyy kiinteää savukaasujen käsittelyjätettä tai märkäpesutekniikkaa käytettäessä pesurin jätevetä. Lentotuhka sijoitetaan joko tavanomaisen tai vaarallisen jätteen kaatopaikalle sen ominaisuuksista riippuen. Savukaasujen käsittelyjäte johdetaan vaarallisen jätteen käsittelyyn. Savukaasupesurin jätevesi johdetaan viemäriin tai erilliseen jätevesien käsittelyyn. Savukaasujen käsittelyjätteen määrän arvioidaan olevan vastaava kuin pyrolyysissä tai hieman pienempi johtuen poltettavien kaasujen pienemmästä määrästä. Pyrolyysilaitoksen savukaasujen käsittelyjätteiden määräarviot on esitetty kappaleessa 3.4.2.

3.3.3 Ympäristövaikutukset

Torrefiointia edeltävän termisen kuivauksen poistoilma tulee käsitellä hajuhaittojen vähentämiseksi. Termisen kuivauksen poistoilman käsittelyssä muodostuu nestejakeita, jotka tulee johtaa hyötykäyttöön tai johtaa käsiteltäväksi jätevedenpuhdistamolla. Hajupäästöjä voi aiheutua lähinnä lietteen vastaanotossa ja varastoinnissa sekä termisen kuivauksen poistoilman kautta. Poistoilma tulee käsitellä hajuhaittojen vähentämiseksi.

Tekniikasta ja syötteen laadusta riippuen hiilessä voi olla pölyämistä aiheuttavaa hienoa ainesta. Pölyämistä voidaan estää kostuttamalla hiili käsittelyn jälkeen. Pölyäminen tulee huomioida materiaalin varastoinnissa ja käsittelyssä.

Jätevesilietteen kuljetuksista ja varastoinnista voi aiheutua hajuhaittoja, melua ja tärinää. Laitoksen toiminnasta voi aiheutua toiminnan luonne huomioiden normaalia melua ja tärinää.

3.3.4 Taloudellisuus ja kustannukset

Energiatalous

Kuivauksen lämmöntarve on noin 500 – 700 kWh / t lietettä (30 % TS). Tämän lisäksi itse torrefiointi vaatii energiaa arviolta noin 200 – 300 kWh / t termisesti kuivattua lietettä (90 % TS), eli noin 50 – 100 kWh / t lietettä (30 % TS). Tämä arvio perustuu biomassan torrefiointiin vaatimaan lämpöenergiaan. On esitetty myös arvioita, että lietteen torrefiointiin vaatima energia on pienempi kuin lignoselluloosapitoisen biomassan (Pulka et al 2019). Todellisesta energiankulutuksesta lietteen torrefiointissa on kuitenkin saatavilla vähän tietoa.

Torrefiointin ja kuivauksen tarvitsemasta energiasta osa voidaan tuottaa torrefiointissa muodostuvien kaasujen poltolla. Prosessin energiantarve on matalammasta lämpötilasta johtuen hieman pienempi kuin pyrolyysin, mutta toisaalta prosessissa muodostuvat kaasut sisältävät vähemmän energiaa.

Sähkön kulutuksen arvioidaan olevan samaa suuruusluokkaa kuin pyrolyysilaitoksessa, eli noin 60 – 90 kWh / t lietettä (30 % TS).

Investointikustannukset

Investointikustannukset on arvioitu ns. Turn Key -hintana, ja investoinnin poisto on laskettu käyttäen korkokantana 5 % ja poistoaikana 20 vuotta.

Torrefiointilaitoksen toiminnot ja laitteistot ovat pitkälti vastaavanlaisia kuin pyrolyysilaitoksen. Investointikustannusten arvioidaan olevan verrattavissa pyrolyysitekniikkaan, mutta matalammasta lämpötilasta johtuen arvioidaan, että laitteiston kustannukset ovat arviolta noin 10 – 15 % pienemmät johtuen siitä, että materiaalien ei tarvitse kestää yhtä korkeita lämpötiloja.

Keskisuuren laitoksen (n. 30 000 t /a (30%TS)) investointikustannukset pyrolyysilaitoksen kustannuksiin pohjautuen on arvioitu olevan suuruusluokkaa 12 – 16 milj.EUR. Laitoksen elinkaaren ajalle jaettuna (poisto aika 20 vuotta, korkokanta 5 %) investoinnin poiston kustannukset ovat käsiteltäviä lietteonnia kohden n. 30 – 40 EUR/t (30 % TS)

Käyttökustannukset

Käyttökustannuksissa on huomioitu käsittelyn suorat kustannukset, sisältäen energian, kemikaalit ja henkilöstökulut. Lietteen ja lopputuotteen kuljetuskustannuksia käsittelyyn tai käsittelylaitoksesta käyttökohteeseen ei ole huomioitu, mutta jätteiden käsittelykustannukset on huomioitu. Hyödynnettäville tuotteille on käytetty nollahintaa.

Torrefioinnin käyttökustannusten arvioidaan olevan verrattavissa pyrolyysin vastaaviin, joten niitä voidaan arvioida pyrolyysille tehtyjen kustannusarvioiden pohjalta.

Ulkopuolisen lämpöenergian tarve on torrefioinnissa hieman pienempi, mutta ero ei ole kovin merkittävä huomioiden termisen kuivauksen suuren energiantarpeen. Lisäksi prosessissa ei voida hyödyntää yhtä suurta osaa lietteen energiasta kuin pyrolysoinnissa.

Käyttökustannuksiksi arvioidaan n. 20 – 30 EUR / t lietettä (30 % TS) ja kokonaiskustannuksiksi investoinnin poisto huomioiden noin 50 – 70 EUR / t lietettä (30 % TS).

3.3.5 Tekniikan valmiusaste ja referenssit

Tekniikan valmiusaste ja kehittämistilanne

Torrefiointi on varsin vähän käytetty tekniikka. Maailmassa arvioidaan olevan korkeintaan viisi teollisen mittakaavan torrefiointilaitosta, joissa käsitellään erilaisia biomassoja. Tekniikan yleistymistä on rajoittanut mm. raaka-aineena käytettävien biomassojen korkea hinta.

Lietteen torrefiointia on toteutettu vähän, ja esimerkiksi aiheesta tehdyissä tutkimuksissa on käytetty laboratoriomittakaavan torrefiointilaitteita (mm. Atienza-Martinez et al. 2013) tai tavanomaisia typpi-ilmakehällä varustettuja laboratoriuuneja (Pulka et al 2019, Ylivainio et al 2019). Lietteen torrefiointi on kuitenkin lähellä pyrolyysiä, joka tekniikkana tunnetaan suhteellisen hyvin.

Lietteen torrefioinnin arvioidaan tekniseltä valmiusasteeltaan (TRL) olevan tasolla 7 (teknologia on demonstroitu aidossa toimintaympäristössä). Torrefioinnin valmiusasteen yleisesti arvioidaan olevan tasolla 8 (teknologia/järjestelmä on täydellinen ja todettu toimivaksi) (Taulukko 3.2).

Referenssilaitokset

Bioendev AB, Ruotsi

Ruotsalaisella Bioendev AB:lla on Holmsundissa, Ruotsissa teollisen demonstraatiomittakaavan torrefiointilaitos, jossa tuotetaan sahanpurusta torrefioitua pellettiä (ns. black pellet) enimmillään 16 000 t/a. Sahanpuru kuivataan yli 90 % TS kuiva-ainepitoisuuteen matalan lämpötilan kuivurilla. Torrefiointiyksikkö perustuu ruuvitekniikkaan. Torrefioinnissa muodostuva kaasu poltetaan lämmön tuottamiseksi. Laitos on lämmön suhteen omavarainen, kun tulevan biomassan kuiva-ainepitoisuus on vähintään 65 %. (Bioenergy International 2017a)

Baltania OÜ, Viro

Baltania OÜ suunnittelee teollisen mittakaavan biomassan torrefiointilaitosta Vägariin, Viroon. Valmistuessaan laitos tuottaisi lähes 160 000 t/a torrefioitua pellettejä metsäteollisuuden jätetuotetta ja hakkuutähteistä. Laitoksen suunniteltu valmistuminen ajoittuu vuoden 2020 alkupuolelle. Lai-

toksen kustannusarvio on 45 milj.EUR. Tärinäarinaan perustuvan torrefiointitekniikan toimittaja on brittiläinen CEG. (Pöyry 2018; Bioenergy International 2017b)

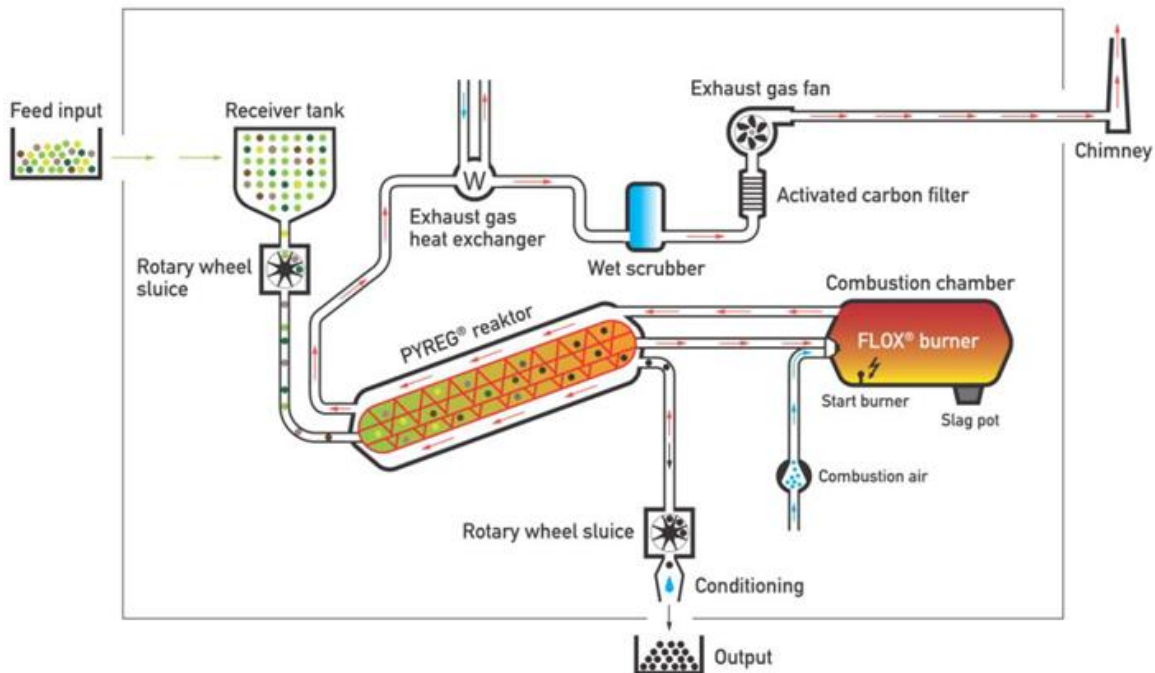
3.4 PYROLYYSI

3.4.1 Tekniikan kuvaus

Tekniikan luonne ja tavoite

Pyrolyysillä tarkoitetaan termistä muuntamista hapettomissa olosuhteissa, ja sitä käytetään yleisimmin orgaanisen materiaalin ominaisuuksien muuttamiseksi. Prosessissa käsiteltävä materiaali kuivuu täysin, ja muuntuu termokemiallisten reaktioiden seurauksena. Pyrolyysin tuloksena orgaaninen aine jakaantuu kaasu- ja kiinteään fraktioon sekä höyryihin, jotka jäähtyessään tiivistyvät pyrolyysiöljyiksi.

Lietteen pyrolyysissä yleensä tavoitteena on hyödynnettävän pyrolyysihiilen tuottaminen. Pyrolysointi myös pienentää lietteen tilavuutta ja massaa merkittävästi. Lietteestä valmistetun pyrolyysihiilen mahdollisia käyttökohteita ovat mm. käyttö maanparannusaineena, kompostoinnin lisäaineena, suodatusmateriaalina tai polttoaineena.



Kuva 3.10 Esimerkki lietteen pyrolyysiprosessista (Kuva: PYREG GmbH)

Toimintaperiaate

Pyrolyysissä materiaalia kuumennetaan panos- tai jatkuvatoimisessa reaktorissa halutun ajan. Käsittelyn aikana materiaali ensin kuivuu täysin kuivaksi 100 °C:ssa, minkä jälkeen materiaalin lämpötila nousee noin 100 – 350 °C:een, ja varsinaiset pyrolyysi- eli hiiltymisreaktiot tapahtuvat ja valtaosa pyrolyysikaasuista ja -öljyistä tuotetaan. Tämän jälkeen materiaali kuumenee edelleen pyrolyysin maksimilämpötilaan, ja hiiltyminen etenee edelleen. Kun haluttu viipymäaika on saavutettu, materiaali poistetaan reaktorista, jäähdytetään ja yleensä kostutetaan n. 10 – 20 % kostuuden itsesytyvyyden estämiseksi.

Materiaalin maksimilämpötila hitaassa pyrolyysissä on tyypillisesti noin 350 – 700 °C, ja viipymäaika noin 10 – 60 minuuttia. Lämpötila ja viipymäaika vaikuttavat materiaalin hiiltymisasteeseen. Käsittelyprosessissa ei hyödynnetä painetta, mutta joissakin teknisissä ratkaisuissa pyrolyysireaktori on lievästi paineistettu ilman pääsyn estämiseksi.

Hiili-, höyry- ja kaasufraktioiden suhteelliset osuudet riippuvat lämpötilasta; korkeammissa prosessilämpötiloissa kaasumaisten aineiden osuus on suurempi, ja nestemäisen sekä kiinteän fraktion osuus vastaavasti pienempi.

Fraktioissa esiintyy useita yhdisteitä, tyypillisesti mm. seuraavia:

- Kaasu (pyrolyysikaasu): mm. vety, metaani, hiilimonoksidi, hiilidioksidi
- Höyry (pyrolyysiöljy): mm. etikkahappo, asetoni, metanoli, kompleksiset happea sisältävät hiilivedyt
- Kiinteä jae (pyrolyysihiili): mm. hiili, inertti materiaali, raskasmetallit ja muut haihtumattomat yhdisteet

Pyrolyysiprosessit voidaan jakaa lämpötilan ja viipymäajan perusteella hitaaseen ja nopeaan pyrolyysiin. Useimmiten tavoitteena on hyödynnettävän pyrolyysihiilen tuottaminen, jonka vuoksi hidas pyrolyysi on jätevesilietteen käsittelyn yhteydessä yleensä käytetty tekniikka. Myös pyrolyysiöljyn tuottamista pyrolyysillä jätevesilietteestä on tutkittu (mm. Fonts et al. 2012), mutta kaupallisia sovelluksia ei tunneta.

Jätevesilietteen pyrolysoinnissa tarkoituksenmukaisimmaksi lämpötila-alueeksi arvioidaan noin 450- 650 °C ja viipymäajaksi noin 15 – 30 min. Tämän lämpötila-alueen valintaa tukevat seuraavat seikat:

- Orgaanisten haitta-aineiden ja lääkeaineiden pitoisuudet on valtaosin todettu vähäisiksi > 400 °C lämpötiloissa tehdyissä pyrolyysikokeissa (Kainulainen 2017, HSY 2019).
- Valtaosa käytetyistä muoveista (> 95 %) hajoaa lämpötiloissa < 450 °C (LIITE 1).
- Lämpötilan nostaminen mainitun alueen yläpuolelle lisää prosessin energiantarvetta ja vähentää orgaanisen hiilen määrää pyrolyysihiilessä.
- Olemassa olevat laitokset (Kappale 0) toimivat tällä lämpötila-alueella
- Pyrolyysilaitteiden valmistajat suosittelevat prosessiparametreiksi tässä suuruusluokassa olevia lämpötiloja ja viipymäaikoja.

Pyrolyysissä muodostuvat höyryt tiivistyvät lämpötilan laskiessa tervamaisiksi öljyiksi. Nämä öljyt kiinnittyvät helposti laitteistojen pinnoille, ja aiheuttavat merkittävää huoltotarvetta. Useimmissa lietteen pyrolysointiin soveltuviissa laitteistoissa höyryt johdetaankin yhdessä pyrolyysikaasujen kanssa suoraan polttoon. Poltosta saatavaa energiaa voidaan hyödyntää pyrolyysiyksikön ja edeltävän termisen kuivauksen lämmöntarpeisiin.

Pyrolyysikaasujen kontakti kiintoaineen kanssa tulee minimoida, jotta kaasujen sisältämät haitta-aineet, erityisesti PAH-yhdisteet, eivät sitoutuisi hiilifraktioon.

Tekniikat

Pyrolyysilaitteet voivat olla panos- tai jatkuvatoimisia. Panostoimiset reaktorit ovat käytännössä anaerobisia uuneja, joissa materiaalia käsitellään halutun ajan tietyssä lämpötilassa.

Suuremman mittakaavan laitteet ovat jatkuvatoimisia yksiköitä. Pyrolyysiyksiköitä on markkinoilla kahta tyyppiä: ruuvikuljettimella varustettuja reaktoreita ja pyöröuuneja. Lämmitys tapahtuu yleensä epäsuorasti lämmittämällä pyöröuunin tai ruuvikammion vaippaa tai itse ruuvia, harvoissa tapauksissa myös suoraan johtamalla esim. palokaasuja pyrolyysiyksikön sisään.

Tyypillisesti pyöröuuniteknikkaan perustuvat yksiköt ovat kapasiteetiltaan suuria, kun taas ruuvi-kuljettimella varustetut yksiköt ovat kokoluokaltaan ja kapasiteetiltaan pienempiä johtuen käytän-nössä ruuviyksikön rakenteen aiheuttamista lämmönsiirron rajoitteista.

Pyrolyysin lämmönlähteenä voidaan käyttää pyrolyysihöyryjen ja -kaasujen polton lämpöä, muiden polttoaineiden poltosta saatavaa lämpöä tai lämmitystä suoraan sähköllä. Suuremmissa pyro-lyysiyksiköissä, kuten lietteen käsittelyssä, sähkölämmitys on useimmiten taloudellisesti kannatta-maton vaihtoehto.

Tavallisimmin lämmönlähteenä käytetään laitoksen yhteydessä olevan polttokattilan lämpöä. Tyy-pillisesti pyrolyysikaasut ja -höyryt poltetaan prosessin lämmittämiseksi, ja tarvittaessa (mm. käyn-nistyksessä) käytetään apupolttoaineena esim. biokaasua, maakaasua tai öljyä. Polttoyksikkö on useimmiten erillinen yksikkö, josta palokaasut johdetaan pyrolyysiyksikön vaippaan. Markkinoilla on myös tekniikoita, joissa pyrolyysiyksikkö on sijoitettu polttoyksikön sisään. Tällöin pyrolyysin lämpötilan säätelyn toteuttaminen on haastavampaa.

Syötteen ja esikäsittely

Ennen pyrolyysiä liete tulee kuivata termisesti. Termisen käsittelyn tekniikan valinnalla voidaan vaikuttaa syötteen raekokoon ja siten pyrolyysin toimintaan. Maanparannuskäyttöön tähtäävässä pyrolysoinnissa tavoitellaan yleensä vähäistä pölyämistä, minkä vuoksi vähemmän mekaanista rasitusta materiaaliin kohdistavat tekniikat ja rakeistustekniikat voivat parantaa lopputuotteen käsi-teltävyyttä ja vähentää pölyämistä.

Lietteen joukkoon voidaan lisätä esimerkiksi puumateriaalia. Puumateriaalin lisääminen lisää syöt-teen lämpöarvoa, jolloin pyrolyysikaasujen poltolla voidaan tuottaa suurempi osuus pyrolyysissä ja termisessä kuivauksessa tarvittavasta lämmöstä. Puumateriaalin lisääminen lisää myös hiilen osuutta lopputuotteessa ja parantaa siten tuotteen ominaisuuksia maanparannusaineena.

Jälkikäsittely ja varastointi

Pyrolysoitu hiili jäähdytetään ja kostutetaan noin 80 – 90 % kiintoainepitoisuuteen palo- ja räjäh-dysvaaran pienentämiseksi ja pölyämisen vähentämiseksi (Youichi et al. 2007). Jäähdytetty ja kos-teutettu pyrolyysihiihi voidaan varastoida hyvin ilmastoidussa varastosiilossa. Vaihtoehtoisesti säily-tys tulee toteuttaa ilmatiiviissä säiliössä.

Pyrolyysihiihen tyypipitoisuutta voitaisiin nostaa kostuttamalla hiiltä tyypipitoisella nesteellä, kuten ammoniumsulfaatilla. Tätä mahdollisuutta tutkitaan mm. HSY:n ja Luken tutkimuksissa.

Relevantti laitoksen mittakaava

Pyrolyysiyksiköitä on markkinoilla käytännössä kahta kokoluokkaa: pieniä ruuvitoimisia yksiköitä ja suuria pyöröuuniteknikkaan perustuvia yksiköitä.

Ruuvitekniikkaan perustuvien yksiköiden kapasiteetti on noin 5 000 – 15 000 t lietettä (30 % TS)/a. Kapasiteettia voidaan kasvattaa asentamalla useampia yksiköitä rinnakkain.

Kaupallisten pyöröuuniyksiköiden kapasiteetti on pienimmillään 25 000 t lietettä (30 % TS)/a. Suu-rimmat toteutetut lietteen pyrolyysilaitokset ovat kapasiteetiltaan jopa 300 000 t lietettä (30 % TS)/a.

Suuremman kokoluokan laitokset ovat taloudellisesti pieniä kannattavampia, koska investointikus-tannukset ovat pienissä laitoksissa suhteellisesti korkeammat kuin suurissa. Muun muassa termi-sen kuivauksen poistokaasujen ja savukaasujen käsittelyjärjestelmät muodostavat merkittäviä kus-tannuksia, joiden osuudet pienissä laitoksissa korostuvat. Relevantiksi kapasiteetin suuruusluo-kaksi arvioidaan > 15 000 t/a (30 % TS).

3.4.2 Tuotteet ja sivutuotteet

Prosessin tuotteet

Lietteen pyrolysoinnissa pääasiallinen tuote on pyrolyysihili, jonka suunniteltuja käyttökohteita ovat mm. käyttö maanparannusaineena, kompostoinnin lisäaineena, suodatinmateriaalina esim. hulevesien käsittelyssä tai teollisissa sovellutuksissa, esim. jätevesien käsittelyssä.

Jätevesilietteestä valmistetun pyrolyysihillen ominaisuuksia on tutkittu Suomessa mm. HSY:n, Luken ja Gasumin tutkimuksissa (HSY 2019; Kainulainen 2018; Rasa et al. 2015). Täyden mittakaavan laitoksen tuottaman hiilen ominaisuuksia on tutkittu Saksassa Linz-Unkelin jätevesilietteen pyrolyysilaitoksessa. Pyrolyysin on todettu heikentävän rautasaostetun lietteen fosforin käyttökelpoisuutta (Luke 2018).

Lietteestä valmistettu pyrolyysihili sisältää hiiltä ja fosforia, minkä ansiosta sillä on hyödyllisiä maanparannus- ja lannoitevaikutuksia. Tyyppinimihyväksynnän saaminen lietteestä valmistetulle pyrolyysihille on todennäköistä, ja parhaiten sopiva tyyppinimiryhmä olisi hyväksynnästä vastaavan viranomaisen näkemyksen mukaan 3A3: Maan rakennetta parantavat aineet. (HSY 2019). Lietteillä voi lisäksi olla puuperäisen biohiilen kaltaisia aineiden pidätysominaisuuksia, mikä parantaa veden ja ravinteiden sitoutumista. Näistä ominaisuuksista tarvitaan kuitenkin vielä lisää tutkimusta.

Pyrolyysissä patogeenit tuhoutuvat, ja saatu lietehiili on hygieeniseltä laadultaan hyvää. Lietteen tyypestä suurin osa haihtuu termisessä kuivauksessa ja pyrolyysissä. Fosforista suurin osa sitoutuu lietehiileen, mutta rautasaostuksella saostetun fosforin saatavuus kasveille on lyhyellä aikavälillä heikohko, sillä pyrolyysin ei ole todettu parantavan fosforin saatavuutta kasveille (Rasa et al. 2015)

Haihtumattomien raskasmetallien pitoisuudet (kiintoaineeseen suhteutettuna) kasvavat pyrolyysissä johtuen siitä, että pyrolyysissä osa materiaalin kiintoaineesta poistuu ja raskasmetallit konsentroituvat jäljelle jäävään kiintoaineeseen. Suomessa tehdyissä kokeissa raskasmetallien pitoisuudet ovat alittaneet lannoitetuotteille asetetut raja-arvot (HSY 2019; Rasa et al. 2015). Lähimpänä raja-arvoa ovat olleet kuparin ja sinkin pitoisuudet. Elohopea höyrystyy prosessissa suurelta osin, joten sen pitoisuus lietehiilessä on hyvin alhainen. Höyrystyvä elohopea päättyy polttoon ja edelleen savukaasujen käsittelyssä lentotuhkaan.

Pyrolyysissä syntyy PAH-yhdisteitä ja ne voivat sitoutua lietehiileen. Suomalaisissa tutkimuksissa on todettu sekä suhteellisen korkeita, noin 20 mg / kg kuiva-ainetta (k.a.) pitoisuuksia (Kainulainen 2017) että matalia, noin 1 mg /kg k.a.pitoisuuksia (HSY 2019). Korkeiden pitoisuuksien tapauksessa PAH-yhdisteiden määrää ei ole pyritty minimoimaan, ja arvioidaan, että PAH-yhdisteiden pitoisuutta voidaan hallita minimoimalla pyrolyysikaasujen kontaktia lietehiilen kanssa sekä optimoimalla lietehiilen jäähtytystä (Kainulainen 2017). STRUBIAS-luonnosraportissa (Huygens et al. 2018) on ehdotettu EU:n laajuisesti hyväksytyille lannoitteille PAH16-yhdisteiden raja-arvoa 6 mg/kg k.a. pyrolyysillä ja kaasutuksella valmistetuille tuotteille. Vaikka pyrolysoitu liete ei ole EU-lannoitteeksi ehdotettujen joukossa, tullaan EU-lannoitteiden raja-arvoa todennäköisesti pitämään yhtenä lähtökohtana myös arvioitaessa lietteestä pyrolyysillä valmistettuja tuotteita kansallisesti (HSY 2019).

HSY:n kokeissa (Kainulainen 2017) todettiin, että suuri osa orgaanisista haitta-aineista PAH-yhdisteitä lukuun ottamatta hajoaa pyrolyysissä (Kainulainen 2017). Kokeissa pyrolyysin lämpötila oli noin 500 °C. Lisää tutkimuksia kuitenkin tarvitaan, jotta voidaan varmistaa, että orgaanisten haitta-aineiden pitoisuudet tuotteessa eivät aiheuta haittaa ympäristölle tai ihmisille.

Valtaosa käytetyistä muoveista (> 95 %) hajoaa < 450 °C lämpötiloissa (LIITE 1), joten arvioidaan, että pyrolyysikäsittely poistaa valtaosan lietteen mikromuoveista. Analyysimenetelmiä mikromuovien analysoimiseksi lietematriisista ei tällä hetkellä ole käytössä, joten mikromuovien poistumista prosessissa ei ole voitu analyysin todentaa.

Sivutuotteet ja jätteet

Pyrolyysiä edeltävässä termisessä kuivauksessa muodostuu poistokaasuja, jotka tulee käsitellä. Käsittelyssä syntyy tekniikasta riippuen typpipitoista liuosta ja/tai jätevettä. (Kappale 3.1.2)

Pyrolyysihiihen ohella prosessissa syntyy pyrolyysikaasuja ja -höyryjä, jotka voidaan johtaa polttoon. Mikäli pyrolyysihöyryt tiivistetään, muodostuu öljyjä, joita voidaan käyttää esimerkiksi polttoaineena. Höyryjen tiivistys voi aiheuttaa niiden tarttumista pinnoille, mikä aiheuttaa puhdistus- ja huoltotarvetta. Pyrolyysiöljyyn sitoutuu yleensä suuria pitoisuuksia PAH-yhdisteitä. Öljyn valmistaminen pyrolyysissä lisää prosessin monimutkaisuutta, eikä sitä ole olemassa olevissa laitoksissa toteutettu. Tiivistymättömät kaasut sisältävät mm. häkää ja metaania, ja ne on useimmiten käytännöllisintä käsitellä polttamalla.

Kaasujen poltossa muodostuu savukaasuja, jotka yleensä tulee käsitellä jätteenpolton vaatimusten mukaisesti. Kun pyrolyysilaitoksessa käsitellään ja osin poltetaan jätteeksi luokiteltavaa lietemateriaalia, laitokseen sovelletaan jätteen polton lainsäädäntöä, mikäli pyrolyysikaasuja ei puhdisteta siten, että kaasun ei enää katsota olevan jätettä eikä kaasun polttamisesta voi aiheutua suurempia päästöjä kuin maakaasun polttamisesta (YSL 527/2014 §107 2. Mom.). Päästörajoja määrittelee jätteenpoltoasetus (VNa 151/2013) sekä ympäristönsuojelulain (527/2014) nojalla BAT-vaatimusten mukaisesti BREF-dokumenttien päästövaatimukset, mikäli laitos katsotaan ns. direktiivilaitokseksi, eli BAT-vaatimuksia sovelletaan.

Tyypillisesti savukaasujen käsittelyssä tarvitaan ainakin partikkelien poisto, happamien yhdisteiden adsorptio, typpiyhdisteiden pelkistys sekä mahdollisesti haitallisten aineiden poisto aktiivihiihellä.

Savukaasujen käsittelyssä syntyy lentotuhkaa (n. 2 kg / t lietettä (30 % TS)) ja savukaasujen käsittelyjätteitä (n. 0,2...0,5 kg / t lietettä (30 % TS)) tai märkäpesutekniikkaa käytettäessä pesurin jätevettä (n. 0,5 m³ / t lietettä (30 % TS)). Lentotuhka sijoitetaan joko tavanomaisen tai vaarallisen jätteen kaatopaikalle sen ominaisuuksista riippuen. Savukaasujen käsittelyjäte johdetaan vaarallisen jätteen käsittelyyn. Savukaasupesurin jätevesi johdetaan viemäriin tai erilliseen jätevesien käsittelyyn.

3.4.3 Ympäristövaikutukset

Itse pyrolysointi on suljettu prosessi, eikä sen aikana synny päästöjä maaperään tai vesistöihin. Arvioidaan, että lietehiilen ja siitä valmistettujen tuotteiden käytöstä aiheutuu vähemmän tai korkeintaan saman verran vesistöpäästöjä kuin muiden lietepohjaisten lannoitevalmisteiden käytöstä. Lietehiilen arvioidaan sitovan ravinteita maaperään, mikä voi vähentää fosforin ja typen valumia.

Pyrolyysiä edeltävän termisen kuivauksen poistoilman käsittelyssä muodostuu nestejakeita, jotka tulee johtaa hyötykäyttöön tai johtaa käsiteltäväksi jätevedenpuhdistamalla. Pyrolyysilaitoksessa hajupäästöjä voi aiheutua lähinnä lietteen vastaanotossa ja varastoinnissa sekä termisen kuivauksen poistoilman kautta. Poistoilma tulee käsitellä hajuhaittojen vähentämiseksi (Kappale 3.1.3).

Tekniikasta ja syötteen laadusta riippuen pyrolyysihiihessä voi olla pölyämistä aiheuttavaa hienoa ainesta. Pölyämistä voidaan estää kostuttamalla hiili käsittelyn jälkeen. Pölyäminen tulee huomioida materiaalin varastoinnissa ja käsittelyssä.

Jätevesilietteen kuljetuksista ja varastoinnista voi aiheutua hajuhaittoja, melua ja tärinää. Laitoksen toiminnasta voi aiheutua toiminnan luonne huomioiden normaalia melua ja tärinää.

3.4.4 Taloudellisuus ja kustannukset

Energiatalous

Pyrolyysin energiatalous muodostuu termisen kuivauksen, pyrolyysin ja kaasujen polton kokonais-taloudellisuudesta. On arvioitu, että linkokuivattua mädätettyä lietettä (30 % TS) käsiteltäessä tarvi-taan ulkopuolista energiaa termisen kuivauksen tarpeisiin. Ulkopuolista energiaa voidaan tuoda prosessiin esimerkiksi lisäämällä lietteeseen puumateriaalia.

Kuivauksen lämmöntarve on noin 500 – 700 kWh / t lietettä (30 % TS). Tämän lisäksi itse pyrolyysi vaatii energiaa noin 200 – 450 kWh / t termisesti kuivattua lietettä (90 % TS), eli noin 70 – 150 kWh / t lietettä (30 % TS). Kokonaislämmöntarve on siis noin 550 – 800 kWh / t lietettä (30 % TS). Osa lämmöntarpeesta voidaan kattaa lietteestä muodostuvan kaasun poltolla. Ulkopuolista energiaa voidaan tuoda prosessiin myös pyrolyysin syötteen mukana, esimerkiksi sekoittamalla lietteeseen biomassaa.

Pyrolyysilaitos kuluttaa sähköä muun muassa pyrolyysiyksikön ja kuivaimen moottoreiden, pump-pujen, kuljettimien ja automaatiojärjestelmän tarpeisiin. Sähkönkulutuksen on arvioitu olevan noin 60 – 90 kWh / t lietettä (30 % TS). Sähkölämmitteisissä pyrolyysiyksiköissä sähkönkulutus on kor-keampi, kun pyrolyysin lämmöntarve tulee kattaa sähköllä.

Investointikustannukset

Investointikustannukset on arvioitu ns. Turn Key -hintana, ja investoinnin poisto on laskettu käyttä-en korkokantana 5 % ja poistoaikana 20 vuotta.

Pyrolyysilaitosten mittakaavaskaala on laaja, ja laitosten investointikustannukset suhteessa kapasi-teettiin riippuvat luonnollisesti laitoksen mittakaavasta. Keskisuuren laitoksen (n. 30 000 t /a (30%TS)) investointikustannuksien on arvioitu olevan suuruusluokkaa 13 – 17 milj.EUR. Laitoksen elinkaaren ajalle jaettuna (poistoaika 20 vuotta, korkokanta 5 %) investoinnin poiston kustannukset ovat käsiteltyä lietetonnin kohden n. 35 – 45 EUR/t (30 % TS)

Käyttökustannukset

Käyttökustannuksissa on huomioitu käsittelyn suorat kustannukset, sisältäen energian, kemikaalit ja henkilöstökulut. Lietteiden ja lopputuotteen kuljetuskustannuksia käsittelyyn tai käsittelylaitoksesta käyttökohteeseen ei ole huomioitu, mutta jätteiden käsittelykustannukset on huomioitu. Hyödynnet-täville tuotteille on käytetty nollahintaa.

Suorien käyttökustannukset keskisuurelle (n. 30 000 t /a (30 % TS)) pyrolyysilaitokselle on arvioitu olevan noin 20 - 30 EUR/t ja kokonaiskustannusten n. 55 – 75 EUR/t sisältäen investoinnin pois-ton.

3.4.5 Tekniikan valmiusaste ja referenssit

Tekniikan valmiusaste ja kehittämistilanne

Pyrolyysilaitoksissa käytettävä tekniikka on olemassa olevaa ja tunnettua tekniikkaa, jota on käytetty muiden materiaalien käsittelyssä vuosikymmenien ajan. Lietettä käsitteleviä täyden mittakaavan pyrolyysilaitoksia on maailmalla tiettävästi käytössä muutamia. Useimmat niistä tähtäävät kiinteän polttoaineen tuotantoon.

Lietteen pyrolyysiä tutkitaan parhaillaan aktiivisesti niin Suomessa kuin ulkomailla (mm. Yuan et al. 2015; Jin et al 2016; Rasa et al. 2015; Kainulainen 2017). Täydessä mittakaavassa lietteen pyrolyysiä käytetään kuitenkin vähän. Käytössä olevista laitoksista valtaosa tuottaa pyrolyysihiljät polttoainekäyttöön.

Myös kaupallisia ratkaisuja lietteen pyrolysointiin kehitetään parhaillaan aktiivisesti. Alalla on useita toimijoita, jotka tarjoavat tekniikkaansa lietteenkäsittelyyn. Tekniikan valmiusasteen (TRL) puhdistamolietteen käsittelyssä arvioida olevan 8, eli tekniikka on todettu toimivaksi täydessä mittakaavassa. Tietyissä muissa sovelluskohteissa, kuten jätteen pyrolysoinnissa, tekniikka on laajalti käytössä, ja TRL-luku näissä sovellutuksissa on 9 (Taulukko 3.2).

Referenssilaitokset

Linz-Unkel, Saksa

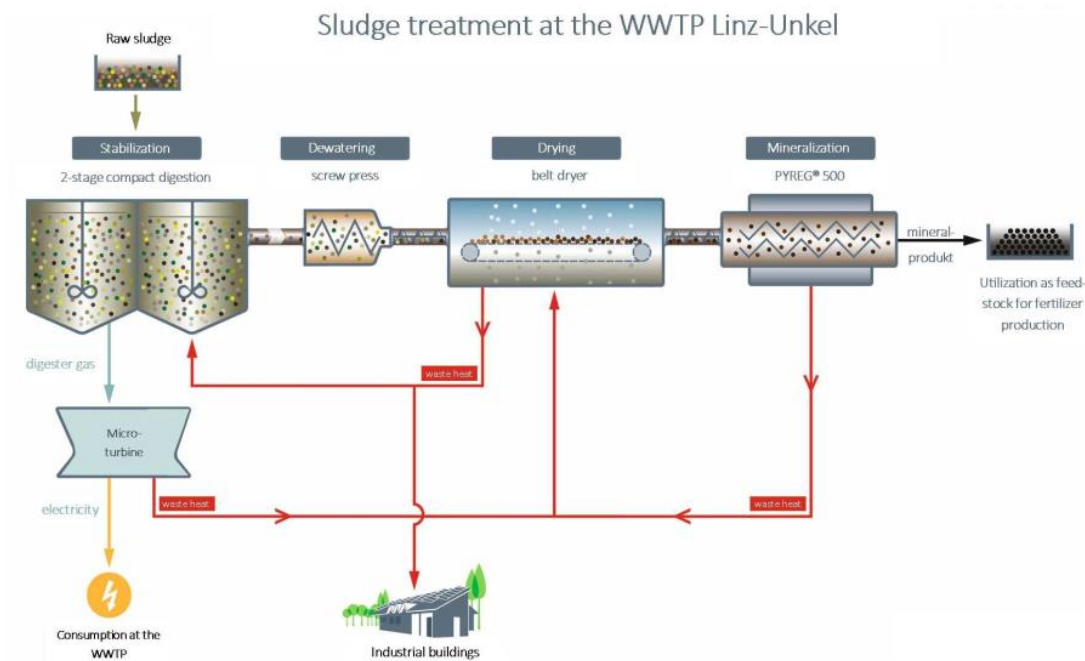
Saksassa sijaitseva PYREG GmbH:n valmistama pyrolyysilaitos on tiettävästi ainoa laitos, joka käsittelee jätevesilietettä tavoitteenaan maanparannusaineen tuotanto. Laitos aloitti toimintansa vuonna 2015. Laitoksen kapasiteetti on noin 750 t TS/a (2500 t/a 30 % TS lietettä).

Laitos käsittelee Linz-Unkelin jätevedenpuhdistamon mädätettyä ja linkokuivattua lietettä. Liete kuivataan termisesti Eliquo Stulz GmbH:n valmistamalla nauhakuivaimella noin 85 % kuiva-ainepitoisuuteen. Kuivatun lietteen energiasisältö on riittävä kattamaan pyrolyysiprosessin tarvitseman energian. Käynnistykseen tarvitaan maakaasua n. 20 - 40 kg / käynnistys. Laitoksen sähkönkulutus on noin 10 kW_{el}.

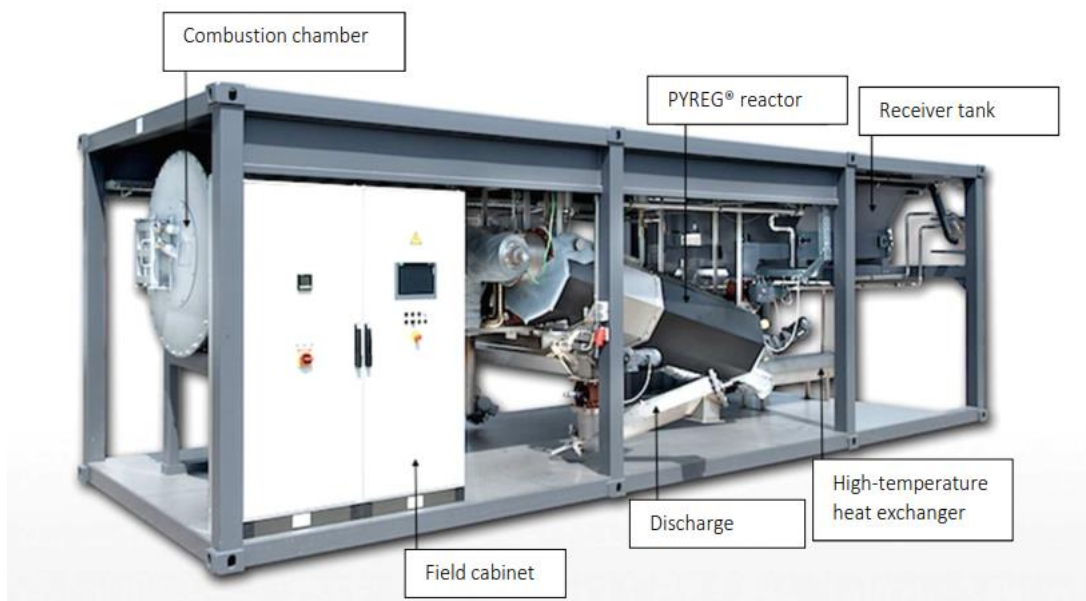
Pyrolyysiyksikkö on ruuvikuljettimella varustettu PYREG P-500 -yksikkö, jonka lämpötila voidaan säätää väliltä 500 – 750 °C. Tyypillinen tavoitelämpötila on 500 – 650 °C. Pyrolyysikaasut ja –höyryt poltetaan erillisessä polttoyksikössä, ja palokaasuilla lämmitetään pyrolyysiyksikön vaippaa.

Laitos tuottaa maanparannustuotteeksi tarkoitettua hiiltä. Tuotteelle ei ole saatu hyväksyntää Saksan viranomaisilta, ja tuote onkin rekisteröity Ruotsissa paikalliseen kansalliseen järjestelmään. Hiilen ominaisuuksia on tutkittu kattavasti. Raskasmetallien pitoisuudet ovat alittaneet EU:n lannoitelainsäädännön rajat. PAH-yhdisteiden pitoisuudeksi on analysoitu 30 mg/kg k.a., mikä on varsin korkea arvo verrattuna STRUBIAS-luonnosraportissa (Huygens et al. 2018) mainittuun ehdotukseen 6 mg/kg k.a. EU-lannoitteiden raja-arvoksi.

Savukaasujen käsittely on toteutettu syklonilla, märkäpesurilla (NaOH) ja aktiivihiihi-suodatuksella. Laitos on pääosin täyttänyt EU-päästönormin 2010/75/EU pitoisuusvaatimukset. Haastavimmat päästöfraktiot ovat CO, C_{tot} ja NO_x. Märkäpesuri tuottaa jätevetä käsiteltyä kuiva-ainemassaa kohden noin 70 – 90 L / t TS.



Kuva 3.11. Lietteen käsittely Linz-Unkelin jätevedenpuhdistamolla. (Lähde: PYREG GmbH)



Kuva 3.12. PYREG P-1500 -pyrolyysimoduuli. Moduulin mitat ovat 9 x 3 x 2,8 m. Moduuliin sisältyy vastaanottosäiliö, pyrolyysireaktori ja hiilen poisto, polttoyksikkö sekä ohjauksyksikkö. Lisäksi laitospokonaisuuteen kuuluvat terminen kuivaus ja savukaasujen käsittely-yksikkö. (Lähde: PYREG)

Pustertal, Italia

Pustertalin keskusjätevedenpuhdistamon lietteet käsitellään termisesti prosessissa, jossa samassa käsittely-yksikössä tapahtuu sekä pyrolysointi että poltto. Puhdistamon mitoitus-AVL on 150 000, ja käsittely jätevesimäärä n. 13 milj. m³/a. Lietteentuottomäärä on noin 4500 t TS/a.

Pyrolyysiä edeltävä terminen kuivaus on yksilinjainen nauhakuivain, jonka lämpötila on 80 – 150 °C. Kuivaimen mitoituskapasiteetti on noin 16 000 t/a linkokuivattua (25 % TS) lietettä. Kuivaimen viipymä on noin 30 min. Laitoksella oli alun perin rumpukuivain, josta kuitenkin luovuttiin toiminta-ongelmien ja nopean kulumisen vuoksi. Kuivain vaihdettiin nauhakuivaimen, mikä osoittautui hy-

väksi ratkaisuksi. Kuivain tuottaa suhteellisen pölytöntä, rakeista (n. 2 – 5 mm) lopputuotetta, jonka kuiva-ainepitoisuus on n. 95 %.

Pyrolyysi- ja polttoreaktori on pyöröuunityyppinen. Pyrolyysi tapahtuu uunin alkuosassa, jossa valitsevat hapettomat olosuhteet ja lämpötila on 200 – 350 °C. Pyrolyysin lämpötila on alhainen, joten voitaisiin puhua myös torrefioinnista. Pyrolyysiosan jälkeen materiaali siirtyy hapetus- eli polttoosaan, jonne puhalletaan ilmaa ja jossa lämpötila on 400 – 550 °C. Polton savukaasut ohjataan pyrolyysireaktorin vaipan sisään, eli niillä lämmitetään pyrolyysivaihetta epäsuorasti. Tämän jälkeen savukaasu ohjataan yhdessä erikseen talteenotetun pyrolyysikaasun kanssa polttoreaktoriin, jossa pyrolyysikaasu poltetaan (850 – 900 °C, 2 s). Polttovaiheen jälkeen kaasut ohjataan lämmönvaihtimeen, josta talteenotettu lämpö hyödynnetään termisen kuivauksen lämmityksessä. Väliainena on termööljy. Reaktorin kauppanimi on Pyrobustor ja sen valmistaja saksalainen Eisenmann GmbH.

Termisen kuivauksen poistoilma käsitellään vesipesurissa (urean syöttö) ja tämän jälkeen biosuotimessa. Pesurista tuleva konsentraatti johdetaan nitritaatio-deammonifikaatioprosessiin. Kaasupolttimesta lähtevä kaasua käsitellään kemiallisesti soodalla ja suodatetaan kuitusuodattimella.

Tobu, Tokio, Japani

Tokiossa sijaitseva Tobun lietteen pyrolysointilaitos on kapasiteetiltaan poikkeuksellinen suuri. Vuodesta 2007 toiminnassa olleen laitoksen kapasiteetti on 100 000 t/a linkokuivattua lietettä (n. 24 % TS). Laitoksen tuottamaa pyrolyysihiiltä käytetään korvaamaan fossiilista hiiltä voimalaitospolttoaineena. Laitoksen on toimittanut Mitsubishi Heavy Industries.

Laitoksessa linkokuivattu liete kuivataan kaasun poltosta saatavalla lämmöllä rumpukuivaimissa noin 75 % kuiva-ainepitoisuuteen. Termisen kuivauksen poistokaasut johdetaan polttoyksikköön.

Pyöröuunityyppisen pyrolyysiyksikön toimintalämpötila on noin 500 °C, ja yksikön lämmitys tapahtuu epäsuorasti hyödyntäen pyrolyysikaasujen polttoyksikön lämpöä lämmönvaihtimien välityksellä. Tuotettu pyrolyysihiili jäädytetään ja kostutetaan ennen johtamista polttoainekäyttöön. Savukaasut käsitellään märkäpesurilla ja sähkösuodattimella.

Verrattuna suoraan polttoon, lietteen pyrolysoinnin ennen polttoa arvioidaan vähentävän kasvihuonekaasupäästöjä merkittävästi johtuen typpioksiduulin (N₂O) muodostumisen paremmasta hallinnasta pyrolyysikaasujen poltossa verrattuna lietteen suoraan polttoon. Lisäksi järjestelmän hiilipäästöjä vähentää fossiilisen hiilen korvaaminen. (Youichi et al. 2007; Toru 2006)



Kuva 3.13. Tokion jätevesilietteen pyrolyysilaitos (Lähde: Inoue 2007)

Zheijang, Kiina

Toinen suuren mittakaavan laitos on Kiinan Zheijangin provinssissa sijaitseva laitos, joka on rakennettu vuosina 2012 – 2013. Laitoksen kapasiteetti on noin 70 000 t/a linkokuivattua lietettä. Laitoksen pyrolyysiteknikaan ovat toimittaneet hollantilainen Splainex Ecosystems Ltd ja saksalainen Lukson AG

Laitoksen prosessi koostuu kahdesta rinnakkaisesta rumpukuivaimesta ja pyöröuuniteknikkaan perustuvasta pyrolyysiyksiköstä.



Kuva 3.14. Zheijangin provinssissa, Kiinassa sijaitseva jätevesilietteen pyrolyysilaitos. Etualalla rumpukuivain. (Lähde: Splainex Ecosystems Ltd.)

3.5 KAASUTUS

3.5.1 Tekniikan kuvaus

Tekniikan luonne ja tavoite

Kaasutus on tekniikka, jossa biomassasta tuotetaan energiapitoista kaasua hapen suhteen rajoite-
tuissa oloissa. Lämpötila kaasutuksessa on tyypillisesti noin 800 – 900 °C. Prosessissa kaasutus-
reaktoriin syötetään happea noin 30 % stoikiometrisesta polton happimäärästä, jolloin osa biomas-
sasta hapettuu ja tuotetaan kaasutusprosessin ylläpitoon tarvittavaa lämpöä. Viipymäaika on pol-
ton tapaan lyhyt, muutamien sekuntien luokkaa. Kaasutusprosessissa lopputuote muistuttaa poltto-
tuhkaa, sisältää pääosin haihtumatonta inerttiä kiintoainesta, mutta polttotuhkasta poiketen myös
hiiltä. Tuhkan osuus kiintoaineksestä on noin 55 – 75 % ja hiilipitoisuus vaihtelee tekniikasta riip-
puen 0,1 %:sta 20 %:iin. (Koch 2018; VTT 2011; Sülzle-Kopf; Tokyo Bureau of Sewerage 2010).

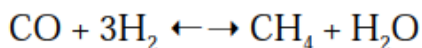
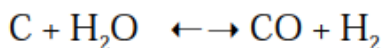
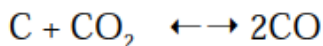
Tekniikan tavoitteena on tuottaa polttoainekäyttöön soveltuvaa kaasua. Tekniikan etu on se, että
kaasutuskaasun poltto on lähtömateriaalin polttoa tehokkaampaa, koska kaasu voidaan polttaa
korkeammassa lämpötiloissa. Kaasu voidaan lisäksi polttaa polttokattilan sijaan esimerkiksi kaasuo-
moottorissa, ja saavuttaa esimerkiksi sähköntuotannossa CHP-polttoa korkeampia sähköntuotan-
non hyötysuhteita. Kaasutuksella voidaan vapauttaa tekniikasta riippuen noin 60 – 80 % lietteen
energiasisällöstä kaasuksi. (Koch 2018).

Toimintaperiaate

Kaasutusprosessin koostuu neljästä vaiheesta, jotka tapahtuvat reaktorin eri osissa.

1. Kuivaus
2. Pyrolyysi
3. Hapetus
4. Pelkistys

Kuivausvaiheessa materiaalista poistetaan kaikki jäännöskosteus. Pyrolyysivaiheessa tapahtuu
reaktioita, joissa orgaanista ainetta hajotetaan termisesti ja muodostuu kaasuja ja öljyjä. Osa tuote-
tusta kaasusta poltetaan hapetusvaiheessa prosessin tarvitseman lämmön tuottamiseksi. Pelkis-
tysvaiheessa tapahtuvat varsinaiset kaasutusreaktiot, joissa hiili reagoi veden, vedyn tai hiilidioksi-
din kanssa muodostaen hiilimonoksidia, metaania ja vetykaasua. Tärkeimmät pelkistysreaktiot
ovat:



Prosessissa syntyy myös öljyjä, jotka voidaan polttaa tai tiivistää nestemäiseksi polttoaineeksi.
Tervamaiset aineet aiheuttavat haasteita laitoksilla niiden tiivistyessä pinnoille jäähtyessään. Ne
täytyy poistaa kaasusta esimerkiksi märkäpesurilla, mikäli kaasu poltetaan kaasumoottorissa. Ter-
vamaisten öljyjen poistaminen on merkittävä haaste tekniikan kehittämisessä (Lassi et al. 2011).

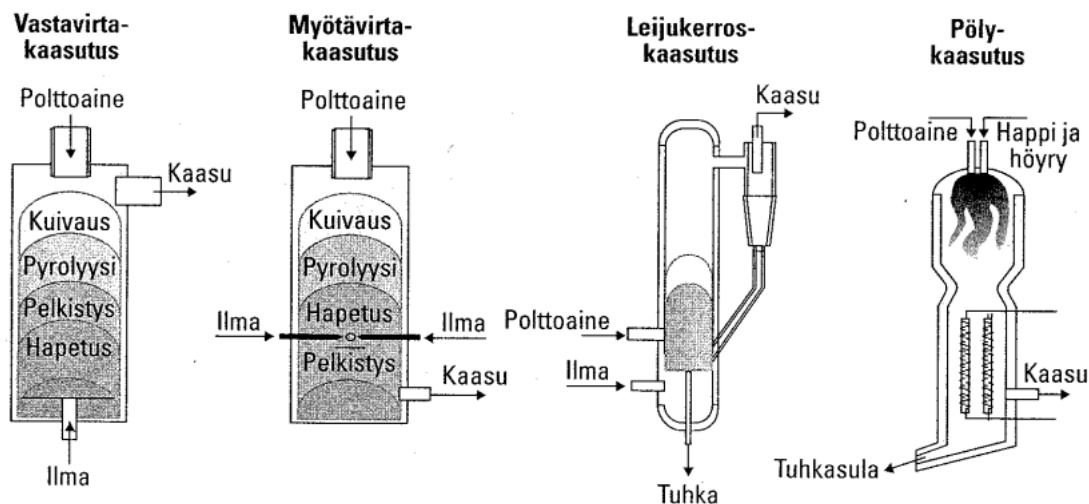
Tekniikat

Erlaisia kaasutustekniikoita on useita, ja ne eroavat toisistaan muun muassa prosessin konfiguraation, materiaalin ja ilman syöttöpisteiden ja materiaalivirtauksien osalta. Tärkeimmät kaasutustekniikat ovat kiinteäpeti-, leijupeti- ja pölykaasutus.

Kiinteäpetikaasutuksessa (Fixed bed gasification) syöte tuodaan reaktoriin yläpuolelta ja se on reaktorissa paikallaan. Tuhka poistetaan reaktorin alaosasta. Kiinteäpetikaasutus voidaan toteuttaa, vastavirta-, myötävirta- tai ristivirtaperiaatteella riippuen ilman kaasujen virtaussuunnasta suhteessa syöteen virtaussuuntaan. Kiinteäpetikaasutuksella voidaan vapauttaa noin 60 – 70 % lietteen sisältämästä energiasta. Kiintoainejakeen tuhkapitoisuus on noin 55 – 65 % ja hiilipitoisuus on 3 – 20 %. (Koch 2018)

Leijupetikaasutus (Fluidbed gasification) on periaatteeltaan leijupetipoltoa muistuttava tekniikka, jossa biomassaa leijutetaan kaasutusreaktorissa. Kaasutuksessa käytettyjä leijupetitekniikoita ovat kupliva- ja kiertoleijupeti (Warnecke 2000). Tuotettu kaasu poistetaan reaktorin yläpäästä, ja tuhka reaktorin pohjalta. Tuotekaasu johdetaan sykloniin, jossa siitä poistetaan tuhkapartikkelit. Leijupetikaasutuksella voidaan vapauttaa noin 65 – 75 % lietteen energiasisällöstä.

Pölykaasutuksessa (Entrained flow gasification) polttoaine, happi ja höyry johdetaan reaktorin yläosaan. Pölykaasutuksella voidaan vapauttaa noin 80 % lietteen energiasisällöstä. Tekniikka vaatii kuitenkin merkittävästi muita tekniikoita enemmän ulkoista energiaa. (Koch 2018)



Kuva 3.15. Kaasutustekniikoiden periaatekuvia. Vasemmalta lukien vastavirta- ja myötävirta-kiinteäpetikaasutus, kiertoleijupetikaasutus ja pölykaasutus. (VTT 1999)

Lietteen käsittelyssä yleisimmin käytetty kaasutustekniikka on leijupetikaasutus, ja se on käytössä myös kaikissa täyden mittakaavan lietteen kaasutuslaitoksissa (Kappale 3.5.5).

Syötteen ja esikäsittely

Kaasutuksen syötteenä käytetään termisesti täysin kuivattua lietettä, sillä kaasutuksen raaka-aineen kuiva-ainepitoisuuden tulee olla korkea, n. 75 - 95 % TS (Koch 2018; Lassi et al. 2011; Albrecht et al. 1997). Syötteenä voidaan käyttää lietettä ilman mädätystä tai mädätettynä, mutta mädätys vähentää tuotekaasun energiasisältöä. Kuitenkin mm. Sülzle-Kopf suosittelee ainoastaan mädätetyn ja kuivatun lietteen käyttöä kaasutuksessa (Hey et al. 2017). Kaasutukseen syötettävän materiaalin palakoon on oltava pieni, jotta kaasutusreaktiot ehtivät tapahtua muutamien sekuntien viipymääjassa.

Jälkikäsittely ja varastointi

Kaasutuksen tuotekaasu tulee puhdistaa partikkeleista suodattamalla tai syklonilla ennen polttoa. Mikäli kaasua halutaan käyttää kaasumootorissa, tulee kaasu käsitellä epäpuhtauksien poistamiseksi esimerkiksi keraamisella suodattimella ja märkäpesurilla.

Polton savukaasut tulee käsitellä jätteenpolton vaatimusten mukaisesti. Lietteen polton savukaasujen käsittelyyn verrattuna käsiteltävä savukaasujen määrä on pienempi ja lentotuhkaa on vähemmän (VTT 2001). Kuitenkin mm. typpi- ja rikkiyhdisteiden, happamien yhdisteiden, raskasmetallien ja elohopean poistamiseksi tarvitaan kattava savukaasujen käsittely.

Relevantti laitoksen mittakaava

Kaasutuksen referenssilaitokset ovat kokoluokaltaan n. 7000 - 35000 t/a linkokuivattua lietettä (n. 2000 – 9000 t TS/a). Tarjolla on kuitenkin myös pieniä, vain 500 t TS/a (1700 t/a TS 30 %) laitoksia. Koska kaasutus muistuttaa useilta teknisiltä ratkaisuiltaan leijupetipoltoa ja on erityisesti kaasumootorille soveltuvaa kaasua tuottavana monimutkainen laitos, taloudellisesti relevantin kokoluokan arvioidaan olevan suurten laitosten (n. > 30 000 t/a (30 % TS)) kokoluokassa.

3.5.2 Tuotteet ja sivutuotteet

Prosessin tuotteet

Prosessin pääasialliset tuotteet ovat tuotekaasu ja tuhka. Tuhkaa ja savukaasujen puhdistusjätteitä syntyy yhteensä n. 5 – 10 % syötteen määrästä (TJL 2003). Sülzle-Kopf selvittää kaasutustuhkan hyödyntämismahdollisuuksia fosforin talteenotokäsittelyn avulla. Fosforin talteenotto tuhkasta on mahdollista samoilla tekniikoilla kuin erillispolton tuhkasta. (Butler 2019; Campos & Judex 2018).

Kaasutuksen tuhka muistuttaa koostumukseltaan polttotuhkaa, mutta sen orgaanisen aineen pitoisuus on hieman korkeampi. Orgaanisten haitta-aineiden poisto on kaasutuksessa tehokasta. Alihapellisissa olosuhteissa kuitenkin PAH-yhdisteitä voi muodostua ja sitoutua tuhkaan (Bucheli et al. 2015, Hey et al. 2017). Erialaisten biomassojen kaasutuksessa on raportoitu pitoisuuksia n. 30 – 50 mg/kg k.a. suuruusluokassa (Bucheli et al. 2015).

Tuotekaasun palavat kaasut ovat pääosin vetyä, hiilimonoksidia, metaania sekä kevyitä hiilivetyjä. Näiden lisäksi kaasu sisältää vettä, hiilidioksidia ja tuhkapartikkeleita sekä epäpuhtauksia, kuten rikki-, typpi- ja klooriyhdisteitä sekä metalleja. Kaasun lämpöarvo on tyypillisesti n. 2,5 – 5 MJ/Nm³ riippuen lietteen lämpöarvosta (Sülzle-Kopf). Werther & Ogada (1999) raportoivat kaasun tuotantomääräksi 1,7 m³/kg lietettä.

Sülzle-Kopfin tutkimuksissa tuhkan fosforipitoisuus on ollut 7,5 – 8 %. Fosfori on ollut heikosti vesiliukoista (< 4 % fosforista vesiliukoista) ja kohtalaisesti sitraattiliukoista (31 – 57 %). Kasvatuskokeissa lannoitusvaste on ollut raakafosfaatin luokkaa. Kokeissa tuhkan rautapitoisuus oli 13 – 19 %, mikä viittaa siihen, että liete on ollut rautasaostettua. Raskasmetallipitoisuudet ovat pääosin allittaneet suomalaisen lainsäädännön raja-arvot, mutta kadmiumin ja nikkelin osalta raja-arvot ovat joissakin tapauksissa ylittyneet (Campos & Judex 2018). Fosforin saatavuudesta kasveille verrattuna prosessin raaka-aineena käytettävään lietteeseen ei ole kattavasti saatavilla tietoa. Voidaan olettaa, että todennäköisesti kaasutuksen vaikutus fosforin liukoisuuteen on lähellä polttoa. Polton on todettu heikentävän rautasaostetun lietteen fosforin käyttökelpoisuutta (Luke 2018).

Sülzle-Kopfin tekniikassa osa tuotetuhkasta muodostuu pohjatuhkana ja osa lentotuhkana, joka erotetaan syklonilla. Pohjatuhkana sitoutuu epäorgaanista ainetta, fosforia ja pieni osuus hiiltä. Lentotuhkassa on runsaasti hiiltä, joista osa esiintyy haitallisina PAH-yhdisteinä. (Hey et al. 2017)

Sivutuotteet ja jätteet

Kaasutusta edeltävässä termisessä kuivauksessa muodostuu poistokaasun käsittelyn jätevesiä ja typpipesuria käytettäessä typpipitoista liuosta. Kaasun käsittelyssä voi muodostua kiinteitä jätteitä (suodatus) ja/tai jätevesiä (märkäpesuri). Savukaasujen käsittelyssä syntyy jätteitä ja/tai jätevesiä, joiden määrä ja laatu riippuu mm. polttoa edeltävästä kaasun käsittelystä ja polttotavasta sekä käytettävästä savukaasujen käsittelytekniikasta. Esimerkiksi Sülzle-Kopf:n prosessissa (Kuva 3.16) tuotekaasu suodatetaan, jolloin syntyy pölymäistä jätettä. Tämän jälkeen vesi- ja happopesureissa muodostuu jätevettä, ja näiden jälkeen aktiivihillisuodattimissa jätteenä muodostuu käytettyä aktiivihiliä. (Sülzle-Kopf)

Kaasutusprosessin tuotekaasu tulee käsitellä ennen polttoa, mikäli poltto tapahtuu kaasumootto-reissa tai CHP-kattilassa. Prosessissa syntyy mm. tervamaisia öljyjä, jotka täytyy poistaa kaasusta esimerkiksi märkäpesurilla (Lassi et al. 2011). Kaasun käsittelyssä voi muodostua kiinteitä jätteitä (suodatus) ja/tai jätevesiä (märkäpesuri). Mikäli kaasu poltetaan lämmön tuottamiseksi, kaasun puhdistukseksi voi riittää partikkulien poisto esim. sykilonilla tai suodattimella.

Savukaasujen käsittelyssä syntyy jätteitä ja/tai jätevesiä, joiden määrä ja laatu riippuvat mm. polttoa edeltävästä kaasun käsittelystä ja polttotavasta sekä käytettävästä savukaasujen käsittelytekniikasta. Esimerkiksi Sülzle-Kopf:n prosessissa (Kuva 3.16) tuotekaasu suodatetaan, jolloin syntyy pölymäistä jätettä. Tämän jälkeen vesi- ja happopesureissa muodostuu jätevettä, ja näiden jälkeen aktiivihillisuodattimissa jätteenä muodostuu käytettyä aktiivihiliä. (Sülzle-Kopf).

Kun laitoksessa käsitellään ja osin poltetaan jätteeksi luokiteltavaa lietemateriaalia, laitokseen sovelletaan jätteen polton lainsäädäntöä, mikäli pyrolyysikaasuja ei puhdisteta siten, että kaasun ei enää katsota olevan jätettä eikä kaasun polttamisesta voi aiheutua suurempia päästöjä kuin maakaasun polttamisesta (YSL 527/2014 §107 2. Mom.). Päästörajoja määrittelee jätteenpoltoasetus (VNa 151/2013) sekä ympäristönsuojelulain (527/2014) nojalla BAT-vaatimusten mukaisesti BREF-dokumenttien päästövaatimukset, mikäli laitos katsotaan ns. direktiivilaitokseksi, eli BAT-vaatimuksia sovelletaan.

3.5.3 Ympäristövaikutukset

Suorat ympäristövaikutukset

Kaasutuksen suoria ympäristövaikutuksia ovat termisen kuivauksen hajuvaikutukset, polton savukaasupäästöt ja sivutuotteena tuotettavien jätteiden ja jätevesien muodostuminen.

Kaasutusta edeltävän termisen kuivauksen poistoilma tulee käsitellä hajuhaittojen vähentämiseksi. Poistoilman käsittelyssä muodostuu nestejakeita, jotka tulee johtaa hyötykäyttöön tai johtaa käsiteltäväksi jätevedenpuhdistamolla. Poistoilma voidaan johtaa polttoon, mikä vähentää termisen kuivauksen hajuvaikutuksia. Termisessä kuivauksessa muodostuu kuitenkin lauhdevettä, joka tulee johtaa jätevesien käsittelyyn.

Jätevesilietteen kuljetuksista ja varastoinnista voi aiheutua hajuhaittoja, melua ja tärinää. Laitoksen toiminnasta voi aiheutua toiminnan luonne huomioiden normaalia melua ja tärinää.

3.5.4 Taloudellisuus ja kustannukset

Energiatalous

Kaasutus on voimakkaasti endoterminen reaktio, joten se vaatii toimiakseen merkittävän määrän ulkoista energiaa. Prosessissa kuitenkin myös tuotetaan energiaa tuotekaasusta. Tokiossa sijaitseva laitos tuottaa sähköä noin 150 kW, mikä kattaa laitoksen sähköntarpeesta noin 30 %. Koko-

naissähkönkulutus laitoksessa on siis noin 500 kW, mikä vastaa 100 t/d käsittelevässä laitoksessa n. 120 kWh /t lietettä (20 – 30 % TS). (Kawasaki 2010; Tokyo Bureau of Sewerage 2010).

Investointikustannukset

Investointikustannukset on arvioitu ns. Turn Key -hintana, ja investoinnin poisto on laskettu käyttäen korkokantana 5 % ja poistoaikana 20 vuotta.

Sülzle-Kopf:n ilmoittama laitostoimituksen investointikustannus on 4 – 4,3 milj. EUR n. 4500t TS/a (15 000 t/a TS 30 %) käsittelevälle laitokselle. Tähän ei sisälly termisen kuivauksen laitosta. Investointikustannukset riippuvat merkittävästi kaasutusprosessin konfiguraatiosta. Sähkön tuotantoa varten kaasu tulee puhdistaa monivaiheisessa prosessissa, ja investointikustannukset ovat huomattavasti korkeammat kuin yksinkertaisemmassa lämmön tuotantoon tähtäävässä laitoksessa.

Laitoskokonaisuuden kustannukset ovat merkittävästi laitetoimitusta suuremmat. Kun investointiin lisätään terminen kuivaus ja muut laitosrakenteet, arvioidaan investointikustannusten kokonaisuudessaan olevan noin 9-12,5 milj. EUR. Käsiteltäviä lietemääriä kohden investoinnin poisto (poistoai-ka 20 vuotta, korkokanta 5 %) olisi arviolta noin 50 – 65 EUR/t (30 % TS).

Käyttökustannukset

Käyttökustannuksissa on huomioitu käsittelyn suorat kustannukset, sisältäen energian, kemikaalit ja henkilöstökulut. Lietteen ja lopputuotteen kuljetuskustannuksia käsittelyyn tai käsittelylaitoksesta käyttökohteeseen ei ole huomioitu, mutta jätteiden käsittelykustannukset on huomioitu. Hyödynnet-
täville tuotteille on käytetty nollahintaa.

Käyttökustannuksiksi arvioidaan noin 50 – 65 EUR / t (30 % TS). Arvioidut kokonaiskustannukset lietetonnin kohden ovat noin 100 – 130 EUR / t (30 % TS).

Kaasutuslaitoksen suurten investointikustannusten vuoksi olisi tarkoituksenmukaista rakentaa kapasiteetiltaan suurempia laitoksia, jolloin investointikustannukset olisivat matalammat ja todennäköisesti lähellä leijupetipolttolaitoksen suuruusluokkaa.

3.5.5 Tekniikan valmiusaste ja referenssit

Tekniikan valmiusaste ja kehittämistilanne

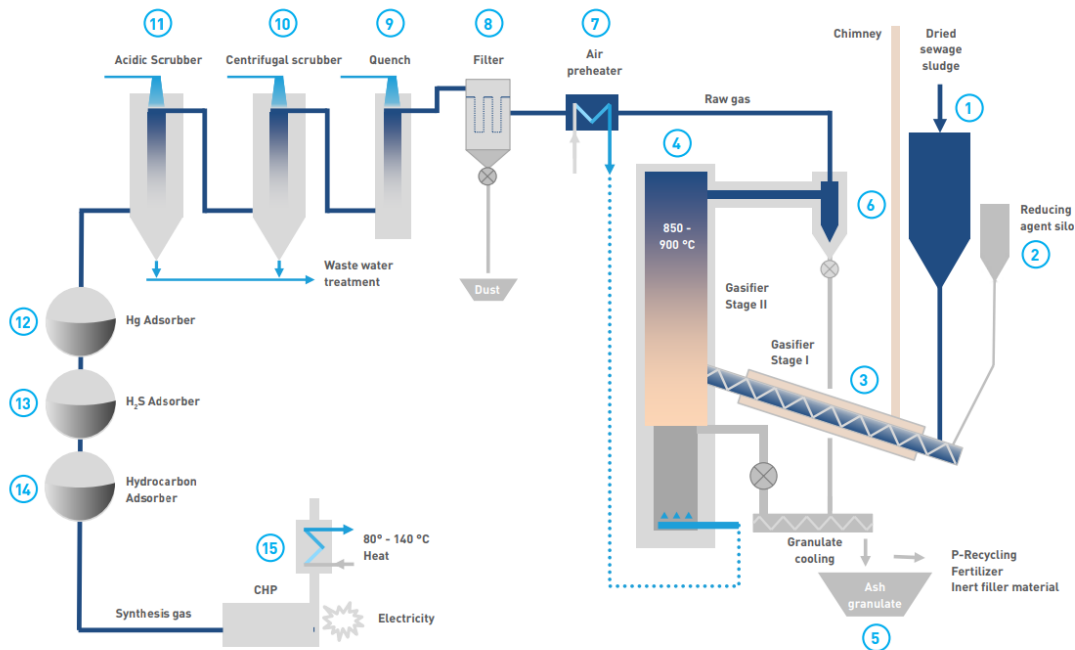
Biomassan kaasutusta yleisesti on käytetty useiden kymmenien vuosien ajan, ja mm. puun kaasutuslaitoksia on yleisesti käytössä. Lietteen käsittelymenetelmänä tekniikka on suhteellisen uusi; kaasutuksen pilot- ja täyden mittakaavan laitoshankkeet on pääosin toteutettu 2000-luvun aikana. Tällä hetkellä on käytössä kolme täyden mittakaavan kaasutuslaitosta, joista kaksi sijaitsee Saksassa ja yksi Japanissa. Saksassa ollaan ottamassa käyttöön kolmatta kaasutuslaitosta. (Jones 2017; Campos & Judex 2018; Sülzle-Kopf)

Kaasutuksesta lietteen käsittelyssä on useampia edelleen toiminnassa olevia laitoshankkeita lähes 20 vuoden ajalta. Olemassa olevat laitokset ovat kuitenkin luonteeltaan ensimmäisiä demonstrointilaitoksia, eikä niiden taloudellisesta kannattavuudesta ole täyttä varmuutta. Tekniikan valmiusasteen (TRL) arvioidaan olevan 8 (teknologia/järjestelmä on täydellinen ja todettu toimivaksi) (Taulukko 3.2).

Referenssilaitokset

Sülzle-Kopf SynGas, Saksa

Sülzle-Kopf on toteuttanut Saksassa kolme lietteen kaasutuslaitosta. Laitokset sijaitsevat Balingenissa, Mannheimissa ja Koblenzissa. Sülzle-Kopf:n prosessi perustuu yksi- tai kaksivaiheiseen leijupetikaasutukseen. Kaksivaiheisen kaasutuksen ensi vaiheessa liete käsitellään pyrolyysiyksikössä, josta kaikki prosessin tuotteet johdetaan leijupetikaasuttimeen. Tuotekaasu jäädytetään ja käsitellään laitoksen koosta riippuen erilaisilla suodattimilla, pesureilla ja aktiivihiilisuodattimilla ennen polttoa. Yritys tarjoaa laitoksia, joiden kapasiteetti on 500 – 5000 t TS/a.



Kuva 3.16. Sülzle-Kopf:n lietteen kaasutusprosessin periaatekuva. 1. Termisesti kuivatun lietteen syöttö 2. Pelkistyskemikaalin syöttö 3. 1-vaiheen kaasutus 4. 2-vaiheen kaasutus 5. Tuhkan keruusäiliö 6. Partikkelien poisto syklonissa 7. Tuloilman esilämmitys tuotekaasun lämmöllä 8. Korkean lämpötilan suodatin 9. Kaasun jäädytys käsitellyllä jätevedellä 10. Sentrifugipesuri 11. Hapoppesuri 12.-14. Aktiivihiilisuodattimet 15. CHP-polttolaitos (Sülzle-Kopf)

Balingenin laitos oli valmistuessaan vuonna 2001 maailman ensimmäinen puhdistamolietteen kaasutuslaitos. Balingenin laitoksen kapasiteetti on nykyisin n. 2000 t TS/a (n. 7000 t/a TS 30 %). Kaasutuksen lämpötila on 850 °C. Syötteenä käytetään Balingenin jätevedenpuhdistamon lietettä, joka kuivataan nauhakuivaimella 75 – 85 % TS kuiva-ainepitoisuuteen. Tuotekaasu poltetaan CHP-laitoksessa. Tuotekaasun polttoteho on 720 kW, josta 250 kW käytetään nauhakuivaimen tarpeisiin. Tuotekaasulla voidaan tuottaa 75 kW sähköteho, josta laitoksen omiin tarpeisiin käytetään 15 kW.



Kuva 3.17 Balingenin lietteen kaasutuslaitos (Hey et al. 2017)

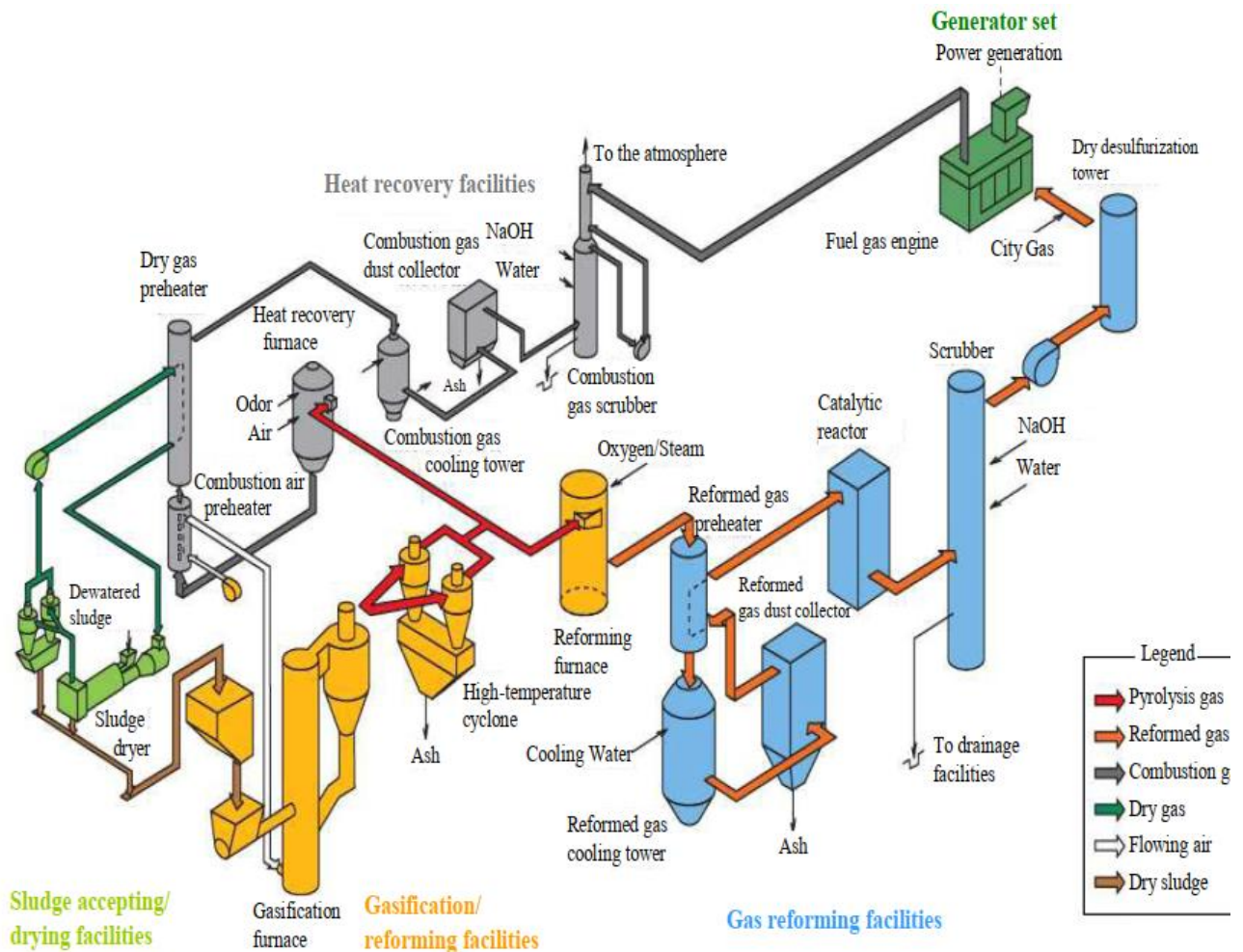
Mannheimin laitos otettiin käyttöön vuonna 2011. Sen kapasiteetti on 5 000 t TS/a (n. 17 000 t/a, TS 30%). Kaasutuksen lämpötila on 850 – 900 °C. Tuotekaasu poltetaan rumpukuivaimen kattilassa kuivauksen lämmöntarpeen kattamiseksi. Tuotekaasun polttoteho on 1,5 MW.

Koblenzin laitos on tällä hetkellä käyttöönottoaiheessa. Laitoksen kapasiteetti on 4 000 t TS/a (n. 13 000 t/a TS 30 %). Kaasutuksen lämpötila on Mannheimin laitoksen tapaan 850 – 900 °C. Kuivaimena käytetään nauhakuivainta. Kaasu poltetaan laitoksen yhteydessä olevassa CHP-kattilassa. Laitoksen sähköteho on 425 kW ja lämpöteho 535 kW. (Sülzle-Kopf)

Kiyose, Tokio, Japani

Tokiassa Kiyosen jätevedenpuhdistamossa (Kiyose Water Reclamation Center) on ollut käytössä lietteen kaasutuslaitos vuodesta 2010 lähtien. Laitoksen kapasiteetti on noin 35 000 t/a linkokuivattua lietettä (20 – 30 % TS). Prosessin lämpötila on 780 – 800 °C. (Kawasaki 2010; Tokyo Bureau of Sewerage 2010)

Jätevedenpuhdistamon liete kuivataan termisesti n. 80 % TS kuiva-ainepitoisuuteen. Tuotekaasusta osa poltetaan laitoksen tarvitseman lämmön tuottamiseksi ja osa käsitellään epäpuhtauksien poistamiseksi ja johdetaan maakaasuun sekoitettuna kaasumootorin polttoaineeksi. Laitoksen sähköteho on 150 kW, mikä vastaa noin 30 % laitoksen omasta sähköntarpeesta. (Kawasaki 2010; Tokyo Bureau of Sewerage 2010)



Kuva 3.18 Tokion Kiyosen jätevesilietteen kaasutuslaitoksen prosessikaavio. (Tokyo Bureau of Sewerage 2010)

3.6 POLTTO ERILLISPOLTTOLAITOKSISSA

3.6.1 Tekniikan kuvaus

Tekniikan luonne ja tavoite

Ensimmäiset lietteenpolttolaitokset Saksassa ovat jo 1960-luvulta ja poltto on joissain Keski-Euroopan maissa, kuten Saksassa, Sveitsissä, Itävallassa ja Hollannissa, muodostunut yleiseksi lietteen käsittelymenetelmäksi. Lähtökohdiana polton yleistymisessä on ollut tarve vähentää lietteen määrää. Myöhemmin polton positiiviset vaikutukset lietteen haitta-aineiden tuhoamisessa ovat ylläpitäneet tekniikan yleistymistä. Poltto poistaa tehokkaasti lietteestä orgaaniset haitta-aineet, lääkeaineet ja mikromuovit, ja tuhoaa täysin lietteen mikrobit. Erillispolttoa pidetään suositeltavana polttotekniikkana (HELCOM 2017), koska fosforin talteenotto erillispoltton tuhkasta on teknisesti mahdollista.

Polttotuhkaa voidaan hyödyntää asfaltin, sementin tai tiilien raaka-aineena tai maarakentamisessa ja periaatteessa myös lannoitteena. Tuhkan lannoitekäyttö sellaisenaan on ollut rajoitettua perustuen mm. tuhkan korkeisiin raskasmetallipitoisuuksiin. Fosforin talteenottotekniikoilla voidaan liete-tuhkasta valmistaa fosforituotteita, jotka sopivat lannoitetuotteiksi tai muihin fosforituotteiden käyttökohteisiin. Fosforin erottamiseksi tuhkasta käyttökelpoiseksi fosforilannoitteeksi on olemassa

erilaisia tekniikoita, mutta ne ovat voimakkaasta kehitystyöstä huolimatta edelleen taloudellisista syistä harvinaisia. Edelleen kuitenkin yleisimmin tuhka johdetaan loppusijoitukseen. (Pöyry Switzerland 2017; Sitra 2007)

Suomessa lietteen poltto on harvinaista, ja lietteen erillispolttoa ei ole käytetty lainkaan ennen Rovaniemen polttolaitoksen käyttöönottoa.

Toimintaperiaate

Erillispoltossa termisesti kuivattu liete poltetaan hapellisissa oloissa, tyypillisesti lämpötilassa n. 850 – 950 °C. Alle 850 °C lämpötiloissa voi aiheutua hajuhaittoja, ja yli 950°C:ssa tuhkan sintrautumista voi tapahtua (UBA 2013). Savukaasujen viipymäajan polttokammiossa (> 850 °C lämpötilassa) tulee olla viimeisen ilmansyötön jälkeen vähintään 2 sekuntia, jotta jätteen polton vaatimukset täytetään. Polton lämpötilaan vaikuttaa mm. lietteen lämpöarvo sekä paloilman määrä ja happipitoisuus.

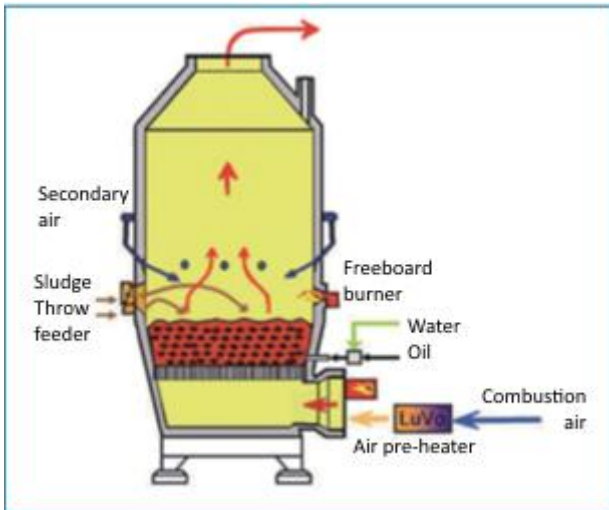
Polton tuottamaa energiaa voidaan siirtää esimerkiksi höyryyn, ja sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi sähkön ja/tai lämmön tuotannossa. Lietteenpolttolaitoksissa tyypillisesti valtaosa energiasta käytetään lietteen kuivauksen tarpeisiin.

Tekniikat

Polttotekniikoita on olemassa useita, mutta lietteen erillispoltossa yleisimmin käytetyt tekniikat ovat stationaariset ja kiertoleijupetikattilat (stationary / circulating fluidized bed). Näiden lisäksi käytössä on arinakattiloita, sykloidiuuneja, pyöröuuneja (rotary kiln), kiinteäliesi- ja moniliesiuuneja (static / multiple hearth) sekä pyöriviä ja kuplaleijupetiuuneja (bubbling / rotating fluidized bed). EU:n alueella toimivista laitoksista yli 90 % toimii leijupetitekniikalla (Pöyry Switzerland 2017). Suomalainen PAKU-tekniikka on näistä poikkeava tekniikka, jossa polttoaineen lämpöä kierrätetään termiseen kuivaukseen prosessissa kiertävän hiekan avulla.

Leijupeti

Leijupetitekniikka on biomassojen poltossa laajalti käytetty käytetty polttotekniikka ja lietteen poltossa eniten käytetty tekniikka. Polttokattilaan muodostetaan leijupetihiekasta ja poltettavasta materiaalista peti, jota leijutetaan leijukerroksen alapuolelle johdettavan ilman avulla. Tekniikasta on kehitetty useita variaatioita, joista stationäärinen leijupeti on noussut lietteen poltossa ensisijaiseksi tekniikaksi (Pöyry Switzerland 2017). Tekniikan haittapuolia ovat korkeat investointi- ja käyttökustannukset sekä suuri laitoskoko.

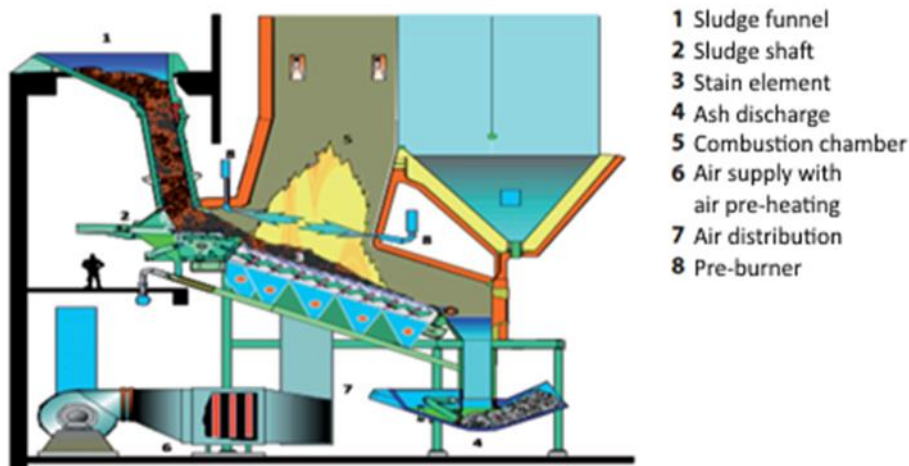


Kuva 3.19 Stationäärisen leijupetikattilan periaatekuva. (Pöyry Switzerland 2017)

Arinapoltto

Arinapoltossa kiinteä polttoaine syötetään arinalle, jonka päällä materiaali kulkee polttokattilan lävitse. Arinapolttoa käytetään yleisesti kiinteiden polttoaineiden, kuten yhdyskuntajätteen, polttoon. Lietteen poltossa arinapolttoa käytetään yleisimmin yhteispolttolaitoksissa (VTT 2011; Pöyry Switzerland 2017).

Lietteen erillispolttoa arinapolttokattiloissa on viime vuosina toteutettu lähinnä pienehkössä mittakaavassa (Pöyry Switzerland 2017; Veolia 2019). Toteutettujen laitosten mittakaava on ollut noin 2000 – 20 000 t/a mekaanisesti kuivattua lietettä. Taloudellisesti järkevänä mittakaavana pidetään vähintään 10 000 t/a lietemäärää. Poltto voidaan toteuttaa mädätetylle tai mädättämättömälle lietteelle. Prosessin arvioidaan toimivan ilman ulkopuolista energiaa noin 25 % TS lietteelle. (Veolia 2019)

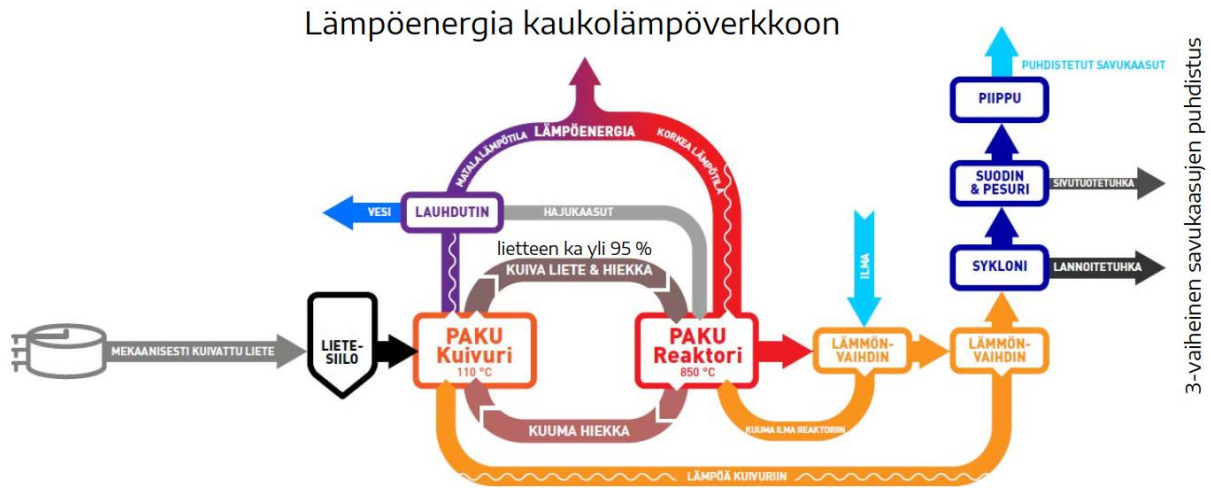


Kuva 3.20 Lietteen arinapolton periaatekuva (Pöyry Switzerland 2017)

PAKU-tekniikka

PAKU on Suomessa kehitetty tekniikka, jota markkinoi Endev Oy. Tekniikka poikkeaa selvästi muista lietteenpolttotekniikoista. Prosessissa poltto ja kuivaus on yhdistetty ns. kiertomassatekniikalla, jossa lietteen joukkoon sekoitetaan kuivauksessa hiekkaa. Liete kuivataan yli 95 % kuiva-ainepitoisuuteen. Hiekka ja liete johdetaan seoksena polttoyksikköön. Polttoyksiköstä hiekka pa-

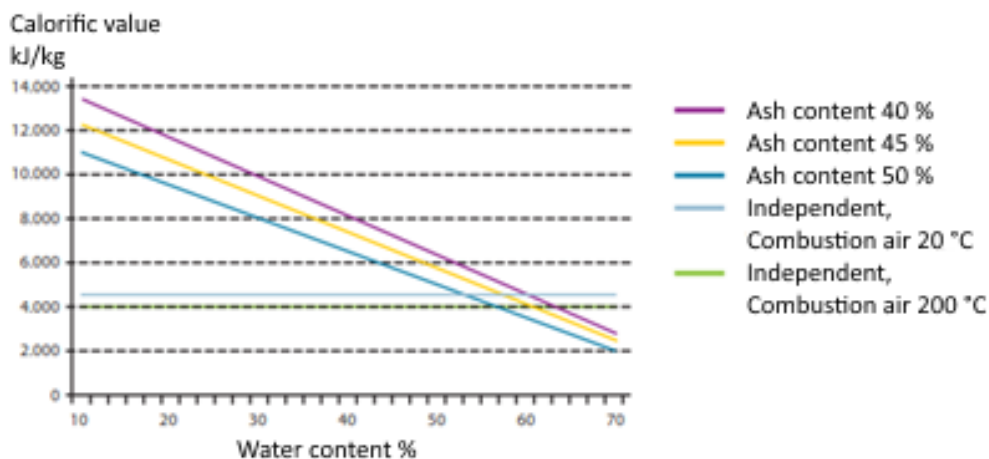
lautetaan kuivuriin, ja savukaasut johdetaan lämmönvaihtimien kautta savukaasujen käsittelyyn. Prosessissa muodostuu kahdenlaista lentotuhkaa. Syklonilla ensi vaiheessa erotettua tuhkaa suunnitellaan hyödynnettävän lannoitekäytössä. Tämän ns. tuotetuhkan osuus on noin 90% kokonaistuhkamäärästä. Seuraavassa vaiheessa muodostuva sivutuotetuhka on savukaasujen käsitteilyjätettä, jossa on merkittäviä määriä mm. raskasmetalleja, eikä sitä voida hyödyntää lannoitteena. PAKU-prosessi on valmistajan mukaan energiaomavarainen, kun tulevan lietteen kuiva-ainepitoisuus on vähintään 20 % (VVY 2016).



Kuva 3.21 PAKU-prosessin periaate. (Pekkala 2019)

Syötteen ja esikäsittely

Lietteen erillispoltossa syötteenä on normaalisti ainoastaan termisesti kuivattua jätevesilietettä. Keskeisiä syötteen ominaisuuksia lietteen poltossa ovat kuiva-ainepitoisuus, orgaanisen aineen osuus kuiva-aineesta, raaka- ja biolietteen osuudet sekä lietteeseen lisätyt ainekset (esim. kalkki). Lietteen lämpöarvoa suhteessa kosteuteen ja tuhkapitoisuuteen on kuvattu seuraavassa kuvaajassa. Kuvaajassa on myös esitetty raja-arvot autotermisen polton vaatimille lämpöarvoille. (Pöry Switzerland 2017)



Kuva 3.22. Lietteen lämpöarvo suhteessa kosteuteen erilaisilla tuhkapitoisuuksilla. (Pöry Switzerland 2017)

Lietteen esikäsitteilynä poltossa on terminen kuivaus. Polttoon johdettavan lietteen optimaalinen kuiva-ainepitoisuus riippuu polton lämpötaseesta ja se tulee selvittää tapauskohtaisesti. Esimerkiksi leijupetikattilan syötteenä osittain kuivattu liete (40 – 50 tai 60 – 85% TS) on täysin kuivattua lietettä (85 – 95 % TS) taloudellisempaa, koska loppuunkuivaus on tehokkaampaa leijupetikattilassa kuin termisesti kuivaamalla (Pöyry Switzerland 2017).

Jälkikäsitteily ja varastointi

Polttotuhka voidaan rakeistaa käsittely- ja varastointiominaisuuksien parantamiseksi. Rovaniemen polttolaitoksen tuhka on tarkoitus rakeistaa.

Tuhkasta voidaan valmistaa lannoitetuotteita fosforin talteenottokäsittelyllä. Fosforin talteenottokäsittelytekniikoita on käsitelty tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

Relevantti laitoksen mittakaava

Lietteen erillispolttolaitokset ovat tyypillisesti kapasiteetiltaan suuria. Euroopassa toteutetut laitokset ovat pääosin kokoluokkaa n. 40 000 – 400 000 t/a (23 – 33 % TS) (VTT 2001; Pöyry Switzerland 2017).

PAKU-tekniikan yksi ominaispiirre on sen soveltuvuus pienille kapasiteeteille, mikä tekee siitä kiinnostavan alueilla, joissa lietteentuottomäärät eivät ole riittäviä esim. leijupetilaitoksen tarpeisiin. Rovaniemelle toteutettavan polttolaitoksen kapasiteetti on 12 000 t/a (20 – 25 % TS). Referenssilaitosten pohjalta arvioidaan, että PAKU-tekniikkaan perustuvan polttolaitoksen relevantti kapasiteetti on > 10 000 t/a (30 % TS) ja leijupetitekniikkaan perustuvan laitoksen 40 000 t/a (30 % TS).

3.6.2 Tuotteet ja sivutuotteet

Prosessin tuotteet

Polton pääasiallinen tuote on tuhka, johon lietteen inertti kiintoaine, raskasmetallit ja valtaosa fosforista sitoutuu. Käsittely tapahtuu hapellisissa oloissa korkeissa lämpötiloissa, ja kaikki orgaaninen aines hapettuu. Orgaaniset haitta-aineet, lääkeaineet ja muovit tuhoutuvat poltossa yli 850 °C lämpötiloissa tehokkaasti (UNEP 2004; Ortner & Hensler 1995)

Tuhkaa voidaan hyödyntää mm. asfaltin, sementin tai tiilien raaka-aineena tai maarakentamisessa. Yleisin lietetuhkan käyttökohde Euroopassa on loppusijoitus kaatopaikalle tai kaivosten täyttöön (Sitra 2007). Esimerkiksi Saksassa lietetuhkasta käytettiin vuosina 2012 – 2013 37% kaivosten täyttöön, 29 % loppusijoitukseen, 29 % rakentamiseen ja 5 % lannoitetuotteina (Pöyry Switzerland 2017).

Rakentamisessa lietetuhkaa voidaan käyttää sellaisenaan maata stabiloivana materiaalina tai tie- ja rakentamisessa pohjakerroksen materiaalina (Pöyry Switzerland 2017). Lietetuhkan on todettu lisäävän pehmeän maan lujuutta (mm. Jagaba et al. 2019, Lin et al. 2007).

Asfaltin valmistuksessa lietetuhkaa voidaan käyttää korvaamaan muita mineraalimateriaaleja kuumaa-ainespäällystyksessä. Lietetuhkaa voidaan käyttää noin 2 – 5 % osuutena massasta korvaamaan esim. kiviä tai sammutettua kalkkia. (Pöyry Switzerland 2017)

Sementin valmistuksessa lietetuhkaa voidaan käyttää korvaamaan sementin raaka-aineena käytettävää savea. Tuhka sisältää prosessissa tarvittavia aineosia, kuten piitä, alumiinia, kalsiumia ja rautaa, ja on koostumukseltaan varsin samanlaista verrattuna raaka-aineena käytettävään saveen.

Noin 10 – 40 % lietteen kiintoaineesta voi olla sementin raaka-aineena arvokkaita mineraaleja. Esimerkiksi sementissä tarvittavasta piistä voitaisiin korvata muutamia prosentteja lietteen sisältämällä piillä (Finnsementti 2019). Tyypillisesti lietetuhkan osuus sementin massasta on < 5 % , mutta korkeampiakin seossuhteita aina 20 %:iin asti on raportoitu (Pöyry Switzerland 2017).

Lietetuhkan korkean huokoisuuden ja alumiinioksidipitoisuuden vuoksi se sopii erityisen hyvin kevytbetonin ja kevytsoran valmistukseen. Kevytbetonin valmistuksessa sitä voidaan käyttää jopa 60 – 80 % osuutena sementin massasta. Sementin valmistuksen ohella lietetuhka soveltuu tiilien valmistuksen raaka-aineeksi jopa 50 % osuutena materiaalista. Lietetuhka soveltuu myös muurilaastien valmistukseen korkeintaan 20 % seoksena muiden materiaalin joukossa. (Pöyry Switzerland 2017)

Kaikessa tuhkan hyötykäytössä tulee huomioida, että materiaalin tulee täyttää rakentamismateriaaleille asetetut vaatimukset.

Tyypillisiä lietetuhkan ominaisuuksia on esitetty seuraavassa taulukossa.

Taulukko 3.1. Lietetuhkan tyypillinen koostumus (Pöyry Switzerland 2017)

Lietetuhkan tyypillinen koostumus		
Piidioksidi	SiO ₂	35 - 40 %
Alumiinioksidi	Al ₂ O ₃	15 - 20 %
Ferrioksidi	FeO ₃	10 - 20 %
Kalsiumoksidi	CaO	15 - 25 %
Fosforioksidi	P ₂ O ₅	10 - 23 %

Tuhkaa voitaisiin teoriassa käyttää lannoitteena sellaisenaan, mutta sen hyödyntämisessä haasteena ovat korkeat raskasmetallipitoisuudet. Polton on todettu heikentävän rautasaostetun lietteen fosforin käyttökelpoisuutta (Luke 2018).

Suomessa lietteen polttotuhkalle ei ole haettu lannoitetuotteiden tyyppinimi hyväksyntää, eikä sitä voida siten nykyisellään käyttää lannoitetuotteena. Liettepolton tuhkaa voidaan kuitenkin sekoittaa sääntelyn sallimissa rajoissa muun tuhkan sekaan alle 3 % pitoisuutena ja käyttää valmistettua seosta tuhkalannoitteena. On mahdollista, että liettepolton tuhkalle haetaan hyväksyntää lannoitevalmisteiden tyyppinimiluetteloon. Näitä hyödyntämismahdollisuuksia on suunniteltu Rovaniemen liettepolttolaitoksen tuhkan hyödyntämiseksi (Pekkala 2019).

Lietteen erillispolton tuhkasta voidaan valmistaa fosforituotteita lannoitteeksi tai teollisuuden käyttöön erilaisilla talteenottotekniikoilla, jotka perustuvat joko kemialliseen tai termiseen käsittelyyn. Tällä hetkellä fosforin talteenotto tuhkasta ei ole kustannustehokasta, mutta menetelmiä kehitetään aktiivisesti. Tuhka voidaan myös varastoida myöhemmin tapahtuvaa fosforin talteenottoa varten, jota tehdään jo Sveitsissä lainsäädännön vaatimuksesta. Fosforin talteenotosta sivutuotteena jää jäljelle jäännöstuhka, joka voidaan hyödyntää muun tuhkan tavoin tai sijoittaa kaatopaikalle.

Fosforin talteenotto

Tuhkan sisältämän fosforin talteenotto hyödynnettävässä muodossa on olennaisen tärkeää fosforin kierrätyksen mahdollistamiseksi. Fosforin talteenottoon tuhkasta on kehitetty useita tekniikoita, jotka perustuvat joko fosforin termiseen tai kemialliseen erottamiseen tuhkasta. Lähimpänä täyden mittakaavan sovelluksia ovat EcoPhos, TetraPhos, Ash2Phos, Phos4Life ja ASH DEC. Ensimmäisiä täyden mittakaavan sovellutuksia ollaan ottamassa käyttöön.

EcoPhos on kemiallinen prosessi, jonka tuote on fosforihappo ja sivutuotteena muodostuu kipsiä. Prosessi perustuu suola- ja rikkihappoilla liuotukseen ja kalkin lisäämiseen kipsin muodostamiseksi. Ensimmäinen toteutusasteelle edennyt täyden mittakaavan fosforin talteenottolaitos on EcoPhos-tekniikkaan perustuva laitos, joka sijaitsee Dunkerquessa, Ranskassa. Sen on suunniteltu ottavan vastaan lietetuhkaa 60 000 t/a. (Pöyry Switzerland 2017)

Remondis Tetrphos on kemiallinen prosessi, jossa tuotetaan fosforihappoa, ja prosessissa otetaan talteen rauta- tai alumiinisuoloja klorideina. Sivutuotteena muodostuu kipsiä. Prosessissa käytetään tuotettavaa fosforihappoa ja ulkopuolista rikki- ja suolahappoa, minkä lisäksi prosessiin lisätään kalsiumsulfidia. Fosforin saanto on noin 80 %. Tekniikkaa on pilotoitu Hampurissa sijaitsevassa laitoksessa vuodesta 2015 lähtien. Täyden mittakaavan laitosta rakennetaan parhailaan yhteistyössä Hamburg Wasserin kanssa (Hamburg Wasser 2019).

EasyMining Ash2Phos on kemiallinen prosessi, jossa voidaan erottaa polttotuhkasta fosfori sekä rauta- ja alumiinisuolat erillisinä jakeina. Prosessin keskeiset syötteet ovat liete, suolahappo (HCl) ja lipeä (NaOH). Prosessi koostuu kolmesta vaiheesta: 1. Liuotusvaihe, jossa tuhka liuotetaan happolla, 2. Erotusvaihe, jossa fosforia, rautaa ja alumiinia sisältävät yhdisteet erotetaan omiksi jakeikseen emäksisissä oloissa (lipeän lisäys) ja 3. konversiovaihe, jossa välituotteet muunnetaan halutuiksi lopputuotteiksi (kalsiumfosfaatti, monoammoniumfosfaatti tai fosforihappo, ferrikloridi/-sulfaatti ja alumiinisulfaatti). Prosessi tapahtuu normaalissa paineessa ja huoneenlämmössä. Prosessi kykenee valmistajan mukaan > 90 % fosforin talteenottoon. Prosessin sivutuotteina muodostuu silikaattipitoista hiekkaa ja raskasmetallipitoista sulfidisakkaa. Ash2Phos-tekniikkaa pilotoidaan parhailaan Ruotsissa, ja täyden mittakaavan (30 000 t P/a) laitosta suunnitellaan Helsingborgiin (Cohen 2018). Kapasiteetti vastaa neljänestä Ruotsin vuotuisesta fosforinkulutuksesta. Laitos on suunniteltu otettavan käyttöön vuoden 2020 alussa. Toinen laitos, kapasiteetiltaan 60 000 t tuhkaa/a (AVL n. 6 000 000), on suunnitteilla Bitterfeld-Wolfeniin, Saksaan. (Cohen 2018; Winnfors 2019)

Outotec ASH DEC on termokemiallinen prosessi, jossa raskasmetallit höyrystetään ja ne korvataan alkalimetalleilla. Käsittelyssä tuhka homogenisoidaan ja pelletöidään. Pellettejä käsitellään noin 30 minuutin ajan n. 1000 °C:ssa, jossa valtaosa haitallisista metalleista höyrystyy. Käsittelyssä käytetään erilaisia kemikaaleja mm. kalsium- ja alumiinifosfaattien muuttamiseksi liukoiseen muotoon, mahdollistaen haitallisten aineiden erotuksen. Tuotteena on lannoitekäyttöön kelpaava tuhka, jonka raskasmetallipitoisuudet ovat alhaiset. Tekniikassa fosforin saanto on jopa 98 %, mutta tekniikka kuluttaa paljon energiaa. Tekniikkaa on pilotoitu 2 vuoden ajan Leobenissa sijaitsevassa laitoksessa ja koeluonteisesti suuremmassa mittakaavassa. Täyden mittakaavan laitosta ei suunnitella toteutettavan lähiaikoina. (Pöyry Switzerland 2017)

Tekniikoiden yleistymistä hidastaa niiden tyypillisesti korkeat investointi- ja käyttökustannukset ja osin myös epävarmuudet tuotteiden laadukkuudesta lannoitekäytössä. Haasteena ovat erityisesti raskasmetallien pitoisuudet sekä fosforin saatavuus kasveille. Fosforin talteenottoa polttotuhkasta pidetään kuitenkin yhtenä potentiaalisista pitkän aikavälin ratkaisuista, ja tekniikoita kehitetään intensiivisesti. (VVY 2018)

Sivutuotteet ja jätteet

Lietteen erillispoltton keskeiset sivutuotteet ovat lentotuhka ja savukaasujen käsittelyssä märkäpesuria käytettäessä syntyvä jätevesi. Termisen kuivauksen poistoilma voidaan yleensä johtaa polttoon, mutta poistoilman kosteuspitoisuutta tulee alentaa lauhduttamalla. Lauhdevettä muodostuu lietteen kosteudesta riippuen n. 0,1 – 0,3 m³ / t lietettä. Lauhdevesi voidaan yleensä johtaa viemäriin, mutta se lisää puhdistamolle palautuvaa typpikuormaa.

Lietteenpolttolaitoksilta vaaditaan jätteenpoltoasetuksen (VNa 151/2013) mukaisia savukaasun käsittely- ja analyysijärjestelyitä. Päästörajoja määrittelee jätteenpoltoasetus (VNa 151/2013) sekä

ympäristönsuojelulain (YSL 527/2014) nojalla BAT-vaatimusten mukaisesti BREF-dokumenttien päästövaatimukset, mikäli laitos katsotaan ns. direktiivilaitokseksi, eli BAT-vaatimuksia sovelletaan. Nykyisillä savukaasujen käsittelymenetelmillä savukaasujen päästöt ympäristöön saadaan alennettua jätteenpoltoasetuksen mukaisiksi.

Savukaasujen käsittelymenetelminä käytetään yleensä partikkelien poistoa kuitu-, sähkö- tai ke-raamisella suodattimella tai syklonilla, typen oksidien pelkistystä, happamien aineiden adsorptiota tai märkäpesuria ja tarvittaessa aktiivihiiisuodatusta.

Savukaasujen käsittelyssä syntyy lentotuhkaa (n. 90 - 130 kg / t lietettä (25 % TS)) ja savukaasu-jen käsittelyjätteitä (n. 10 - 30 kg / t lietettä (30 % TS)) tai märkäpesutekniikkaa käytettäessä pesu-rin jätevettä (n. 0,3 m³ / t lietettä (30 % TS)). Lentotuhka sijoitetaan joko tavanomaisen tai vaaralli-sen jätteen kaatopaikalle sen ominaisuuksista riippuen. Savukaasujen käsittelyjäte johdetaan vaa-rallisen jätteen käsittelyyn. Savukaasupesurin jätevesi yleensä esikäsitellään suolojen, raskasme-tallien ja pölyn poistamiseksi ennen johtamista viemäriin. Esikäsitelyssä muodostuu raskasmetal-leja sisältävä jäännös (n. 0,5 kg / t lietettä).

Lietteiden korkean tuhkapitoisuuden vuoksi savukaasujen partikkelipitoisuus on yleensä korkea. Rikin oksidien pitoisuudet ovat samaa suuruusluokkaa ja typen oksidien pitoisuudet merkittävästi korkeammat verrattuna kivihiilen polttoon. Lietteessä on raskasmetalleja ja elohopeaa, minkä vuoksi aktiivihiiisuodatusta voidaan tarvita. Sen sijaan dioksiinit ja furaanit eivät yleensä ole on-gelma lietteen poltossa. (VTT 2001)

3.6.3 Ympäristövaikutukset

Suorat ympäristövaikutukset

Lietteen erillispoltton keskeiset ympäristövaikutukset liittyvät termisen kuivauksen poistokaasun käsittelyyn, savukaasujen päästöihin ja käsittelyyn sekä lentotuhkan ja jätevesien käsittelyyn sekä tuhkan hyötykäytön ympäristövaikutuksiin.

Termisen kuivauksen poistoilma tulee käsitellä hajuhaittojen vähentämiseksi. Poistoilman käsitte-lyssä muodostuu nestejakeita, jotka tulee johtaa hyötykäyttöön tai johtaa käsiteltäväksi jäteveden-puhdistamolla. Poistoilma voidaan johtaa polttoyksikköön, mikä vähentää termisen kuivauksen hajuvaikutuksia. Termisessä kuivauksessa muodostuu kuitenkin lauhdevettä, joka tulee johtaa jä-tevesien käsittelyyn.

Jätevesilietteen kuljetuksista ja varastoinnista voi aiheutua hajuhaittoja, melua ja tärinää. Laitoksen toiminnasta voi aiheutua toiminnan luonne huomioiden normaalia melua ja tärinää.

3.6.4 Taloudellisuus ja kustannukset

Energiatalous

Lietteen erillispolttolaitoksissa harvoin voidaan tuottaa merkittävää määrää energiaa lietteen kor-kean kosteuden vuoksi (Sitra 2007). Tyypillisesti tavoitteena on pyrkiä autotermiseen polttoon, eli tilanteeseen, jossa lietteen lämpöarvo riittää palamisprosessin sekä termisen kuivauksen lämmön-tarpeeseen ilman apupolttoaineen käyttöä.

Lietteen autotermisen erillispoltto vaatii lietteeltä vähintään 3,5 MJ/kg tehollista lämpöarvoa, ja tyy-pillisesti polttoon syötettävän lietteen lämpöarvo on noin 4,8 – 6,5 MJ/kg. Riittävä lämpöarvo saa-vutetaan yleensä, kun mekaanisesti kuivatun lietteen kuiva-ainepitoisuus on vähintään 35 % TS (Pöyry Switzerland 2017; Sitra 2007). Kuiva-ainepitoisuuden lisäksi orgaanisen aineen osuus kui-va-aineesta vaikuttaa lämpöarvoon. Lietteen mädätys pienentää orgaanisen aineen osuutta ja vai-kuttaa alentavasti lämpöarvoon.

Aina lietettä ei saada mekaanisella kuivauksella riittävän kuivaksi, minkä vuoksi laitoksissa varaudutaan apupolttoaineen syöttöön käynnistyksen ohella tarvittaessa myös normaalissa polttilanteessa. Apupolttoaineena käytetään yleensä jäte- tai polttoöljyä, bio- tai maakaasua tai hiiltä.

Leijupetipoltossa sähkön kulutukseksi on arvioitu n. 75 – 80 kWh / t (25 - 27 % TS) ja apupolttoaineen kulutukseksi n. 10 kWh / t (25 % TS).

Investointikustannukset

Investointikustannukset on arvioitu ns. Turn Key -hintana, ja investoinnin poisto on laskettu käyttäen korkokantana 5 % ja poistoaikana 20 vuotta.

Rovaniemen PAKU-polttolaitoksen investointikustannukseksi on arvioitu 4,3 milj. EUR (NEVE 2018). Elinkaaren aikana käsiteltäviä lietemääriä kohden (poistoaika 20 vuotta, korkokanta 5 %) laskettu kustannus on noin 30 EUR/t.

Sveitsissä toteutettujen Geneven (55 000 t/a 28 % TS) ja Zürichin (90 000 t/a 33 % TS) leijupetilaitosten investointikustannukset ovat olleet noin 30 – 50 milj. EUR. Suuren kokoluokan leijupetilaitoksen (n. 70 000 t/a 25 % TS) investointikustannuksiksi on arvioitu Suomessa n. 25 milj. EUR.

Käyttökustannukset

Käyttökustannuksissa on huomioitu käsittelyn suorat kustannukset, sisältäen energian, kemikaalit ja henkilöstökulut. Lietteiden ja lopputuotteen kuljetuskustannuksia käsittelyyn tai käsittelylaitoksesta käyttökohteeseen ei ole huomioitu, mutta jätteiden käsittelykustannukset on huomioitu. Hyödynnettävillä tuotteilla on käytetty nollahintaa.

Kokonaiskustannuksiksi leijupetipoltossa Sveitsin laitoksissa on arvioitu noin 100 – 120 EUR/t, josta noin 40 – 50 EUR muodostuu investoinnin poistosta (poistoaika 20 vuotta, korkokanta 5%) ja noin 60 - 70 EUR käyttökustannuksista.

PAKU-polton kustannuksiksi arvioidaan noin 70 – 90 EUR. Arvio perustuu julkaistuihin kustannusarvioihin ja muiden tekniikoiden käyttökustannustietojen soveltamiseen. Arviossa on huomioitu NEVE:n julkaisema arvio, jonka mukaan Rovaniemen lietteiden käsittelyn kustannukset alenevat nykyisestä käsittelytavasta (kuljetus Ouluun kompostoitavaksi) 100 000 eurolla vuodessa. On tärkeää huomioida, että PAKU-tekniikan todelliset kustannukset selviävät vasta sitten, kun laitoksen käytöstä on riittävästi kokemusta ja tietoja.

3.6.5 Tekniikan valmiusaste ja referenssit

Tekniikan valmiusaste ja kehittämistilanne

Lietteiden polttoa on tehty jo 1960-luvulta asti. Maailmalla on toiminnassa satoja täyden mittakaavan lietteidenpolttolaitoksia. Laajalti käytössä olevien tekniikoiden (leijupeti-, arina- ja pyöröuuni- ja liesitekniikat) valmiusasteeksi (TRL) arvioidaan 9 (teknologia on todistettu menestyväksi toiminnassa). PAKU-tekniikan ensimmäinen täyden mittakaavan laitos on käyttöönottoaiheessa, ja tekniikan valmiusasteeksi arvioidaan 7 (teknologia on demonstroitu aidossa toimintaympäristössä) (Taulukko 3.2).

Rovaniemen polttolaitos tulee olemaan ensimmäinen lietteiden erillispolttolaitos Suomessa. Muissa Pohjoismaissa polttoa tehdään laajasti ainoastaan Tanskassa, jossa Kööpenhaminan alueella kaikki lietteet on poltettu 90-luvun alkupuolelta lähtien (Thornberg 2018).

Referenssilaitokset

Kööpenhamina, Tanska

Kööpenhaminassa toimii kaksi polttolaitosta Avedoren ja Lynnettenin jätevedenpuhdistamoiden yhteydessä. Avedoren polttolaitoskapasiteetti on noin 13 000 t TS/a (n. 42 000 t/a TS 30%) ja Lynnettenin laitoksen n. 19 000 t TS/a (n. 65 000 t/a TS 30%). Lynnettenin laitos on ollut käytössä vuodesta 2011 asti, ja se perustuu leijupetiteknikkaan. Vanhempi Avedoren laitos käyttää moniliesiteknikkaa (multiple-hearth). Kööpenhaminan kaikki lietteet on poltettu jo yli 25 vuoden ajan, ja tuhka on varastoitu myöhempää fosforin talteenottoa varten. Kööpenhaminassa arvioidaan olevan n. 280 000 tonnin tuhkarastot, joihin sitoutuneena on noin 18 – 20 000 tonnia fosforia. (Thornberg 2018)

Zürich, Sveitsi

Zürichin lietteenpolttolaitos valmistui vuonna 2015, ja se käsittelee n. 100 000 t/a linkokuivattua lietettä (n. 30 %). Laitos käyttää leijupetiteknikkaa ja kuivaukseen levykuivaimia. Laitos on energian suhteen omavarainen pois lukien käynnistyksessä apupolttoaineena tarvittava maakaasu. Laitoksessa on pilotoitu mm. ASH DEC ja Phos4Life -fosforin talteenottotekniikoita, mutta täydessä mittakaavassa talteenottotekniikoita ei ole toteutettu. (Pöyry Switzerland 2017)

SNB Nord Brabant, Hollanti

Yksi maailman suurimpia polttolaitoksia on Nord Brabantin laitos Hollannissa, joka voi käsitellä jopa 420 000 t/a linkokuivattua lietettä. Määrä vastaa lähes 30 % Hollannin koko lietemäärästä. Laitos käyttää leijupetiteknikkaa. Liete kuivataan 23 % TS kuiva-ainepitoisuudesta 40 %:iin ennen syöttämistä polttoon. Tällä hetkellä laitoksen tuottama lietetuhka kerätään talteen. Fosforin talteenottoa esimerkiksi EcoPhos-tekniikalla on selvitetty. Laitoksen käsittelykustannus vuonna 2017 oli noin 75 EUR / t (23 % TS). (Pöyry Switzerland 2017)

NEVE, Rovaniemi (käyttöönottovaiheessa vuonna 2019)

Napapiirin Energia ja Vesi Oy:n polttolaitos Rovaniemellä tulee olemaan ensimmäinen lietteen erillispolttolaitos Suomessa. PAKU-tekniikkaan perustuvan polttolaitoksen tuhkaa on suunniteltu käytettävän lannoitteena sellaisenaan. Laitoksen kapasiteetti on 12 000 t/a linkokuivattua lietettä (n. 20 – 25 % TS). (Pekkala 2019)

3.7 POLTTO YHTEISPOLTTOLAITOKSISSA

3.7.1 Tekniikan kuvaus

Tekniikan luonne ja tavoite

Lietteen yhteispolttoa voidaan tehdä useissa erityyppisissä polttolaitoksissa yhdessä muiden polttoaineiden, jätteiden tai lietteiden kanssa. Tyypillisimmät yhteispolttosovellutukset ovat jätteenpolttolaitokset, hiili- ja ligniittivoimalaitokset, sementtiuunit ja erityisesti Suomessa metsäteollisuuden polttolaitokset. Yhteispoltossa on ensisijaisena tavoitteena lietteen hävittäminen, joskin esimerkiksi sementtiuuneissa käytettynä lietteen mineraaliainesta saadaan hyödynnettyä sementin raaka-aineena. Fosforin talteenotto ei nykytekniikoilla ole mahdollista yhteispolttolaitosten tuhkasta.

Lietettä voidaan polttaa vain kattiloissa, jotka täyttävät jätteen polton määräykset ja joiden polttoaineksi liete on ympäristöluvassa hyväksytty. Tavallisen voimalaitoksen polttoaineena käyttö aiheuttaa tarpeen muuttaa laitos jätteenpolton vaatimusten mukaiseksi. Tämä voi vaatia muutoksia mm. savukaasujen käsittelyyn, savukaasujen analysointiin ja syöttöjärjestelyihin. Lisäksi laitoksen ympäristölupaa joudutaan muuttamaan. Myös jätteenpolttolaitoksissa lietteen poltto voi vaatia muutoksen ympäristölupaan, mikäli lietettä ei ole laitoksen ympäristöluvassa hyväksyttynä polttoaineena.

Toimintaperiaate

Yhteispoltossa mekaanisesti tai termisesti kuivattua puhdistamolietettä poltetaan muun materiaalin seassa. Yleensä lietteelle tarvitaan omat vastaanotto- ja syöttöjärjestelyt. Lietteen syöttö tulee voida pysäyttää automaattisesti tarvittaessa.

Lietteen poltto yleensä heikentää polttoprosessin energiataloutta lietteen korkean kosteuspitoisuuden vuoksi. Lisäksi lietteen poltto voi aiheuttaa mm. kerrostumien muodostumista kattilan lämpöpinnoille, savukaasumäärän lisääntymistä, korroosiota, höyryntuotannon pienenemistä tai kuoren-polttokapasiteetin pienenemistä (metsäteollisuuden kattiloissa). (VTT 2001)

Tekniikat

Voimalaitokset

Lietteen yhteispolttoa voidaan toteuttaa tavanomaisissa voimalaitoksissa, jotka käyttävät polttoainenaan mm. ligniittiä, kivihiiltä, turvetta tai muuta biomassaa. Soveltuvia kattilatyyppejä ovat mm. kiertoleijupeti, kupliva leijupeti ja kivihiilipölykattila (VTT 2001).

Lietteen kuiva-ainepitoisuuden tulee muusta polttoaineesta ja polttotekniikasta riippuen olla vähintään 25 – 45 %, tietyissä tapauksissa jopa > 85% (UBA 2013). Vaadittu lietteen kuiva-ainepitoisuus riippuu muusta polttoaineesta ja lietteen suhteellisesta osuudesta polttoainevirrassa. Suhteessa pieniä määriä käytettäessä kuiva-ainepitoisuus voi olla matalampikin, mikäli polttoaineseoksen lämpöarvo on riittävä. Tyypillisesti voimalaitoksissa lietteen poltto on kannattavinta korkeintaan 5 % osuutena polttoaineesta. (Pöyry Switzerland 2017; VTT 2001)

Voimalaitoksen on täytettävä jätteenpolttolaitoksen vaatimukset, ja lietteen tulee olla hyväksytty polttoaineeksi laitoksen ympäristöluvassa. Suomessa ainoa lietettä polttava voimala on Vapo Oy:n Haapaveden voimalaitos.

Metsäteollisuuden polttolaitokset

Metsäteollisuuden kuorikattiloissa poltetaan yleisesti metsäteollisuudessa syntyviä lietteitä sekoitettuna pääpolttoaineeseen < 10 % osuutena. Metsäteollisuuden kuorikattilat ovat yleensä leijupetikattiloita, ja teknisesti puhdistamolietteen poltto on mahdollista. Metsäteollisuudessa muodostuvia lietteitä voidaan polttaa ilman, että laitosta katsotaan jätteenpolttolaitokseksi. Sen sijaan puhdistamolietteen poltto tekee toiminnasta jätteen polttoa, jolta vaaditaan tiukempia päästörajoja ja tarkempia savukaasuanalyysyjä. Lisäksi lietteen syöttö kattilaan pitää pystyä keskeyttämään, mikä vaatii lietteelle erillisiä syöttöjärjestelyitä. (VTT 2001)

Tyypillisesti metsäteollisuudessa liete sekoitetaan valmiiksi kuoreen tai muuhun polttoaineeseen. Jätteenpolttoasetuksen mukaan lietteen syöttö pitää pystyä lopettamaan, joten tämän tyyppinen järjestely ei ole mahdollinen. Jätevesilietteelle siis tarvitaan useimmiten omat syöttöjärjestelyt. (VTT 2001)

Jätevesilietettä voidaan polttaa myös soodakattiloissa. Käytännössä Suomessa on toteutettu metsäteollisuuden jätevedenpuhdistuksessa syntyvien biolietteiden polttoa soodakattilassa sekoitettuna mustalipeään hyvin pienenä osuutena, n. 0,5 – 2 % kuiva-aineesta. (Ojanen 2001, VTT 2001)

Metsäteollisuuden kattiloita on Suomessa useilla paikkakunnilla, ja ainakin kolmella paikkakunnalla (Rauma, Mänttä, Kaskinen) metsäteollisuuden ja kunnallisten jätevesien yhteiskäsittelyssä muodostuvaa lietettä poltetaan metsäteollisuuden lietteiden seassa.

Jätteenpolttolaitokset

Puhdistamolietettä voidaan polttaa yhdyskuntajätteen seassa pienehkönä osuutena. Jätteenpolttolaitoksissa lietteen suositeltava osuus polttoaineesta on enintään n. 10 - 20 % (VTT 2011, UBA 2013). 65 % kuiva-ainepitoisuuteen kuivattuna lietteen lämpöarvo on yhdyskuntajätteen suuruusluokkaa. (VTT 2001)

Lietteen syöttöjärjestelyt poikkeavat tyypillisesti muiden jätteiden syöttöjärjestelyistä, joten lietteelle tarvitaan omat syöttöjärjestelyt. Savukaasujen käsittelyn suhteen lietteen poltto jätteenpolttolaitoksissa ei yleensä aiheuta merkittäviä toimenpiteitä, koska vaatimukset ovat samat jätteen poltossa riippumatta siitä, käytetäänkö polttoaineena lietettä.

Jätteenpolttolaitoksia on tällä hetkellä Suomessa yhteensä seitsemän ja ne sijaitsevat pääosin suurten kaupunkien yhteydessä. Näistä lietettä poltetaan ainoastaan Riihimäen polttolaitoksessa.

Sementtiuunit

Lietteen poltolla voidaan korvata fossiilisen polttoaineen käyttöä ja samalla hyödyntää lietteen sisältämää mineraaliainesta sementin raaka-aineena.

Sementtiuuneissa voidaan käyttää lietettä korkeintaan noin 15 % osuutena polttoaineen energiasisällöstä (Pöyry Switzerland 2017). Prosessin syötteiden suhteita säädetään jatkuvasti halutun koostumuksen aikaansaamiseksi. Liiallinen lietteen lisääminen prosessiin voi aiheuttaa liian korkeita fosforipentoksidin (P₂O₅) ja rikkiatrioksidin (SO₃) pitoisuuksia sementissä, mikä heikentää sen kestävyyttä. Tyypillisesti käytetty lietteen määrä vaihtelee välillä 1 - 11 %. (Dhir et al 2017). Sementtiuuniin syötettäessä lietteen tulee olla hyvin kuivaa, tyypillisesti 90 – 95 % TS. (Pöyry Switzerland 2017). Sementtiuunissa poltto on lisääntynyt Saksassa voimakkaasti 2000-luvulla (UBA 2013).

Suomessa lietteen käyttöä sementin valmistuksessa on selvitetty ja sitä pidetään potentiaalisena sovelluskohteena korvaamaan fossiilista hiiltä ja sementin mineraaliraaka-aineita, erityisesti pioksidia (Finnsementti 2019).

Sementin valmistuksen ohella vastaavaa tekniikkaa käytetään myös kevytsoran (esim. Leca-sora) valmistuksessa. Kevytsora valmistetaan paisuttamalla savea korkeassa lämpötilassa pyörivässä uunissa. Suomessa kevytsoraa valmistaa mm. Kuusankoskella sijaitseva Leca-soratehdas. Termisesti kuivatun lietteen käyttöä prosessissa on pilotoitu Suomessa. Pilotin perusteella todettiin, että liete olisi soveltuvaa prosessiin, ja sillä voitaisiin korvata fossiilisen polttoaineen käyttöä prosessissa.

Syötteet ja esikäsittely

Liete voidaan syöttää polttoon polttolaitoksen tyypistä riippuen mekaanisesti (TS 25 – 35 % TS) tai termisesti osittain (35 – 50%; 60 – 85 % TS) tai kokonaan (85 – 95 % TS) kuivattuna. Mekaanisesti kuivattua lietettä voidaan polttaa pienenä osuutena muun polttoaineen seassa (Sitra 2007). Yhteispoltoissa käytetään pääosin ainoastaan mädätettyä lietettä johtuen stabiloimattoman lietteen hankalasta käsittelystä ja varastoinnista sekä hajuhaitoista (UBA 2013).

Jälkikäsittely ja varastointi

Yhteispolton tuhkat käsitellään polttolaitoksen tyypistä riippuen eri tavoin. Sementtiuuneihin syötetynä tuhka muodostuu osaksi sementtiä. Voimalaitosten polttotuhkia voidaan hyödyntää mm. asfaltin raaka-aineena tai maarakentamisessa. Jätteenpolton tuhkat sijoitetaan kaatopaikalle.

Savukaasut tulee käsitellä jätteenpolton vaatimusten mukaisesti. Lietteen korkeat typpi-, rikki- ja raskasmetallipitoisuudet lisäävät jonkin verran niiden päästöjä ja puhdistustarvetta yhteispoltoissa. (VTT 2001)

Relevantti laitoksen mittakaava

Laitoksen mittakaava riippuu saatavilla olevista polttolaitoksista. Tyypillisesti polttolaitosten mittakaava on suuri, mutta lietettä voidaan polttaa varsin pienenä osuutena koko polttoainemäärästä. Mikäli sopiva polttolaitos sijaitsee jätevedenpuhdistamon läheisyydessä, voi yhteispoltto olla mahdollista pienellekin lietemäärälle.

Kuitenkin lietteen yhteispolton aloittamiseksi usein tarvitaan mm. erillisiä syöttöjärjestelyitä tai muutoksia laitoksen ympäristölupaan mikä voi vähentää polttolaitosten halukkuutta aloittaa lietteen yhteispoltoa. Lisäksi liete on lämpöarvoltaan heikkoa ja voi joissain tapauksissa aiheuttaa haasteita laitoksen operoinnissa. Näistä syistä johtuen yhteispolton relevantti kokoluokka on tyypillisesti vähintään noin 5000 t/a (30 % TS).

3.7.2 Tuotteet ja sivutuotteet

Prosessin tuotteet

Yhteispolton pääasialliset tuotteet ovat pohja- ja lentotuhka. Jätevesilietteen käyttö hiiltä, biomassaa tai metsäteollisuuden lietteitä polttavissa kattiloissa voi lisätä muodostuvan tuhkan määrää lietteen korkean tuhkapitoisuuden vuoksi.

Yhteispolton tухkien käyttömahdollisuudet riippuvat muun polttoaineen laadusta. Voimalaitoksissa poltettua tухkaa voidaan hyödyntää esimerkiksi rakentamisen materiaalina tai sementin raaka-aineena, mutta lietettä polttavan laitoksen tухkaa ei nykyinsäädännön mukaan voida käyttää lannoitteena. Yhdyskuntajätteen polton tухkat tulee loppusijoittaa, eikä lietteen yhteispoltto jätteenpolttolaitoksessa siten mahdollista tухkan hyötykäyttöä.

Orgaaniset haitta-aineet, lääkeaineet ja muovit tuhoutuvat poltossa yli 850 °C lämpötiloissa tehokkaasti (UNEP 2004; Ortner & Hensler 1995). Lietteen yhteispoltoissa vaaditaan tätä lämpötilatasoa, sillä se katsotaan jätteen poltoksi.

Sivutuotteet ja jätteet

Sivutuotteena yhteispoltoissa syntyy savukaasujen käsittelyjätteitä ja –jätevesiä. Jos liete kuivataan termisesti ennen poltoa, poistokaasun käsittelyssä muodostuu jätevesiä.

Lietettä polttavilta laitoksilta vaaditaan yleensä jätteenpolttoasetuksen (VNa 151/2013) mukaisia savukaasun käsittely- ja analyysijärjestelyitä sekä ympäristönsuojelulain (YSL 527/2014) nojalla BAT-vaatimusten mukaisesti BREF-dokumenttien päästövaatimuksia, mikäli laitos katsotaan ns. direktiivilaitokseksi. Pienenä osuutena jätevesilietettä muun polttoaineen joukossa poltettaessa on mahdollista, että laitosta ei katsota jätteenpolttolaitokseksi. Näin on esimerkiksi Rauman metsäteollisuuden polttolaitoksessa, jossa poltetaan yhdyskuntajäteveden ja metsäteollisuuden jäteveden yhteiskäsittelyssä muodostuvaa lietettä. Perusteena on yhdyskuntajäteveden pieni (noin 3 %) osuus lietteen kuiva-aineesta.

Savukaasujen käsittelymenetelminä käytetään yleensä partikkelien poistoa kuitu-, sähkö- tai ke-raamisella suodattimella tai syklonilla, typen oksidien pelkistystä, happamien aineiden adsorptiota tai märkäpesuria ja tarvittaessa aktiivihiihiisuodatusta.

Savukaasujen käsittelyssä syntyy lentotuhkaa ja savukaasujen käsittelyjätteitä tai märkäpesutek-niikkaa käytettäessä pesurin jätevettä. Lentotuhka sijoitetaan joko tavanomaisen tai vaarallisen jätteen kaatopaikalle sen ominaisuuksista riippuen. Savukaasujen käsittelyjäte johdetaan vaaralli-sen jätteen käsittelyyn. Savukaasupesurin jätevesi yleensä esikäsitellään suolojen, raskasmetallien ja pölyn poistamiseksi ennen johtamista viemäriin. Esikäsitelyssä muodostuu raskasmetalleja si-sältävä jäännös.

Lietteiden korkean tuhkapitoisuuden vuoksi savukaasujen partikkelipitoisuus on yleensä korkea. Rikin oksidien pitoisuudet ovat samaa suuruusluokkaa ja typen oksidien pitoisuudet voivat olla kor-keita. Lietteessä on raskasmetalleja ja elohopeaa, minkä vuoksi aktiivihiihiisuodatusta voidaan tarvi-ta. Sen sijaan dioksiinit ja furaanit eivät yleensä ole ongelma lietteen poltossa. (VTT 2001)

3.7.3 Ympäristövaikutukset

Suorat ympäristövaikutukset

Lietteen yhteispolton suorat ympäristövaikutukset ovat pitkälti samankaltaisia kuin erillispolttolaitos-ten. Keskeiset ympäristövaikutukset liittyvät savukaasujen päästöihin ja käsittelyyn sekä lentotuh-kan ja jätevesien käsittelyyn sekä tuhkan hyötykäytön tai loppusijoituksen ympäristövaikutuksiin.

Mikäli liete kuivataan termisesti ennen polttoa, aiheutuu termisen kuivauksen poistokaasun käsitte-lystä suoria hajuvaikutuksia sekä jätevesien tuotantoa. Nykyisillä savukaasujen käsittelymenetel-millä savukaasujen päästöt ympäristöön saadaan alennettua jätteenpoltoasetuksen mukaisiksi.

Jätevesilietteen kuljetuksista ja varastoinnista voi aiheutua hajuhaittoja, melua ja tärinää. Laitoksen toiminnasta voi aiheutua toiminnan luonne huomioiden normaalia melua ja tärinää.

3.7.4 Taloudellisuus ja kustannukset

Energiatalous

Lietteen poltto yhdessä jätteen tai muun polttoaineen kanssa ei vaadi lietteeltä yhtä korkeaa läm-pöarvoa kuin erillispoltto. Olemassa olevissa laitoksissa on lietteen lämpöarvo tyypillisesti 2,2 – 4.8 MJ/kg välillä. (Pöyry Switzerland 2017)

Investointikustannukset

Yhteispolton etuna on, että usein voidaan hyödyntää olemassa olevien laitosten kapasiteettia, jol-loin lietteen käsittelylle kohdistuva investointikustannus on uutta erillispolttolaitosta pienempi. Tar-vittavat investoinnit riippuvat tapauksesta, eikä niitä ole tästä johtuen arvioitu.

Käyttökustannukset

Käyttökustannuksia arvioitiin toteutuneiden käsittelymaksujen pohjalta. Saksassa polton kokonais-kustannukset (porttimaksu) yhteispoltossa ovat olleet hieman alhaisemmat kuin erillispolton, mutta vaihtelevat merkittävästi eri polttotapojen välillä. Ligniittivoimaloissa polton kustannus on ollut 50 – 75 EUR/t (20 – 45 % TS), hiilivoimaloissa 75 – 130 EUR/t ja jätteenpolttolaitoksissa 80 – 100 EUR/t (20 – 45 % TS). Sementtiuuneissa polton kustannus on tyypillisesti ollut 90 – 100 EUR/t termisesti kuivattua lietettä (> 90 % TS). Linkokuivattua (30 % TS) lietetonnia kohden laskettuna polton kustannus on noin 30 – 35 EUR / t. Tämän lisäksi tulee huomioida termisen kuivauksen kustannukset. (UBA 2013)

3.7.5 Tekniikan valmiusaste ja referenssit

Tekniikan valmiusaste ja kehittämistilanne

Lietteen yhteispolttoa on tehty useiden vuosikymmenien ajan, ja se on lisääntynyt erityisesti Keski-Euroopassa 2000-luvulla. Yhteispoltto on käytössä kymmenillä laitoksilla Euroopassa. Pelkästään Saksassa oli vuonna 2012 käytössä lähes 50 yhteispolttolaitosta (UBA 2013). Teknologia on laajalti käytössä, joten sen tekninen valmiusaste (TRL) on 9 (teknologia on todistettu menestyväksi toiminnassa) (Taulukko 3.2).

Referenssilaitokset

Suomessa lietteen yhteispolttoa tehdään muutamissa polttolaitoksissa.

Vapo Oy:n Haapaveden voimala polttaa pääasiassa turvetta ja puupohjaisia jättemateriaaleja. Laitos käyttää leijupetiteknikkaa. Puhdistamolietettä voidaan polttaa ympäristöluvan mukaisesti korkeintaan 3 % polttoaineen kokonaisenergiamäärästä.

Fortumin Riihimäen jätteenpolttolaitos polttaa pieniä määriä jätevesilietettä muiden jätteiden ohessa. Laitos perustuu arinatekniikkaan. Laitoksella voidaan polttaa lietettä korkeintaan 10 % kokonaispolttoainemäärästä tai 1,2 t/h (n. 10 000 t/a). Toteutunut käsittely määrä on ollut huomattavasti maksimimäärää pienempi.

Rauman Veden jätevedet käsitellään yhdessä metsäteollisuuden jätevesien kanssa UPM:n ja Metsä Fibren jätevedenpuhdistamolla, ja tuotettu liete poltetaan muun biomassan seassa Rauman Biovoiman voimalaitoksella. Laitoksessa poltetaan yhteiskäsittelyssä muodostuvaa lietettä muiden polttoaineiden ja jättemateriaalien seassa kierto- ja kerrosleijukattiloissa. Tässä laitoksessa yhdyskuntajätevesien osuus lietteen kokonaismäärästä on arvioitu olevan vain noin 3 %, eikä ko. lietteen polttamista ole katsottu jätteen poltoksi. Laitoksessa kuitenkin poltetaan muita jättemateriaaleja kahdessa kattilassa, joita voidaan käyttää sekä tavanomaisen polton että jätteen polton tarkoituksessa. Metsäteollisuuden ja kunnallisen jäteveden yhteiskäsittelyn lietteitä poltetaan myös Mäntän ja Kaskisten metsäteollisuuskeskitymissä.

Keski-Euroopassa lietteen yhteispoltto on hyvin yleistä erityisesti maissa, joissa lainsäädäntö ohjaa vahvasti lietteen polttoon maatalouskäytön sijaan, kuten Sveitsissä ja Saksassa. Vuonna 2009 Saksassa yhteispoltolla käsiteltiin koko lietemäärästä n. 681 000 t TS eli noin 35% Saksan lietemäärästä. Valtaosa yhteispoltosta oli voimalaitoksissa polttoa (501 000 t TS) ja loput jätteenpolttolaitoksissa (95 000 t TS) sekä sementtiuuneissa (85 000 t TS) polttoa. Tällä hetkellä ollaan siirtymässä kohti erillispolttoa johtuen fosforin talteenottovaatimusten lisääntymisestä. Lisäksi hiilen poltto Euroopassa vähenee, joten mahdollisuudet yhteispolttoon hiilen kanssa vähenevät.

3.8 TEKNIKOIDEN OMINAISUUKSIEN KOOSTAMINEN JA VERTAILU

Tässä osiossa pyritään havainnollistamaan ja visualisoimaan termisistä käsittelytekniikoista työssä koottua tietoa.

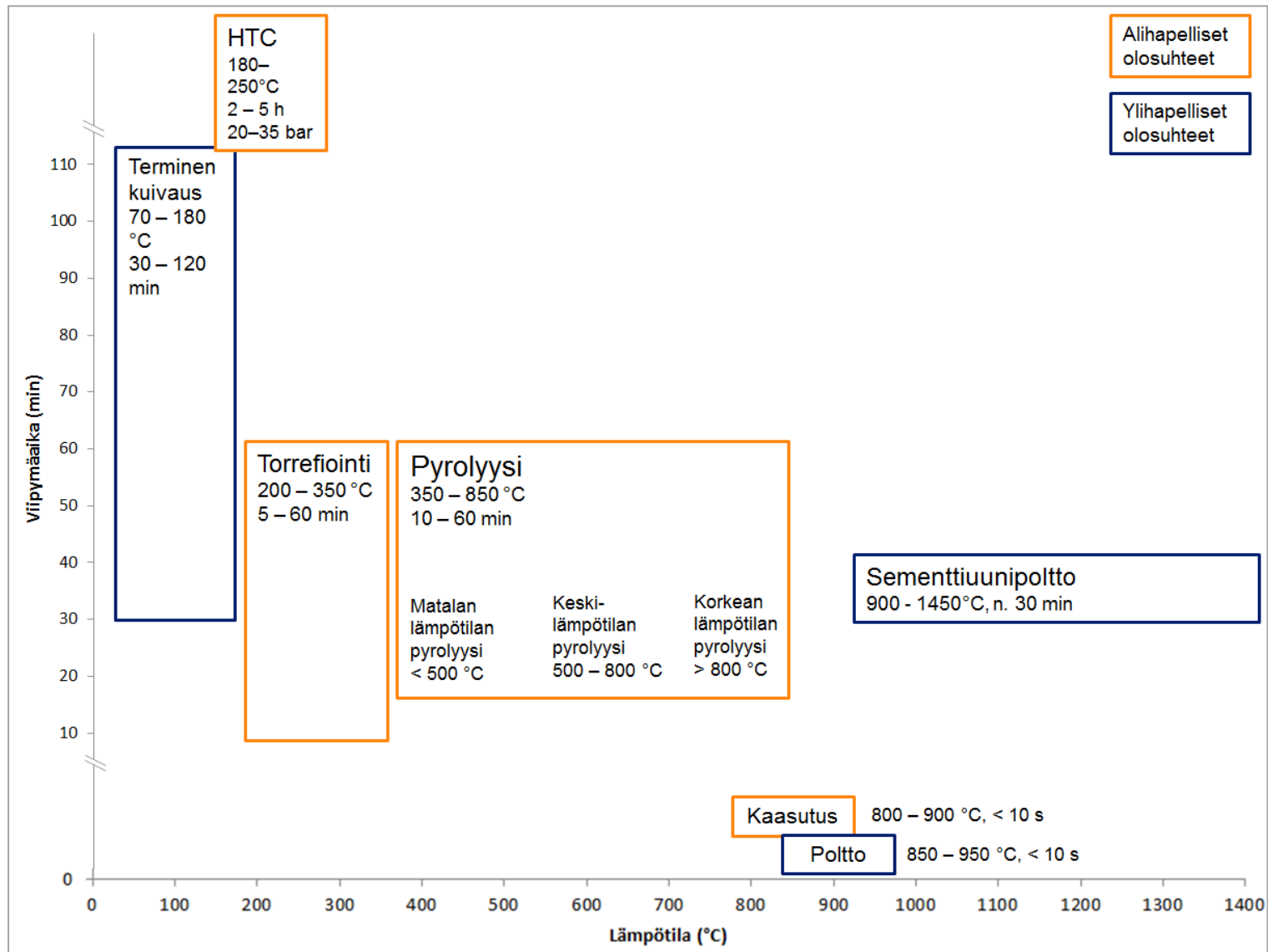
3.8.1 Lämpötila ja viipymäaika

Seuraavassa kuvassa on esitetty tekniikoiden tyypillisiä lämpötila-alueita ja viipymäaikoja lietteen käsittelyssä. Oranssilla värillä on kuvattu tekniikat, joissa hapen määrää prosessissa on rajoitettu, ja sinisellä tekniikat, joissa happea on runsaasti saatavilla.

Viipymääjalla tarkoitetaan viipymää varsinaisessa termisessä käsittelyvaiheessa. Lietteen kulkeminen koko käsittelyprosessin lävitse voi kestää huomattavasti termisen käsittelyn viipymäaika pi-

dempään. Esimerkiksi polton tapauksessa usein liete johdetaan ensin termiseen kuivaukseen, jossa viipymäaika on huomattavasti itse polttoprosessia pidempi.

Viipymääajat ovat useimmissa tekniikoissa minuuttien – kymmenien minuuttien skaalassa. Kaasutuksen ja polton osalta viipymääajat ovat vain sekunteja, joten ne asettuvat viipymäaika-asteikolla minuuttiasteikon alapuolelle. Märkähiilto taas on kestoltaan tunteja, joten se asettuu minuuttiasteikon yläpuolelle.



Kuva 3.23 Lietteen termisten käsittelymenetelmien tyypillisiä lämpötiloja ja viipymääikoja

3.8.2 Fosforin kierrätys ja haitta-aineiden poisto

Termisten käsittelymenetelmien potentiaalia fosforin kierrätykseen sekä tehokkuutta orgaanisten haitta-aineiden poistossa on kuvattu seuraavassa kuvassa (Kuva 3.24).

Fosforin kierrätys

Fosforin kierrätyksen mahdollistamisessa on keskeistä tuotteen käyttökohde. Taulukossa on oletettu, että tuotteet käytetään fosforin kierrätyksen mahdollistavassa käyttökohteessa, mikäli tuote selvästi sellaiseen soveltuu. Tästä esimerkki on mm. termisesti kuivattu liete, jolle voidaan löytää useita käyttökohteita, joista kuitenkin kaikki eivät mahdollista fosforin kierrätystä. Maanparannusainekäytössä fosforin kierrätys on mahdollista, ja ko. käyttökohde on tälle tuotteille soveltuva, joten tekniikan katsotaan mahdollistavan fosforin kierrätyksen.

Termisesti kuivatun lietteen tapaan torrefioinnin ja pyrolyysin tuotteena saatava hiili mahdollistaa maanparannusainekäytössä fosforin kierrätyksen. Torrefioinnin ja pyrolyysin osalta tulee kuitenkin huomioida, että nämä käsittelyt heikentävät entisestään metallisaostetun fosforin liukoisuutta ja käyttökelpoisuutta kasveille. Terminen kuivaus mahdollistaa fosforin kierrätyksen, mikäli kuivattu liete johdetaan esim. maanparannusaineeksi.

Märkähiillon osalta maanparannusainekäyttöä on tutkittu vähän, eikä tämän käyttökohteen toteuttavuudesta ole varmuutta. Lisäksi käsittely heikentää fosforin liukoisuutta.

Kaasutuksen ja erillispolton tuhkasta fosforin kierrättäminen vaatii fosforin talteenottokäsittelyn. Nykylainsäädäntö ei mahdollista jätevesilieteperäisen tuhkan suoraa lannoitekäyttöä.

Yhteispolton osalta fosforin kierrätys ei yleensä ole mahdollista, sillä yhteispolton tuhkan hyödyntämismahdollisuudet ovat lähinnä rakentamisessa ja teollisuudessa, eivätkä nämä yleensä mahdollista fosforin kierrätystä.

Kaikkien tekniikoiden osalta on huomioitava, että fosforin kierrätys voidaan toteuttaa myös ennen lietteen termistä käsittelyä esimerkiksi jätevedestä tai lietteestä. Tähän soveltuvia tekniikoita ovat mm. struviittisaostus (ainoastaan biologista fosforin poistoa hyödyntävillä laitoksilla) ja RAVITA-tekniikka.

Haitta-aineiden poisto

Haitta-aineilla tarkoitetaan tässä yhteydessä orgaanisia haitta-aineita (luonnossa pysyviä ja haitallisia orgaanisia yhdisteitä, kuten palonestoaineita), lääkeaineita ja mikromuoveja.

Termisen kuivauksen ei ole todettu poistavan tehokkaasti orgaanisia haitta-aineita, lääkeaineita ja mikromuoveja. Muovien termiseen hajottamiseen termisen kuivauksen lämpötilat ovat selvästi liian alhaisia (LIITE 1).

Märkähiillon tehokkuudesta haitta-aineiden poistossa saadut tutkimustulokset ovat osittain ristiriitaisia. Osa tuloksista on varsin hyviä, mutta on myös tuloksia, joiden mukaan haitta-aineiden poisto on vaatimatonta, muutamien kymmenien prosenttien luokkaa, ja lisäksi prosessissa muodostuu näistä aineista haitallisia hajoamistuotteita.

Torrefioinnin vaikutuksesta haitta-aineisiin lietteiden käsittelyssä on saatavilla hyvin vähän tietoa. Arvioidaan kuitenkin, että ainakaan muovien poistoon torrefioinnin lämpötila ei ole riittävä (LIITE 1).

Pyrolyysin vaikutuksesta haitta-aineisiin on varsin hyviä tuloksia, ja riittävän korkean lämpötilan pyrolyysillä voidaan varmistaa muovien tuhoutuminen prosessissa. Prosessissa voi kuitenkin muodostua polyaromaattisia hiilivetyjä (PAH), jotka ovat haitallisia yhdisteitä. Näiden aineiden muodostumista ja hiileen sitoutumista tulee välttää teknisin ratkaisuin. Lietteen pyrolyysihiilen PAH16-yhdisteiden summa on tutkimuksissa ollut noin 1 – 30 mg/kg k.a. EU:n uuden lannoitelainsäädännön pohjana toimivat STRUBIAS-raportin luonnosversiossa (Huygens et al. 2018) ehdotetaan pyrolyysi- ja kaasutustuotteille PAH16-yhdisteiden enimmäispitoisuudeksi 6 mg/kg k.a. Vaikka pyrolysoitu liete ei ole EU-lannoitteeksi ehdotettujen joukossa, tullaan EU-lannoitteiden raja-arvoa todennäköisesti pitämään yhtenä lähtökohtana myös arvioitaessa lietteestä pyrolyysillä valmistettuja tuotteita kansallisesti (HSY 2019). Mikäli pyrolyysiprosessissa tuotetaan hyödynnettävää öljyä, tulee huomioida öljyn mahdollisesti hyvin korkea PAH-pitoisuus.

Kaasutuksessa lämpötila on korkea, ja yli 850 °C lämpötilassa tapahtuvassa käsittelyssä orgaanisten haitta-aineiden, lääkeaineiden ja muovien poisto on tehokasta (UNEP 2004; Ortner & Hensler 1995). Alihapellisissa olosuhteissa kuitenkin PAH-yhdisteitä voi muodostua ja sitoutua tuhkaan (Bucheli et al. 2015, Hey et al. 2017). Erilaisten biomassojen kaasutuksessa on raportoitu pitoisuuksia n. 30 – 50 mg/kg k.a. suuruusluokassa (Bucheli et al. 2015).

Erillis- ja yhteispoltossa käsittely tapahtuu hapellisissa oloissa korkeissa lämpötiloissa, ja kaikki orgaaninen aines hapettuu. Myös orgaaniset haitta-aineet, lääkeaineet ja muovit tuhoutuvat tehokkaasti (UNEP 2004; Ortner & Hensler 1995)

Kaikissa termisissä käsittelymenetelmissä kiintoaineen massa vähenee, ja raskasmetallien pitoisuudet kuiva-ainejakeessa nousevat ja voivat ylittää lannoitetuotteille asetetut raja-arvot. Pitoisuudet ovat korkeita erityisesti tekniikoissa, joissa orgaanisesta aineesta häviää käsittelyssä suuri osa. Näitä tekniikkoa ovat esimerkiksi korkean lämpötilan pyrolyysi, kaasutus ja poltto.

	Terminen kuivaus	Märkähiilto (HTC)	Torrefiointi	Pyrolyysi	Kaasutus	Erillispoltto	Yhteispoltto
Fosforin kierrätys		?					
	Kyllä (käyttö maanparannus-aineena)	Vaatii jatkokäsittelyä, tekniikka uutta / vähän referenssejä.	Kyllä (käyttö maanparannus-aineena)	Kyllä (käyttö maanparannus-aineena)	Vaatii jatkokäsittelyä, tekniikoita olemassa mutta ei käytössä ja kalliita. Tuhkan käyttö sellaisenaan epävarmaa.	Vaatii jatkokäsittelyä, tekniikoita olemassa mutta kalliita ja vähän käytössä. Tuhkan käyttö sellaisenaan epävarmaa.	Ei
Haitta-aineiden poisto		?	?				
	Ei vaikuta merkittävästi org. haitta-aineisiin eikä raskasmetalleihin. Ei poista muoveja.	Orgaanisista haitta-aineista ja lääkeaineista poistuu osa; haitallisia hajoamistuotteita muodostuu. Arvioidaan, että muovien poisto on puutteellista. Raskasmetallit sitoutuvat hiileen.	Tutkimustietoa vähän; arvioidaan, että muovien ja orgaanisten haitta-aineiden poisto on puutteellista. Raskasmetallit sitoutuvat hiileen.	Valtaosa org. haitta-aineista poistuu, mutta PAH-yhdisteitä voi muodostua. Raskasmetallit sitoutuvat hiileen, elohopea poistuu valtaosin.	Poistaa tehokkaasti orgaanisia haitta-aineita, lääkeaineita ja muoveja, mutta PAH-yhdisteitä voi muodostua. Raskasmetallit säilyvät tuhkassa, mutta elohopea poistuu.	Poistaa tehokkaasti orgaanisia haitta-aineita, lääkeaineita ja muoveja. Raskasmetallit säilyvät tuhkassa, mutta elohopea poistuu.	Poistaa tehokkaasti lietteen haitta-aineita, lääkeaineita ja muoveja. Raskasmetallit säilyvät tuhkassa, mutta elohopea poistuu. Lopputuotteen käyttömahdollisuudet määrää kuitenkin yhteispolton tuhkan laatu kokonaisuutena.

Kuva 3.24 Fosforin kierrätysmahdollisuudet ja haitta-aineiden (orgaaniset haitta-aineet, lääkeaineet, mikromuovit) poisto. Haitta-aineisiin ei tässä tarkastelussa ole sisällytetty haitallisia metalleja.

Merkkien selitykset :

- + Fosforin kierrätys mahdollista / Tekniikka poistaa tehokkaasti haitta-aineita
- +? Fosforin kierrätys mahdollista, mutta vaatii erityistä tekniikkaa / Tekniikka poistaa haitta-aineita, mutta uusien haitallisten aineiden muodostuminen on mahdollista
- ? Fosforin kierrätyksestä ei ole riittävästi tietoa tai käyttökohdetta ei tunneta hyvin / Haitta-aineiden poistosta ei ole riittävästi yhtäpitävää tietoa tai poisto on osittain puutteellista
- ☒ Fosforin kierrätys ei mahdollista / Haitta-aineet eivät poistu tehokkaasti

3.8.3 Laitosten mittakaava

Eri tekniikoiden relevanttia mittakaavaa arvioitiin kahdella tasolla: teknisen toteutettavuuden ja taloudellisuus huomioiden järkevän mittakaavan näkökulmista. Teknisellä toteutettavuudella tarkoitetaan markkinoilla saatavilla olevia tai toteutettuja prosesseja. Arviot perustuvat toteutettujen laitosten kokoluokkaan ja Keski-Euroopasta saatuihin kokemuksiin sekä kustannusarvioihin.

Terminen kuivaus on mahdollista toteuttaa varsin pienessäkin mittakaavassa, ja sen taloudellisuuteen vaikuttaa keskeisesti saatavilla olevan energian hinta. Keski-Euroopassa terminen kuivaus on todettu kannattavaksi yleensä vain muiden termisten käsittelymenetelmien esikäsittelynä (Pöyry Switzerland 2017).

Märkähiilto eli HTC-käsittely voidaan toteuttaa suhteellisen pienessäkin mittakaavassa, mutta aivan pienessä kokoluokassa tekniikkaa ei ole toteutettu. Taloudellisesti kannattavan laituskoon arvioidaan olevan keskisuuresta laitoskoosta ylöspäin. Tekniikan toteuttamista laitospäätöksistä puoltaa se, että syöte prosessiin on suhteellisen määrittä.

Torrefiointi ja pyrolyysi ovat mahdollisia toteuttaa pienessäkin mittakaavassa, mutta varsin monimutkaisen laitoskokonaisuuden ja energiatalouden vuoksi relevantti kokoluokka on keskisuuresta laitoskoosta ylöspäin.

Kaasutuslaitoksista osa on toteutettu suhteellisen pienessä kokoluokassa, mutta kustannuslaskelmien perusteella näyttää siltä, että laituskoon olisi syytä olla suhteellisen suuri, jotta teknisesti monimutkainen laitosratkaisu olisi taloudellisesti kannattava. Arvioidaan, että kaasutuslaitosten järkevä mittakaava asettuu leijupetipolton tapaan suureen kokoluokkaan.

Erillispolton relevantti mittakaava riippuu pitkälti käsittelytekniikasta. Leijupetitekniikkaa käyttävät laitokset vaativat suuren laituskoon, jotta laitos on taloudellisesti kannattava. PAKU- tekniikalla ja arinatekniikalla polttolaitos voidaan toteuttaa pienemmässä mittakaavassa; näillä tekniikoilla pienin järkevä laitoskoko on suuruusluokkaa 10 000 t/a (30 % TS)

Yhteispoltto voidaan toteuttaa olemassa olevissa polttolaitoksissa periaatteessa pienellekin lietemäärälle, mutta käytännössä erityisjärjestelyiden tekeminen lietteen syöttöä varten ja mahdolliset muutokset ympäristölupa tai savukaasujen käsittelyjärjestelmiin on järkevää toteuttaa vain suurerehkolle lietemäärälle. Tämä on kuitenkin hyvin tapauskohtaista, ja riippuu mm. siitä, sallii laitoksen ympäristölupa lietteen polton ja vaaditaanko lietteen syötölle erityisjärjestelyitä.

Mahdollinen Järkevä	Pienet laitokset				Keskisuuret laitokset	Suuret laitokset	
Terminen kuivaus							
Märkähiilto (HTC)							
Torrefiointi							
Pyrolyysi							
Kaasutus							
Erillispoltto*							
Yhteispoltto							
Lietemäärä, t TS / a	200	500	1 000	2 000	5 000	10 000	30 000
Lietemäärä, t / a (30 % TS)	700	1700	3300	6700	17000	33000	100000
AVL	6 000	15 000	30 000	60 000	150 000	300 000	900 000

Kuva 3.25 Termisten käsittelytekniikoiden teknisesti mahdollinen ja taloudellisuus huomioiden järkevä laitosmittakaava.

* Laitosmittakaava riippuu polttotekniikasta

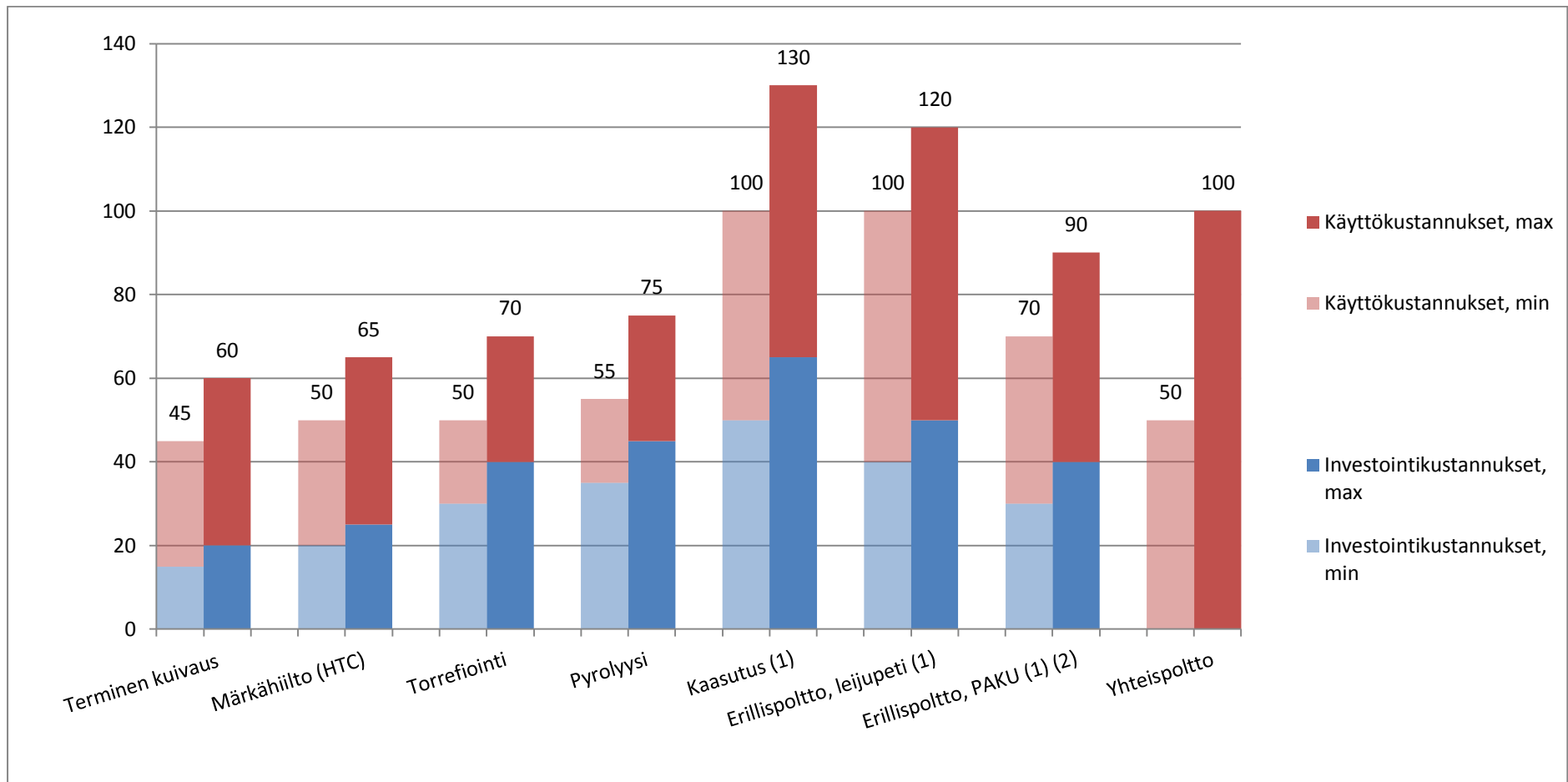
3.8.4 Kustannukset

Tekniikoille tehtiin suuntaa antavat kustannusarviot, joissa huomioitiin sekä investointi- että käyttö-kustannukset. Arviot on tehty perustuen toteutettujen laitosten kustannuksiin sekä kustannusarvi-oihin Suomesta ja muualta Euroopasta. Lähtökohtana on käytetty kullekin tekniikalle soveltuvaa laitosmittakaavaa. Arvioissa ei ole voitu huomioida tietyn laitospöytäkustannuksiin vaikuttavia tekijöitä, kuten maarakentamisen kustannuksia, tarvittavaa infrastruktuuria tai tarkkoja käyttökus-tannusten yksikköhintoja, joten arvioita tulee pitää suuntaa antavina. Tietyn laitospöytäkustannukset tulee aina arvioida tapauskohtaisesti.

Investointikustannukset on arvioitu ns. Turn Key -hintana, ja investoinnin poisto on laskettu käyttä-en korkokantana 5 % ja poistoaikana 20 vuotta. Käyttökustannuksissa on huomioitu käsittelyn suo-rat kustannukset, sisältäen energian, kemikaalit ja henkilöstökulut. Lietteiden ja lopputuotteen kulje-tuskustannuksia käsittelyyn tai käsittelylaitoksesta käyttökohteeseen ei ole huomioitu, mutta jätteiden käsittelykustannukset on huomioitu. Hyödynnettäville tuotteille on käytetty nollahintaa, ts. laitos pääsee lopputuotteista eroon ilman kuluja, mutta ei saa tuotteista tuloja.

Kustannuslaskennan lähtökohtana on käytetty mädätettyä, mekaanisesti kuivattua lietettä. Lietteiden mekaanisen kuivauksen, mädätyksen tai muun esikäsittelyn kustannuksia ei ole huomioitu.

Yhteispolton tapauksessa on oletettu, että uusia investointeja ei tarvita, vaan liete voidaan syöttää olemassa olevaan polttolaitokseen nykyisillä järjestelyillä. Käytännössä investointeja voidaan lai-toksesta riippuen kuitenkin tarvita.



Kuva 3.26 Arvio tekniikoiden kustannuksista. Minimi- ja maksimipylväillä kuvataan arvioitua vaihteluväliä kustannuksille.

(1) Mahdollista fosforin talteenottokäsittelyä ei ole huomioitu

(2) Suuntaa antava arvio

3.8.5 Tekniikoiden valmiusaste ja referenssit

Tarkastelluissa tekniikoissa on sekä koeteltuja ja laajasti käytössä olevia tekniikoita että uusia, vielä kehitys-/demonstrointivaiheessa olevia tekniikoita. Seuraavassa kuvassa (Kuva 3.27) on esitetty tekniikoiden arvioitu valmiusaste (TRL, engl. Technology Readiness Level) sekä referenssilaitosten lukumäärä maailmanlaajuisesti. Arviot kuvaavat tilannetta hankkeen toteutuksen aikana eli keväällä 2019.

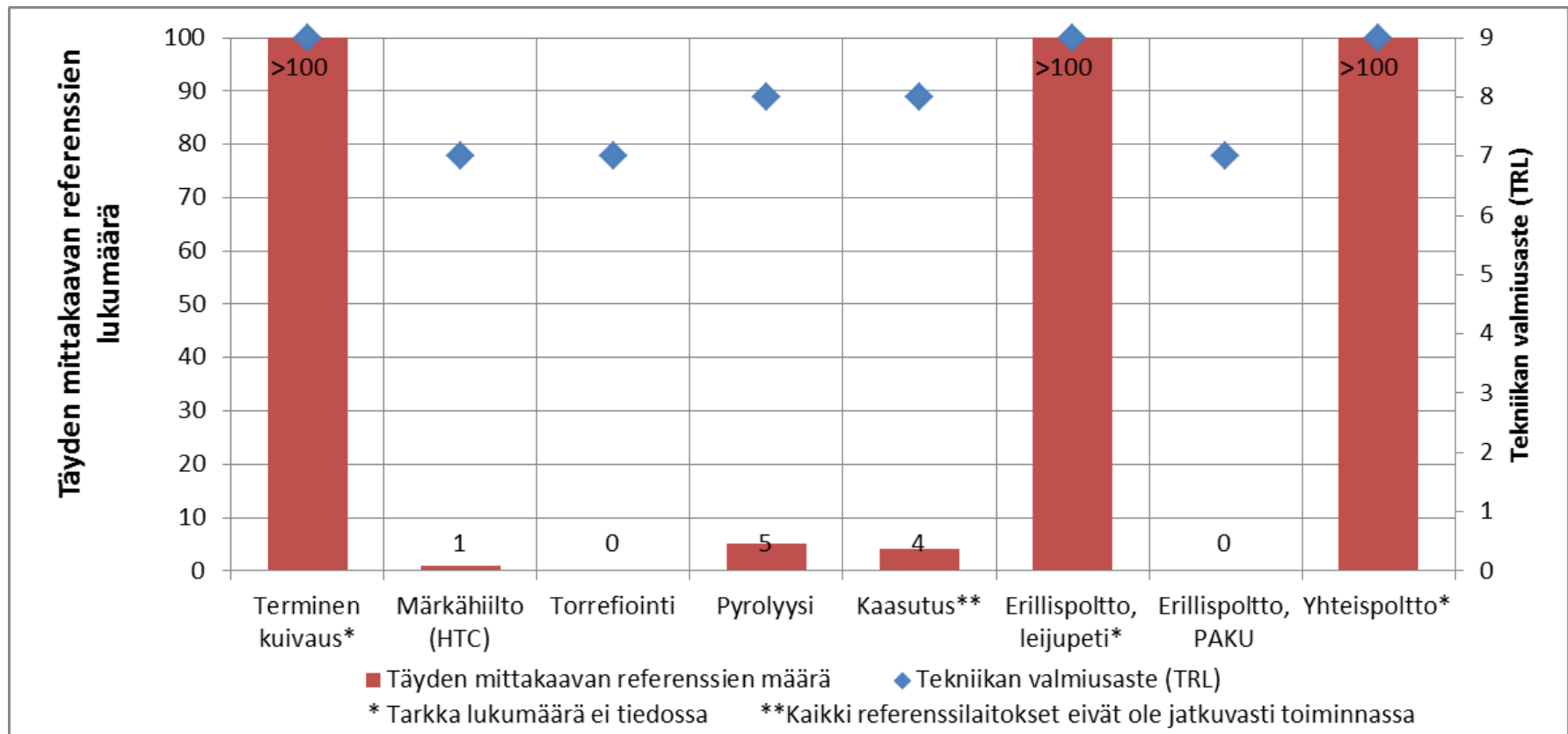
TRL-luku kuvaa tekniikan kehittyneisyyttä teknisestä näkökulmasta, eikä se huomioi esimerkiksi sitä, onko tekniikalle olemassa todellista kysyntää markkinoilla. TRL-luku on erityisen käyttökelpoinen kehitysasteella olevien tekniikoiden arviointiin. Sen sijaan vakiintuneessa käytössä olevien tekniikoiden menestyksekkyyttä asteikko ei kuvaa. Näiden tekniikoiden arvioinnissa referenssilaitosten määrä antaa paremman kuvan tekniikan menestyksekkyydestä.

Termisen kuivauksen, leijupetipolton sekä yhteispolton osalta tarkkoja lukumääriä ei ole tiedossa, koska nämä tekniikat ovat yleisesti käytössä, ja laitosten lukumäärän selvittäminen on käytännössä mahdotonta. Laitosten lukumäärä voi ylittää esitetyn sadan laitoksen rajan huomattavastikin.

Teknisen valmiusasteen (TRL) määritelmät on esitetty seuraavassa taulukossa.

Taulukko 3.2 Tekniikan valmiusaste (TRL) Euroopan komission määritelmän mukaan. (Earto 2014)

TRL	Kuvaus
1	Perusperiaatteet tunnetaan
2	Teknologian konseptin muotoileminen
3	Konseptin kokeellinen varmistaminen
4	Teknologian validointi laboratoriossa
5	Teknologian validointi relevantissa ympäristössä
6	Teknologian demostrointi relevantissa ympäristössä
7	Teknologian demostrointi aidossa toimintaympäristössä
8	Teknologia/järjestelmä on täydellinen ja todettu toimivaksi
9	Teknologia on todistettu menestyväksi toiminnassa



Kuva 3.27 Tekniikoiden referenssien lukumäärä ja tekninen valmiusaste (TRL) kevään 2019 tilanteessa. Tekniikoiden valmiusaste on arvioitu tekniikoiden käytölle puhdistamolietteen käsittelyssä. TRL-luvun tulkinnassa tulee huomata, että luku huomioi ainoastaan teknisen näkökulman, ei esimerkiksi markkinoiden kysyntää.

TRL-luvun määritelmät (Earto 2014):

TRL 7: Teknologian demostrointi aidossa toimintaympäristössä

TRL 8: Teknologia/järjestelmä on täydellinen ja todettu toimivaksi

TRL 9: Teknologia on todistettu menestyväksi toiminnassa

3.9 TEKNIKKAKOHTAISET KOOSTETAULUKOT

Tässä kappaleessa esitetään yhteenvetotaulukot tarkastelluista tekniikoista. Tarkemmat kuvaukset tekniikoista on esitetty edellä kappaleissa 3.1 - 3.7.

Taulukko 3.3 Yhteenveto tarkastelluista käsittelymenetelmistä

	Terminen kuivaus	Märkähiilto (HTC)	Torrefiointi	Pyrolyysi
Tekniikan tavoite				
	Massan pienentäminen, käsiteltävyyden parantaminen, lämpöarvon kasvattaminen, stabilointi ja hygienesointi, esikäsittely muille termisille menetelmille	Lämpöarvon kasvattaminen, polton esikäsittely	Massan pienentäminen, käsiteltävyyden parantaminen, lämpöarvon kasvattaminen, polton esikäsittely, hiilimäisen maanparannusaineen tuotto tuotanto. Energian tuotanto kaasuista.	Pyrolyysihiilen tuottaminen maanparannusaineeksi, polttoaineeksi tai muuhun käyttöön biohiilen tapaan, polttoaine. Energian tuotanto pyrolyysikaasuista ja -höyryistä. (Pyrolyysöljyn tuotto polttoaineeksi.)
Syötteen ja tuotteiden				
Syötteen	Linkokuivattu liete, n. 15 - 40 % TS	Märkä liete, 8 - 15 % TS	Termisesti kuivattu liete, n. 75 - 95 % TS	Termisesti kuivattu liete, n. 80 - 95 % TS, (puu tai muu biomassa)
Tuotteet	Kuivattu liete, lieterae tai -pelletti 60 - 95 % TS	Kuivattu hiilifraktio	Torrefioitu liete, öljyt ja kaasut (öljy ja kaasut yleensä poltetaan prosessissa).	Pyrolyysihiili, -öljy ja -kaasut (öljy ja kaasut yleensä poltetaan prosessissa).
Tuotteiden hyödyntäminen	Maanparannusaine, polttoaine, jatkokäsittely muilla termisillä menetelmillä	Polttoaine	Polttoaine, maanparannusaine	Maanparannusaine, polttoaine, kompostoinnin lisäaine, (maanrakennuksen materiaali, suodatin-materiaali)
Haitta-aineiden poisto	Ei vaikuta merkittävästi org. haitta-aineisiin eikä raskasmetalleihin. Ei poista muoveja.	Orgaanisista haitta-aineista ja lääkeaineista poistuu vain osa; haitallisia hajoamistuotteita muodostuu. Arvioidaan, että muovien poisto on puutteellista. Raskasmetallit sitoutuvat hiileen.	Tutkimustietoa vähän; arvioidaan, että muovien ja orgaanisten haitta-aineiden poisto on puutteellista. Raskasmetallit sitoutuvat hiileen.	Valtaosa org. haitta-aineista poistuu, mutta PAH-yhdisteitä voi muodostua. Raskasmetallit sitoutuvat hiileen, elohopea poistuu valtaosin.

Sivutuotteet ja jätteet	Poistoilman käsittelyssä muodostuvat typpipitoiset nesteet ja jätevedet (lauhdevesi)	Kuivauksen rejektivesi (nestefraktio), kaasufraktio ja sen käsittelyssä muodostuvat jätevedet	Termisen kuivauksen poistoilman käsittelyssä muodostuvat typpipitoiset nesteet ja jätevedet, polton lentotuhka ja savukaasupesurin jätevesi	Termisen kuivauksen poistoilman käsittelyssä muodostuvat typpipitoiset nesteet ja jätevedet, kaasun polton lentotuhka ja savukaasupesurin jätevesi
Käsittely tai hyödyntäminen	Typpinesteen lannoitekäyttö tai johtaminen viemäriin, lauhdeveden johtaminen viemäriin	Laimennuksesta ylijäävän rejektiveden johtaminen viemäriin, kaasufraktion käsittely (lauhdutus, pesuri), jätevesien johtaminen viemäriin	Typpinesteen lannoitekäyttö tai johtaminen viemäriin, lauhdeveden johtaminen viemäriin, lentotuhkan loppusijoitus, savukaasupesun jäteveden johtaminen viemäriin	Typpinesteen lannoitekäyttö tai johtaminen viemäriin, lauhdeveden johtaminen viemäriin, lentotuhkan loppusijoitus, savukaasupesun jäteveden johtaminen viemäriin
Fosforin kierrätys	Kyllä (maanparannusainekäyttö) / Ei (jatkokäsittely esim. yhteispoltolla)	Vaatii jatkokäsittelyä, tekniikka uutta / vähän referenssejä (pH:n säätö, talteenotto rejektivedestä). Saanto 60 - 80 %	Kyllä (käyttö maanparannusaineena) / Ei (jatkokäsittely esim yhteispoltolla)	Kyllä (käyttö maanparannusaineena) / Ei (jatkokäsittely esim yhteispoltolla)
Fosforin liukoisuus ja käyttökelpoisuus kasveille	Heikentää fosforin lannoitusarvoa (Lemming et al. 2017)	Heikentää fosforin lannoitusarvoa (Ylivainio et al. 2019)	Heikentää fosforin lannoitusarvoa (Ylivainio et al. 2019)	Heikentää fosforin lannoitusarvoa (Luke 2018)
Prosessiketju				
Syötteen esikäsittely	Mekaaninen kuivaus	Laimennus (tarvittaessa)	Terminen kuivaus	Terminen kuivaus
Pääprosessi	Tyypillisesti rumpu-, kiekko- tai nauhakuivain	HTC-reaktori	Pyöröuuni- tai ruuvireaktori, panosreaktori	Pyöröuuni- tai ruuvireaktori, panosreaktori
Lämpötila	70 - 180 °C	180 - 250 °C	200 - 350 °C	350 – 700 °C
Paine	Ympäristön ilmanpaine	20 - 35 bar	Ympäristön ilmanpaine	Ympäristön ilmanpaine
Viipymäaika	n. 30 - 120 min	n. 2 - 5 h	Terminen kuivaus 30 -120 min; Torrefiointi 5 - 60 min	Terminen kuivaus 30 -120 min; Pyrolyysi 10 - 60 min

Jälkikäsitely	Jäähdytys, mahdollinen ra- keistus/pelletöinti, varas- tointi huomioiden kosteuden sitoutuminen ja itsesyty- vyysriski	Mekaaninen kuivaus	Jäähdytys, kostutus, mahdol- linen pelletöinti tai brike- töinti	Jäähdytys, kostutus
Laitoksen relevantti mittakaava				
	> 10000 t/a (30 % TS)	> 10000 t/a (30 % TS) (Vastaa 30000 t/a (10 % TS))	> 15000 t/a (30 % TS)	> 15000 t/a (30 % TS)
Energiatalous				
Ulkopuolisen energian tarve	Lämpö: 500 – 700 kWh / t lietettä (30 % TS -> 90 % TS) Sähkö: 20 – 50 kWh / t lietet- tä (30 % TS -> 90 % TS)	Lämpö: n. 50 - 150 kWh / t lietettä (30 % TS) Sähkö: n. 10 - 30 kWh/ t lietettä (30 % TS)	Lämpö: n. 50 - 100 kWh / t; sähkö n. 60 - 90 kWh / t lie- tettä (30 % TS); (Huom. lisäk- si kuivauksen energiantarve)	Lämpö: 70 - 150 kWh / t lietettä (30 % TS) Sähkö: n. 60 - 90 kWh / t lietettä (30 % TS) (Huom. lisäksi kuivauk- sen energiantarve)
Energianlähde	Esim. biokaasu, lietteen polt- tolaitos, voimalaitos, kauko- lämpö, jätelämpö	HTC-käsittelyn hiilifraktion poltto, muu polttolaitos, korkean lämpötilan jäteläm- pö	Prosessikaasujen poltto, biomassa sekoitettuna liet- teeseen, muu polttolaitos	Pyrolyysiöljyjen ja -kaasujen poltto, biomassa sekoitettu- na lietteeseen, muu poltto- laitos
Ympäristövaikutukset				
Merkittävimmät suorat ympäristövaikutukset	Termisen kuivauksen haju- päästöt, pöly, jätevedet	Typpipitoinen rejektivesi	Termisen kuivauksen haju- päästöt, savukaasupäästöt ja käsittelyjätteet, pöly	Termisen kuivauksen haju- päästöt, savukaasupäästöt ja käsittelyjätteet, pöly
Kustannukset				
Investointikustannukset	n. 15 - 20 EUR / t (30 % TS)	n. 20 - 25 EUR / t (30 % TS)	n. 30 - 40 EUR / t (30 % TS)	n. 35 - 45 EUR / t (30 % TS)
Käyttökustannukset	n. 30 - 40 EUR/t (30 % TS)	n. 30 - 40 EUR / t (30 % TS)	n. 20 - 30 EUR / t (30 % TS)	n. 20 - 30 EUR / t (30 % TS)
Kokonaiskustannukset	n. 45 - 60 EUR/t (30 % TS)	n. 50 - 65 EUR/t (30 % TS)	n. 50 - 70 EUR/ t (30 % TS)	n. 55 - 75 EUR/ t (30 % TS)
Tekniikan valmiusaste				
TRL	9	7	Lietteen torrefiointi 7, tekniikka yleisesti 8	Lietteen pyrolysointi 8, tekniikka yleisesti 9

Referenssit	Maailmanlaajuisesti kymmeniä laitoksia, Suomessa kolme täyden mittakaavan laitosta	Yksi kaupallisen mittakaavan lietettä käsittelevä laitos. Muutamia täyden mittakaavan demonstrointilaitoksia, joista osassa käsitelty myös lietettä.	Lietteelle ei täyden mittakaavan referenssejä; vain muutamia pilot-laitoksia. Biomassaa käsitteleviä täyden mittakaavan laitoksia maailmanlaajuisesti noin viisi; pilot-laitoksia useita	Lietteen käsittelyssä maailmanlaajuisesti < 5 täyden mittakaavan käytössä olevaa laitosta. Muun jätteen käsittelyssä useita laitoksia. Lietettä käsittelevät suuren mittakaavan laitokset tuottavat polttoainetta; vain yksi pienempi laitos, jossa maanparannusainetta tuotetaan.
Kehitysnäkymät	Kehitystyö keskittyy olemassa olevan tekniikan kehittämiseen mm. energiatehokkuuden osalta	Tutkimus ja kehitys on aktiivista.	Kehitys ei ole aktiivista; lietteen pyrolyysiä kehitetään selvästi torrefiointia enemmän	Tutkimus ja kehitys on aktiivista. Laitetoimittajat kehittävät laitteistojaan sopiviksi erityisesti lietteen pyrolysointiin.

	Kaasutus	Erillispoltto	Yhteispoltto
Tekniikan tavoite			
	Energian tuottaminen, lietteen määrän pienentäminen, hyödynnettävän hiilipitoisen tuhkan tuottaminen	Massan vähentäminen, mikrobien ja haitta-aineiden tuhoaminen, energian tuotanto, fosforin talteenottoon tai suoraan lannoitekäyttöön sopivan tuhkan valmistus	Lietteen hävittäminen, energian hyödyntäminen, inertin materiaalin hyödyntäminen
Syötteet ja tuotteet			
Syötteet	Termisesti kuivattu liete, n. 75 - 95 % TS	Termisesti kuivattu liete, n. 40 - 50 % TS tai 60 - 95 % TS	Mekaanisesti kuivattu liete n. 20 - 30 % TS pienenä osuutena; Termisesti kuivattu liete, n. 40 - 50 % TS tai 60 - 95 % TS
Tuotteet	Tuotekaasu, tuhka	Pohjatuhka	Tuhka
Tuotteiden hyödyntäminen	Asfaltin, sementin tai tiilien raaka-aine, maarakentaminen, lannoite fosforin talteenoton jälkeen (tai sellaisenaan)	Asfaltin, sementin tai tiilien raaka-aine, maarakentaminen, lannoite fosforin talteenoton jälkeen (tai sellaisenaan), loppusijoitus	Fosforia ei voida kierrättää. Tyypistä riippuen hyödyntäminen osana sementtiä, asfaltin raaka-aineena, maarakentamisessa tai sijoittaminen kaatopaikalle
Haitta-aineiden poisto	Poistaa tehokkaasti orgaanisia haitta-aineita, lääkeaineita ja muoveja, mutta PAH-yhdisteitä voi muodostua. Raskasmetallit säilyvät tuhkassa, mutta elohopea poistuu.	Poistaa tehokkaasti orgaanisia haitta-aineita, lääkeaineita ja muoveja. Raskasmetallit säilyvät tuhkassa, mutta elohopea poistuu.	Poistaa tehokkaasti lietteen haitta-aineita, lääkeaineita ja muoveja. Raskasmetallit säilyvät tuhkassa, mutta elohopea poistuu. Lopputuotteen käyttömahdollisuudet määrää kuitenkin yhteispolton tuhkan laatu kokonaisuutena.
Sivutuotteet ja jätteet	Termisen kuivauksen lauhde, polton lentotuhka, savukaasujen käsittelyn jätteet/jätevedet	Termisen kuivauksen lauhde, polton lentotuhka, savukaasujen käsittelyn jätteet/jätevedet	Termisen kuivauksen lauhde, polton lentotuhka, savukaasujen käsittelyn jätteet/jätevedet

Käsittely tai hyödyntäminen	Lauhdevedet viemäriin tai erilliskäsittelyyn; lentotuhka hyötykäyttöön tai tavanomaisen jätteen kaatopaikalle; savukaasujen käsittelyjätteet vaarallisen jätteen kaatopaikalle;	Lauhdevedet viemäriin tai erilliskäsittelyyn; lentotuhka hyötykäyttöön tai tavanomaisen jätteen kaatopaikalle; savukaasujen käsittelyjätteet vaarallisen jätteen kaatopaikalle;	Lauhdevedet viemäriin tai erilliskäsittelyyn; lentotuhka hyötykäyttöön tai tavanomaisen jätteen kaatopaikalle; savukaasujen käsittelyjätteet vaarallisen jätteen kaatopaikalle;
Fosforin kierrätys	Vaatii jatkokäsittelyä, tekniikoita olemassa mutta kalliita ja vähän käytössä olevaa tekniikkaa. Suora lannoitekäyttö epävarmaa.	Vaatii jatkokäsittelyä, tekniikoita olemassa mutta kalliita ja vähän käytössä olevaa tekniikkaa. Suora lannoitekäyttö epävarmaa.	Ei
Fosforin liukoisuus ja käyttökelpoisuus kasveille	Ei kattavaa tietoa; todennäköisesti vastaava kuin poltossa	Heikentää fosforin lannoitusarvoa (Lutke 2018)	Ei tiedossa (ei relevantti)
Prosessiketju			
Syötteen esikäsittely	Terminen kuivaus (> 85 %)	Terminen kuivaus (> 45 %)	Mädätys ja yleensä terminen kuivaus
Pääprosessi	Kiinteäpeti, leijupeti tai pölykaasutus	Leijupetikattila, arinakattila, pyöröuuni, kiinteä- ja moniliesiuuni	Voimalaitoskattila (leijupeti, kivihiilipöly); metsäteollisuuden kattila (leijupeti, soodakattila), Jätteenpolttolaitos, Sementtiuuni
Lämpötila	800 - 900 °C	850 - 950 °C	850 - 950 °C (voimalaitos, jätteenpolto); 900 - 1450 °C (sementtiuuni)
Paine	Ympäristön ilmanpaine	Ympäristön ilmanpaine	Ympäristön ilmanpaine
Viipymäaika	Terminen kuivaus 30 -120 min; Kaasutus: sekunteja	Terminen kuivaus 30 -120 min; Poltto: > 2 s	Terminen kuivaus 30 -120 min; Poltto: > 2 s , sementtiuuni n. 30 min
Jälkikäsittely	Tuhkan mahdollinen fosforin talteenottokäsittely	Mahdollinen fosforin talteenottokäsittely	
Laitoksen relevantti mit-takaava			

	> 30 000 t/a (30 % TS)	PAKU-tekniikka > 10000 t/a (30 % TS); Leijupeti > 40000 t/a (30 % TS)	Polttolaitoksesta riippuen mahdollista jo < 5000 t/a (30 % TS), yleensä > 5000 t/a (30 % TS)
Energiatalous			
Ulkopuolisen energian tarve	Sähkö: n. 100 - 150 kWh/ t lietettä (30 % TS)	Apupolttoaine n. 10 kWh / t lietettä (30 % TS) Sähkö: 75 - 80 kWh / t lietet- tä (30 % TS)	Energiantarve katetaan prosessiin syö- tettävällä polttoaineella. Lietteen vai- kutuksen energiatalouteen voi olla hieman positiivinen tai negatiivinen riippuen kuiva-aine- ja tuhkapitoisuuksista.
Energianlähde	Tuotekaasun poltto	Lietteen poltto, apupolttoaine (esim. maa- tai biokaasu, öljy)	Lietteen ja muut polttoaineen poltto.
Ympäristövaikutukset			
Merkittävimmät suorat ympäristövaikutukset	Termisen kuivauksen hajupäästöt, sa- vukaasupäästöt ja käsittelyjätteet	Termisen kuivauksen hajupäästöt, sa- vukaasupäästöt ja käsittelyjätteet	Termisen kuivauksen hajupäästöt, sa- vukaasupäästöt ja käsittelyjätteet, loppusijoitettava jäte
Kustannukset			
Investointikustannukset	n. 50 - 65 EUR/t (30% TS)	n. 40 - 50 EUR / t (30 % TS)	
Käyttökustannukset	n. 50 - 65 EUR/t (30% TS)	n.60 - 70 EUR / t (30 % TS)	
Kokonaiskustannukset	n. 100 - 130 EUR/ t (30 % TS)	n. 100 - 120 EUR/ t (30 % TS)	n. 50 - 100 t (30 % TS)
Tekniikan valmiusaste			
TRL	Lietteen kaasutus 8, tekniikka yleisesti 9	Leijupeti-, arina- ja pyöröuuni- ja liesi- tekniikat 9; PAKU-tekniikka 7	9
Referenssit	Maailmanlaajuisesti < 5 täyden mitta- kaavan käytössä olevaa laitosta.	Maailmanlaajuisesti kymmeniä täyden mittakaavan laitoksia leijupeti-, arina- ja pyöröuuni- ja liesiteknikoilla. PAKU- tekniikan ensimmäinen referenssi on Rovaniemen laitos, joka ei vielä ole käytössä.	Keski-Euroopassa lietteen yhteispoltto on yleistä, mutta suuntaus on kohti erillispolttoa. Suomessa yhteispolttoa tehdään muutamissa metsä- teollisuuden ja jätteenpolttolaitoksissa

Kehitysnäkymät	Tekniikkaa kehitetään ja markkinoidaan aktiivisesti, mutta markkinat vielä pieniä. Kilpailee polton kanssa.	Olemassa olevia polttotekniikoita kehitetään edelleen, mutta suuria kehitysaskeleita ei ole odotettavissa. PAKU-tekniikka on potentiaalinen pienen mittakaavan tekniikka. Fosforin talteenottotekniikoiden kehitys on voimakasta, mutta on epäselvää, voidaanko fosforin talteenotto toteuttaa taloudellisesti	Viime vuosina on siirrytty kohti erillispolttua johtuen fosforin talteenottovaatimusten lisääntymisestä
----------------	---	--	---

3.10 UUDET TEKNIIKAT

Tässä selvityksessä tarkasteltujen tekniikoiden lisäksi on kehitteillä useita lietteen termisen käsittelyn tekniikoita. Näitä ovat muun muassa terminen hydrolyysi (Thermal Hydrolysis, THP), hydrotermiinen nesteytys (Hydrothermal Liquefaction HTL) ja superkriittinen vesikaasutus (Supercritical Water Gasification SCGW). Termistä hydrolyysiä lukuun ottamatta nämä tekniikat ovat tällä hetkellä (vuonna 2019) vielä kehitysasteella, ja niiden tekninen valmiusaste on tässä selvityksessä tarkasteltuja tekniikoita alhaisempi.

3.10.1 Terminen hydrolyysi (THP)

Terminen hydrolyysi (Thermal Hydrolysis Process, THP) tarkoittaa biomassan käsittelyä n. 130 - 170 °C:ssa ja 0,6 – 0,8 MPa paineessa. Tyypillisesti THP-käsittelyä käytetään ennen mädätystä biokaasun saannon lisäämiseksi, lietteen hajoamisasteen parantamiseksi ja hygienisoinnin varmistamiseksi. Termistä hydrolyysiä käytetään täyden mittakaavan laitoksissa, ja referenssilaitoksia on maailmanlaajuisesti yli 40. (Pöyry Switzerland 2018)

Terminen hydrolyysi on ensisijaisesti lietteen esikäsittelytekniikka, eikä se siten ole suoraan verrattavissa tässä selvityksessä tarkasteltuihin tekniikoihin.

3.10.2 Hydrotermiinen nesteytys (HTL)

Hydrotermiinen nesteytys (Hydrothermal Liquefaction, HTL) tapahtuu 100 – 250 MPa paineessa ja 280 – 370 °C lämpötilassa. Sen tuotteena syntyy synteettistä bioöljyä, joka voidaan polttaa sellaisenaan tai jota voidaan jalostaa polttoaineeksi. Lisäksi prosessissa muodostuu vesijae, kaasuja ja kiintoainejae, josta voidaan ottaa talteen ravinteita (Snowden-Swan et al. 2016). HTL on kehitysvaiheessa oleva tekniikka, jota mm. Århusin yliopisto Tanskassa ja yhdysvaltalainen Pacific Northwest National Laboratory kehittävät aktiivisesti. Jätevesilietteen HTL-käsittelyä ei kuitenkaan vielä ole toteutettu kaupallisessa mittakaavassa.

3.10.3 Ylikriittinen vesikaasutus (SCGW)

Ylikriittinen vesikaasutus (Supercritical Water Gasification, SCGW) tapahtuu yli 450 °C:ssa ja veden ylikriittisellä alueella (> 22 MPa), tyypillisesti n. 30 MPa paineessa. SCWG-käsittelyn tuotteena syntyy polttoaineeksi soveltuvaa kaasua, joka sisältää metaania, vetyä ja hiilidioksidia (Ekpo et al. 2016). SCWG-käsittelyssä voidaan käsitellä märkää lietettä ja tuottaa metaanipitoista biokaasua ilman biologista prosessia. Korkeapaineinen kaasu voidaan jalostaa metaaniksi PSA-tekniikalla (Pressure Swing Adsorption) varsin pienellä energiankulutuksella.

Kaasun lisäksi prosessissa syntyy sivutuotteena kiinteitä ja öljymäisiä fraktioita. Ravinteet sitoutuvat prosessissa kiintoaineeseen. Fosforin talteenottoa suoraan kiintoaineesta ei ole vielä ratkaistu. Kiintoaine voidaan myös polttaa, ja tuhkalle voidaan käyttää olemassa olevia fosforin talteenotto-tekniikoita. SCWG-tekniikkaa ei ole täydessä mittakaavassa käytössä puhdistamolietteiden käsittelyssä, mutta ensimmäinen teollisen kokoluokan demonstrointilaitos on rakenteilla Sveitsiin. Suunniteltu käyttöönotto on vuonna 2019 ja kaupallistaminen vuonna 2022 (Pöyry Switzerland 2018)

3.10.4 Biopohjaisen raakaöljyn tuotanto

Lietteestä biopohjaisen raakaöljyn (biocrude oil) tuotantoon on kehitteillä useita tekniikoita. Esimerkiksi Susteen GmbH:n TCR-tekniikka on termokemiallinen prosessi, jossa kuivatusta lietteestä tai muusta orgaanisesta jätteestä valmistetaan hiiltä ja kaasumaisia aineita. Tekniikkaa on kehitetty yli

20 vuoden ajan Fraunhofer-instituutissa. Kaasuista tiivistetään öljyä, joka on prosessin päätuote. Hiili ja kaasut voidaan polttaa prosessin lämpöenergiaksi, ja niistä voidaan saada kaikki prosessin tarvitsema lämpö. Prosessia on kehitetty yli 20 vuotta Fraunhofer-instituutissa. Yritys kehittää myös lietteestä ja muista jätteistä mm. vedyn ja lentopolttoaineen tuotantoon tähtääviä tekniikoita. (Sus-teen 2019)

4 HIILIJALANJÄLKI

Hiilijalanjälki on mittari, jolla voidaan määrittää esimerkiksi erilaisten toimintojen ilmastovaikutus. Ilmastovaikutus kuvaa syntyneitä kasvihuonekaasuja, jotka voivat aiheutua esimerkiksi kuljetuksista, energiankulutuksesta, käytetyistä raaka-aineista ja syntyneistä jätteistä. Hiilijalanjälki kertoo ilmastovaikutuksen hiilidioksidiekvivalentteina (CO_{2e}), jossa eri kasvihuonekaasut on yhteismitallistettu vertailtavaan muotoon.

Hiilijalanjäljen laskenta suoritettiin soveltaen kansainvälistä KHK-protokollaa sekä eri standardeja ja viitekehyksiä (mm. ISO 14040, 14044 ja 14067 sekä PAS 2050). Lähtötietoina on käytetty asiantuntijoiden arvioita prosesseista. Päästökertoimina käytettiin Ecoinvent 3.5 -tietokannan mukaisia kertoimia sekä julkisista lähteistä kerättyjä laskentaan soveltuvia päästökertoimia (mm. Motiva, VTT). Hiilijalanjäljet määritettiin tässä selvityksessä esitetyille termisille tekniikoille. Näiden lisäksi hiilijalanjäljet määritettiin mädätykselle (mesofiilinen märkämädätys) ja kompostoinnille (aumakompostointi), joihin termisiä käsittelymenetelmiä voidaan verrata.

Hiilijalanjäljen lisäksi tarkasteltiin termisten käsittelytekniikoiden hiilikädenjälkeä, joka ilmaisee tässä selvityksessä positiivista ilmastovaikutusta pienentäen hiilijalanjäljen suuruutta. Tämä ilmasto-
hyöty koostuu prosessista syntyvän tuotteen käyttökohteen päästöhyvityksistä. Termisille käsittelytekniikoille määritetyt päästöhyvitykset on esitetty seuraavassa kappaleessa (Taulukko 4.1).

Termisten käsittelymenetelmien kohdalla laskentojen lähtökohtana käytettiin mädätettyä lietettä. Tällä on merkitystä erityisesti laskentojen energiataseisiin; mikäli termisissä käsittelyissä käsiteltäisiin mädättämätöntä lietettä, olisi prosessien energiatase vahvemmin positiivinen, ja päästöhyvityksiä energiasta saataisiin enemmän. Toisaalta mädätyksen hiilijalanjälkilaskennan tuloksista voidaan todeta, että mädätys itsessään on hiilijalanjäljen kannalta edullinen vaihtoehto. Koko käsittelyketjun hiilijalanjälkilaskentaa sekä ilman mädätystä että mädätyksen kanssa ei ollut mahdollista toteuttaa tämän hankkeen puitteissa.

4.1 LASKENNAN RAJAUS

Mädätyksen ja kompostoinnin osalta hiilijalanjäljen laskennassa huomioitiin seuraavat tekijät:

- Lietteen kuljetus käsittelypaikalle
- Kemikaalien valmistus ja kuljetus
- Sähkö- ja lämpöenergian kulutus
- Muiden polttoaineiden kulutus
- Suorat päästöt ilmaan (metaani- ja typpioksiduulipäästöt)
- Tuotteen kuljetus

Mädätyksen oletettiin tapahtuvan puhdistamalla mesofiilisenä märkämädätyksenä. Kompostoinnin taas oletettiin tapahtuvan 50 km päässä puhdistamolta aumakompostointina. Molempien käsittelymenetelmien tuotteiden kuljetusmatkaksi oletettiin 50 km. Lietteen kuivauksessa syntyvää rejektivesivirtaa ei huomioitu laskennoissa, jotta tulokset olisivat verrattavissa termisiin käsittelymenetelmiin, joiden laskennassa lähtökohtana oli mekaanisesti kuivattu liete eli mekaanisen kuivauksen rejektivettä ei niissäkään sisällytetty laskentaan.

Termisten käsittelymenetelmien laskennan rajauksessa otettiin huomioon termisessä käsittelymenetelmästä seuraavat päästölähteet:

- Lietteen kuljetus käsittelypaikalle
- Kemikaalien valmistus ja kuljetus
- Prosessissa tuotettujen jätevesien käsittely (ei mekaanisen kuivauksen rejektiiä)

- Sähkö- ja lämpöenergian kulutus
- Muiden polttoaineiden kulutus
- Suorat päästöt ilmaan (metaani- ja typpioksiduulipäästöt)
- Tuotteen kuljetus
- Jätteiden ja sivutuotteiden kuljetus sekä tarvittava jätteenkäsittely.

Laskennan lähtökohtana käytettiin mädätettyä, mekaanisesti kuivattua lietettä (30 % TS). Jätevedenpuhdistamolla tapahtuva jäteveden käsittely ja lietteen mekaaninen kuivaus rajattiin laskennan ulkopuolelle. Termisten käsittelymenetelmien tuottamien jätevesien käsittelyn vaikutus kuitenkin huomioitiin laskennassa.

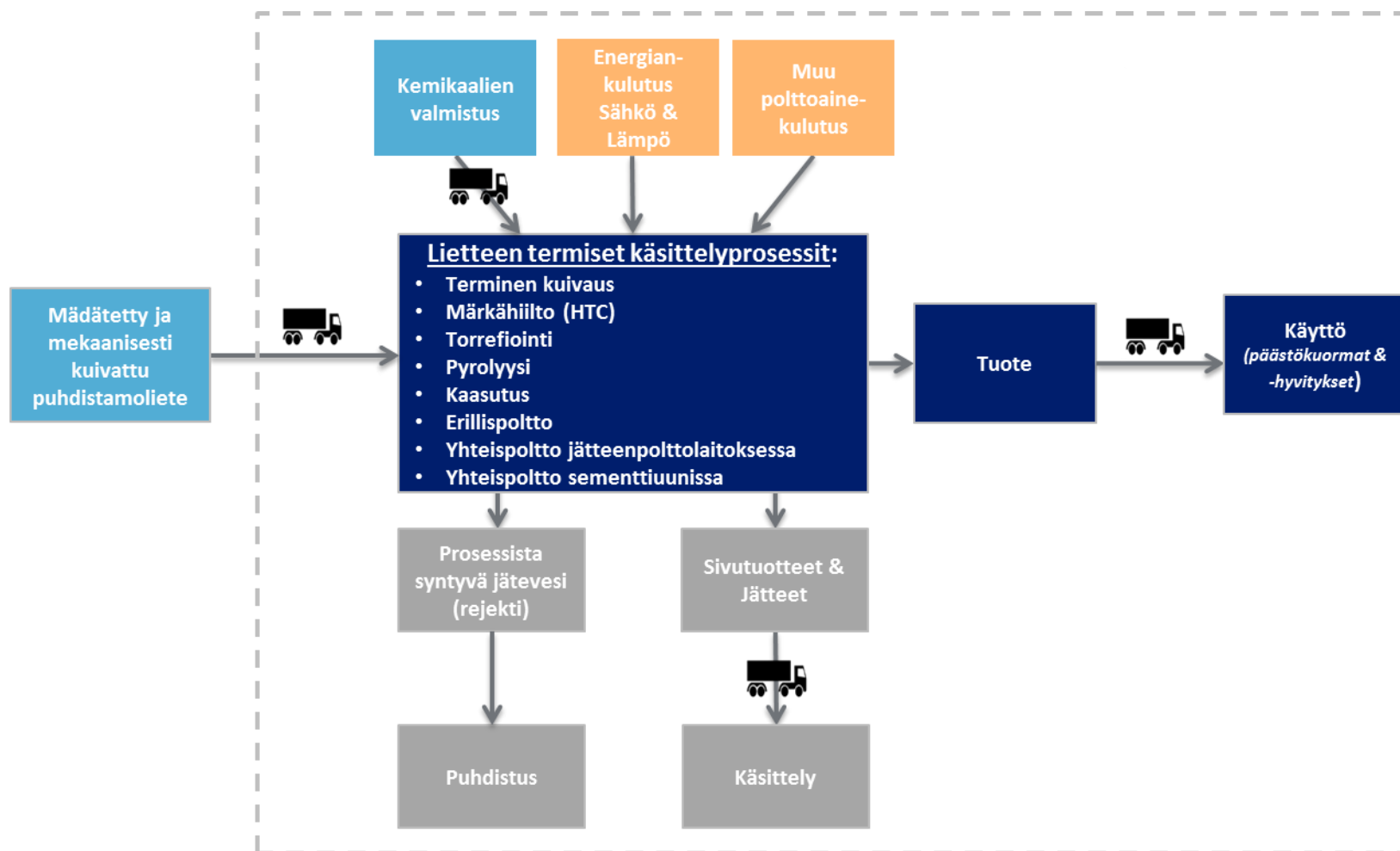
Laskennassa huomioitiin myös hyödynnettävän tuotteen käytöstä saatavat päästöhyvytykset, kun tuotteella voidaan korvata ravinteita lannoitekäytössä, neitseellisiä materiaaleja, muulla tavalla tuotettua lämpö –tai sähköenergiaa tai fossiilista polttoainetta.

Päästöhyvytyksien laskennassa huomioitiin tuotteen käytöstä aiheutuvat hyödyt, mutta tuotteen käyttövaiheessa aiheutuvia päästöjä ei huomioitu. Esimerkiksi maanparannusaineena käytettäessä huomioitiin lannoitehyvytykset fosforin ja typen osalta, mutta ei levityslaitteiden polttoaineen kulu- tusta. Termisen käsittelyn tuotteen (esim. pyrolyysihiihi) polttoainekäytön tapauksessa taas huomi- oitiin päästöhyvytyksenä tuotteen poltosta saatava lämpö, mutta ei tuotteen poltosta aiheutuvia päästöjä. Itse termiseen käsittelyprosessiin liittyvät päästöt, esimerkiksi pyrolyysin tapauksessa prosessissa muodostuvien kaasumaisten aineiden polton päästöt toki huomioitiin osana prosessin päästöjä.

Torrefioinnille ja pyrolyysille huomioitiin kaksi erillistä tapausta, joissa prosessin tuotteena syntynyt hiili johdetaan joko maanparannusainekäyttöön (päästöhyvytytys ravinteiden kierrätyksestä) tai polt- toon (päästöhyvytytys tuotetusta lämpöenergiasta).

Märkähiillon hiilituotteelle, kaasutuksen ylijäämälämmölle sekä erillis- ja yhteispolton ylijäämäläm- mölle laskettiin päästöhyvytytys tuotetun lämpöenergian perusteella. Sementtiuunissa polton tapauk- sessa sen sijaan laskettiin päästöhyvytytys olettaen, että lietteen energialla voidaan korvata fossiilista kivihiiltä, jota tyypillisesti käytetään sementin valmistuksessa polttoaineena öljykoksin ohella.

Termisten käsittelymenetelmien laskennan raja- us on esitetty alla olevassa kuvassa ja huomioidut päästöhyvytykset eri tapauksissa seuraavassa taulukossa.



Kuva 4.1. Hiilijalanjälkilaskennan rajausta termisille käsittelymenetelmille

Taulukko 4.1 Laskennassa huomioidut päästöhyvytykset (hiilikädenjälki)

Käsittelymenetelmä	Käyttökohteen päästöhyvyty
Mädätys	Lämpöenergia (biokaasu), ravinteet
Kompostointi	Ravinteet
Terminen kuivaus	Ravinteet
Märkähiilto (HTC)	Lämpöenergia (hiilen poltto)
Torrefiointi	A. Ravinteet B. Lämpöenergia
Pyrolyysi	A. Ravinteet B. Lämpöenergia
Kaasutus	Lämpöenergia, tuhka rakentamiseen
Erillispoltto	Lämpöenergia, tuhka rakentamiseen
Yhteispoltto, jätteenpolttolaitos	Lämpöenergia
Yhteispoltto, sementtiuuni	Lietteen energia korvaa kivihiiltä

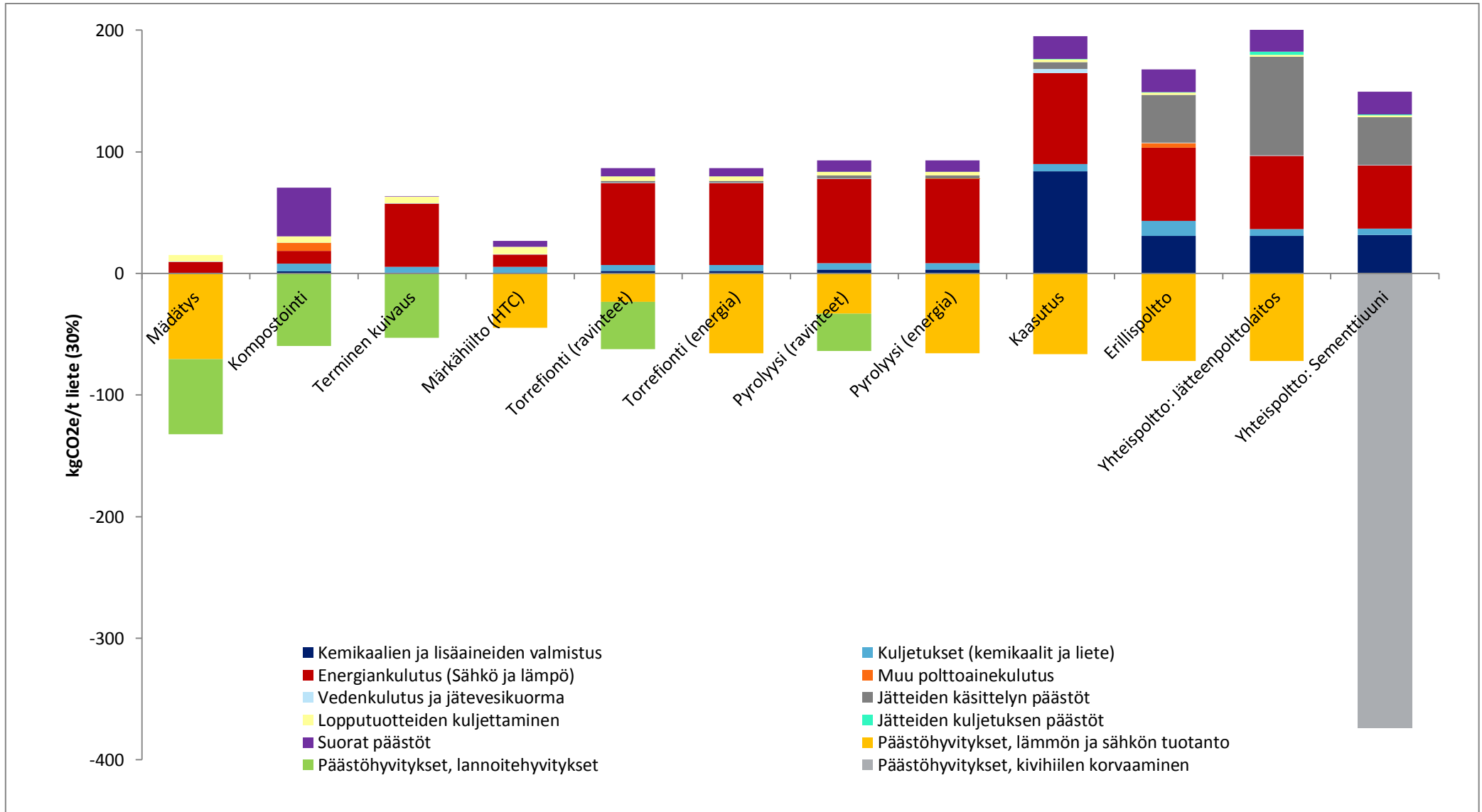
4.2 TULOKSET

Hiilitaselaskennan tulokset on esitetty seuraavissa kuvissa graafisesti ja taulukkomuodossa. Tuloksista havaitaan, että mädätys on kompostointiin verrattuna hiilijalanjäljen kannalta huomattavasti edullisempi tekniikka, johtuen lähinnä kompostoinnin suorista päästöistä sekä biokaasun päästöhyvityksistä.

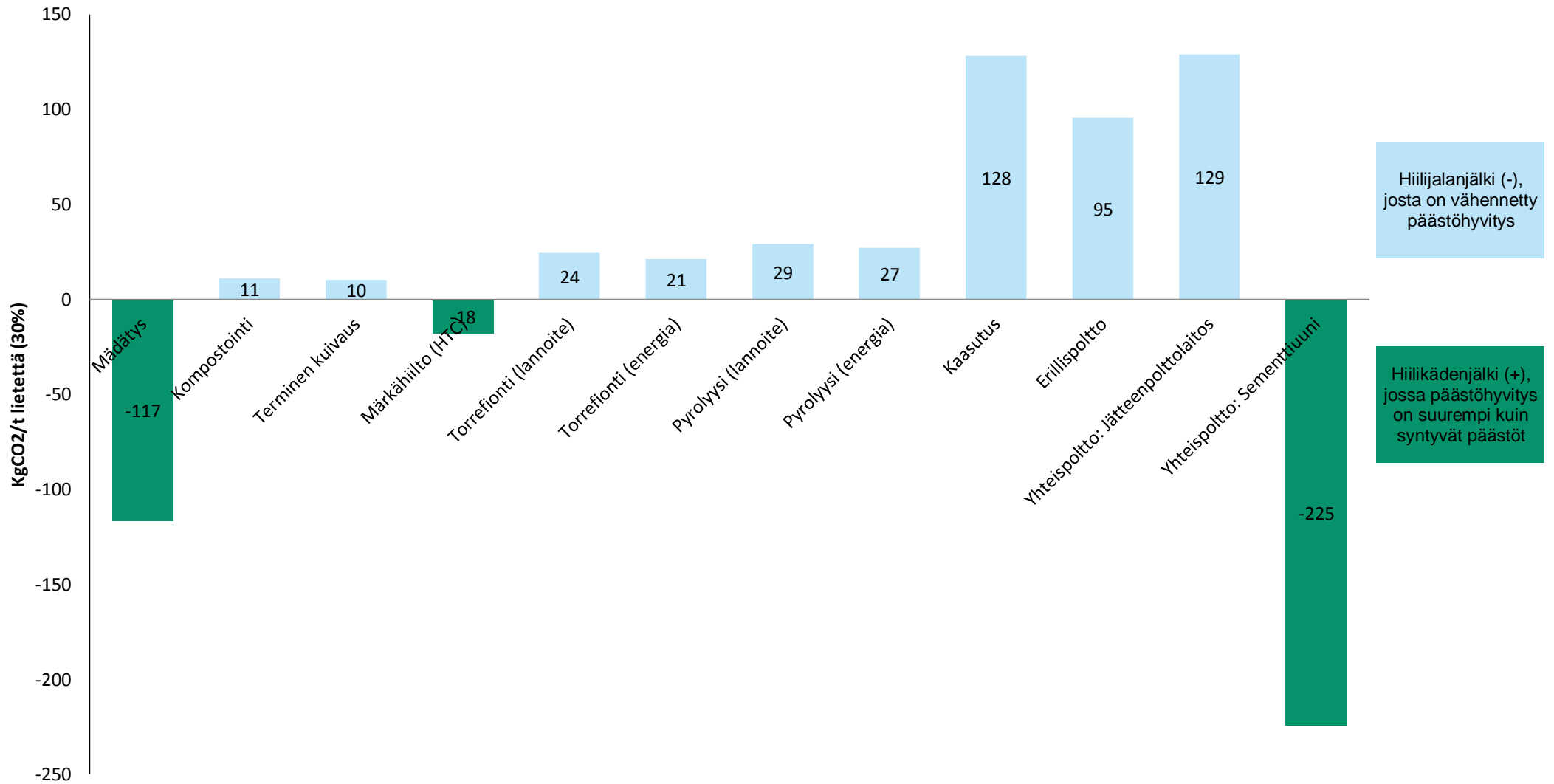
Useimmissa termisissä käsittelymenetelmissä energiankulutus muodostaa merkittävän päästökuorman, ja tietyissä tekniikoissa myös kemikaalien valmistus sekä jätteiden käsittely ovat merkittäviä tekijöitä. Suorat päästöt ovat merkittäviä lähinnä erilaisten polttotekniikoiden tapauksessa. Lietteen, kemikaalien ja tuotteiden kuljetukset muodostavat hyvin pienen osuuden kokonaispäästökuormasta.

Päästöhyvytykset ovat merkittäviä niin lietteen energia- kuin lannoitehyödyntämisessäkin. Näiden hyvitysten osalta tulee huomioida, että hyödyntämisessä muodostuvat päästöt (esim. lannoitteen levittäminen, tuotteen polton päästöt) on rajattu laskennan ulkopuolelle. Lämmön tuotannon hyvytykset on laskettu keskimääräiseen lämpöenergian tuotantoon pohjautuen muissa tapauksissa paitsi sementtiuunipoltossa, jossa lietteen energialla on oletettu korvattavan fossiilista kivihiiltä.

Sementtiuunipolton merkittävä päästöhyvytykset selittyvät kivihiilen korvaamisen suurella päästöhyvytyksellä. Mikäli muilla tekniikoilla lietteestä tuotetulla polttoaineella voitaisiin korvata fossiilista polttoainetta, voitaisiin niilläkin saavuttaa vastaavassa suuruusluokassa olevia päästöhyvityksiä.



Kuva 4.2 Hiilijalanjäljen (päästöt) ja -kädenjäljen (päästöhyvitykset) laskennan tulokset.



Kuva 4.3 Tuloksista saatava hiilitase, jossa on esitetty hiilijalanjäljen (päästöt) ja -kädenjäljen (päästöhyvitysten) yhteisvaikutus

Taulukko 4.2 Hiilijalanjälkilaskennan tulokset osatekijöittäin

Kg CO2e / t lietettä (30 %)												
	Mädätys	Kompostointi	Terminen kuivaus	Märkähiilto (HTC)	Torrefiointi (ravinteet)	Torrefiointi (energia)	Pyrolyysi (ravinteet)	Pyrolyysi (energia)	Kaasutus	Erillispoltto	Yhteispoltto Jätteenpolttolaitos	Yhteispoltto Sementtikuuni
YHTEENSÄ	-117	11	10	-18	24	21	29	27	128	95	129	-225
Kemikaalien valmistus	0	2	1	0	2	2	3	3	84	31	31	31
Kuljetukset (kemikaalit ja liete)	0	6	5	5	5	5	5	5	6	12	5	6
Energiankulutus (Sähkö ja lämpö)	10	11	52	10	67	67	69	69	75	60	60	52
Muu polttoainekulutus	0	7	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0
Vedenkulutus ja jätevesikuorma	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0
Lopputuotteiden kuljettaminen	5	5	5	6	4	4	3	3	2	2	2	2
Jätteiden kuljetuksen päästöt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1
Jätteiden käsittelyn päästöt	0	0	0	0	2	2	3	3	6	39	81	39
Suorat päästöt	0	40	0	5	7	7	9	9	19	19	19	19
Päästöhyvitykset, lämmön ja sähkön tuotanto	-70	0	0	-45	-23	-65	-33	-66	-66	-72	-72	0
Päästöhyvitykset, lannoitehyvitykset	-62	-60	-53	0	-39	0	-31	0	0	0	0	0
Päästöhyvitykset, kivihiilen korvaaminen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-374
Päästöhyvitykset, hiekan korvaaminen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5 TEKNIKOIDEN POTENTIAALIN ARVIOINTI

5.1 PUHDISTAMOLIETTEEN KÄSITTELY JA HYÖDYNTÄMINEN SUOMESSA

5.1.1 Lietetuotteiden hyödyntämiskohteet ja markkinat

Lietetuotteiden hyödyntämis- ja sijoituskohteet voidaan jakaa neljään päävaihtoehtoon:

1. Käyttö maanparannusaineena
2. Käyttö teollisuudessa tai rakentamisessa
3. Käyttö polttoaineena
4. Loppusijoitus (ns. kaatopaikkasijoitus) tai välivarastointi myöhempää käyttöä varten

Nykyisin valtaosa lietteistä käsitellään mädätyksellä ja/tai kompostoinnilla ja käytetään maanparannusaineena tai sellaisen raaka-aineena joko maataloudessa, viherrakentamisessa tai maisemoinnissa. Myös termisillä käsittelymenetelmillä voidaan tuottaa kaikkiin näihin käyttökohteisiin soveltuvia tuotteita, kuten kappaleessa 3 on kunkin tekniikan kohdalla ja kaaviossa (Kuva 3.1) on esitetty.

Lietteen termistä käsittelyä toteutetaan Suomessa vain muutamissa laitoksissa. Termisesti kuivattua lietettä käytetään maanparannusaineena erityisesti uusilla pelloilla tai kompostiin sekoitettuna maanparannusaineena, mutta tämä käsittely- ja käyttötapa ei ole yleistynyt. Lietteen polttoa tehdään ainoastaan yhteispolttona. Tuhkat sijoitetaan muun tuhkan joukossa tuhkanlajitusalueelle tai johdetaan hyötykäyttöön mm. tierakentamisessa. Sementti- ja kevytsorateollisuudessa on kiinnostusta lietetuotteiden käyttöön, mutta tällä hetkellä se ei ole Suomessa käytettyä tekniikkaa.

5.1.2 Maantieteelliset olosuhteet

Suomessa maatalouden yleisin tuotantosuunta on viljanviljely, jota, samoin kuin kasvihuoneviljelyä, harjoitetaan eniten Varsinais-Suomessa ja Etelä-Pohjanmaalla. Suurin kotieläintuotannon muoto eli maidontuotanto painottuu erityisesti Pohjois-Pohjanmaalle ja Pohjois-Savoon.

Maataloudessa voidaan hyödyntää sekä epäorgaanisia lannoitteita että orgaanisia lannoitteita ja maanparannusaineita. Epäorgaanisten lannoitteiden käyttö on maataloudessa satoisuuden maksimoinnin näkökulmasta edullista, koska näillä tuotteilla eri ravinteiden suhteita voidaan tarkasti optimoida. Orgaanisten maanparannusaineiden eduksi taas voidaan nähdä orgaanisen aineksen kierrätys, jolla voidaan korvata pelloilta sadon mukana poistuvaa orgaanista ainesta. Talvikauden ja lyhyen kasvukauden vuoksi lannoitteiden levitys maataloudessa ajoittuu tiettyihin aikoihin vuodesta, minkä vuoksi kierrätyslannoitteita tulee voida varastoida useiden kuukausien ajan.

Puhdistamolietteen tuotannosta valtaosa keskittyy Etelä- ja Väli-Suomeen ja erityisesti suuriin kaupunkeihin. Käyttökohteet maanparannusaineena sijaitsevat valtaosin maatalousvaltaisemmilla alueille, joita on eniten Varsinais-Suomessa ja Etelä-Pohjanmaalla. Etäisyydet lietteen tuotantoalueiden ja maatalousvaltaisten alueiden välillä ovat siten suhteellisen pitkiä. Termisillä käsittelymenetelmien lietetuotteet ovat massaltaan ja osin tilavuudeltaan pienempiä kuin perinteisillä käsittelymenetelmillä valmistetut tuotteet, mikä on eduksi kuljetusten näkökulmasta.

Osassa Keski-Eurooppaa jätevesilietteen poltto on aloitettu 1960-luvulla siitä syystä, että tiheästi asutuilla seuduilla puhdistamolietteelle ja siitä valmistetuille tuotteille ei ollut riittävästi sijoituskohteita. Lietetuotteiden kysyntä maataloudessa on ollut rajallista, koska lantaa on ollut runsaasti saatavilla.

5.1.3 Jätevedenpuhdistamot ja jätevesiliete Suomessa

Suomessa valtaosassa puhdistamoista käytetään fosforin kemiallista saostusta rauta- tai alumiinisaostuksella. Tästä johtuen lietteen sisältämä fosfori on pääosin metallikomplekseihin sidottuna, ja yleensä fosforin saatavuus kasveille on lyhyellä aikavälillä varsin heikko. Pidemmällä aikavälillä fosforia kuitenkin vapautuu kasveille käyttökelpoiseen muotoon. Maanparannusainekäytössä metallisaostettua fosforia sisältävät tuotteet sopivat erityisesti pitkävaikutteisiksi lannoitteiksi. Biologinen fosforin poisto on käytössä vain muutamilla laitoksilla, eikä sitä voida toteuttaa ympäri vuoden.

Suomessa jäteveden ja siten myös jätevesilietteen raskasmetallipitoisuudet ovat alhaisia verrattuna Keski-Eurooppaan. Jätevesilietteestä voidaan löytää pieninä pitoisuuksina Suomessa käytettyjä lääkeaineita, orgaanisia haitta-aineita sekä mikrokokuuokan muoveja.

5.2 TEKNIKOIDEN ARVIOINTI ASiantuntijatyöpajassa

Lietteen termisiä käsittelymenetelmiä arvioitiin SWOT-analyysiä mukaillen laaja-alaisessa asiantuntijatyöpajassa. Tekniikoiden arviointi toteutettiin kahdessa osassa, joista toisessa käsiteltiin mahdollisuuksia ja uhkia lietetuotteiden markkinoiden näkökulmasta ja toisessa kunkin tekniikan vahvuuksia ja heikkouksia. Tiedot koottiin tässä kappaleessa esitettyihin taulukoihin, ja niitä hyödynnettiin tekniikoiden potentiaalın arvioinneissa, jotka on esitetty kappaleessa 5.3.

5.2.1 Lietetuotteiden markkinoiden mahdollisuudet ja uhat

Käyttökohteiden ja markkinoiden luomia mahdollisuuksia ja uhkia on listattu seuraavassa taulukossa.

Taulukko 5.1 Lietetuotteiden käyttökohteiden mahdollisuuksia ja uhkia

Maanparannusaine	Mahdollisuudet	Uhat
	Uudet liiketoimintamahdollisuudet ja käyttökohteet	Imago / yleinen mielipide (huoli mahdollisista haitoista)
	Imago / yleinen mielipide (kierrätyksen ja kestävyuden näkökulma)	Orgaanisen aineksen ja typen (osittainen) häviäminen käsittelyssä
	Fosforin kierrätys, kierrätysfosforin hyvä laatu verrattuna neitseelliseen	Säätelyn hajanaisuus ja säätelyyn liittyvät epävarmuudet
	Hiilen sitominen maaperään	Haitta-aineiden päätyminen kiertoon
	Lainsäädäntö (ohjaus kierrätyksen edistämiseksi)	
	Huoltovarmuus (riippuvuus neitseellisestä fosforista)	
Teollisuus / rakentaminen	Mahdollisuudet	Uhat
	Uudet liiketoimintamahdollisuudet, tuotekehitys	Imago / yleinen mielipide (huoli mahdollisista haitoista)
	Lietteen käytössä teollisuudessa on hyödynnettävää potentiaalia	Fosforin talteenotto / kierrätys hoidettava erikseen
	Raaka-aineiden korvaaminen ja säästöt	Määräysten / vaatimusten tiukentuminen

	Sivuvirtojen / jätteiden määrän vähentäminen	Lietteiden markkinat ja lietemäärät ovat suhteellisesti pieniä
	Lainsäädäntö (ohjaus kierrätyksen edistämiseksi)	Neitseellisten raaka-aineiden edullisuus
	Imago / yleinen mielipide (kierrätyksen ja kestävyuden näkökulma)	Kierrätystuotteiden laatu ei aina riittävän hyvä
	Teollisuushyödyntämisessä volyymit ovat suuria	Tuotteiden validoinnin hitaus
Polttoaine	Mahdollisuudet	Uhat
	Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen, päästöjen pieneneminen	Logistiikan haasteet, infrastruktuuri puutteellista
	Päästökaupan mahdollisuudet sekä muut kannustimet, tuet ja velvoitteet (esim. sekoitevelvoite)	Fosforin talteenotto hoidettava erikseen
	Haitta-aineiden hävittäminen ja poisto kierrosta	Päästöjen aiheutuminen
	Uudet tekniikat (esim. biopohjaiset öljyt)	Käsittelyprosessin haavoittuvuus / haasteet operoinnissa
		Muun kehitystyön hidastuminen, mikäli polttoainetta pidetään lopullisena ratkaisuna
		Lainsäädännön rajoitukset ja muuttuminen
Loppusijoitus	Mahdollisuudet	Uhat
	Varma ratkaisu	Ei pitkäaikainen / lopullinen ratkaisu
	Voi toimia väliaikaisena varastona fosforin ja muiden hyödyllisten aineiden louhintaa varten	Väärin toteutettuna fosfori ja muut hyödylliset aineet voidaan menettää
	Mahdollistaa kaatopaikkojen kehittämisen entistä vahvemmin kierrätystuotteiden jalostuskeskukseksi	Yhteiskunnallinen ohjaaminen pois loppusijoituksesta, yleinen mielipide negatiivinen
	Haitta-aineet saadaan pois kierrosta, oikein tehtynä turvallista	Imagoriski (kiertotalousperiaatteen vastaisuus)
	Tuhkien volyymit pieniä; kapasiteettia on riittävästi	
	Pienille jätemäärille ja tietyille jätejakeille järkevä ratkaisu	

5.2.2 Tekniikoiden vahvuudet ja heikkoudet

Kunkin tekniikan vahvuuksia ja heikkouksia on listattu seuraavassa taulukossa.

Taulukko 5.2. Lietteen termisten käsittelymenetelmien vahvuuksia ja heikkouksia

Terminen kuivaus	Vahvuudet	Heikkoudet
	Tunnettua, koeteltua tekniikkaa; maailmalla satoja referenssejä	Ei poista orgaanisia haitta-aineita
	Fosforin ja hiilen kierrättäminen	Lopputuotteen käyttökohteet ja arvo epävarmaa
	Hukkalämmön hyödyntäminen	Korkea energiankulutus
	Voidaan toteuttaa pienessäkin kokoluokassa	Paloriskit
		Poistokaasujen ja tuotetun lauhteen käsitteilytarve
		Hajuhaitat
Märkähiilto (HTC)	Vahvuudet	Heikkoudet
	Ei tarvita termistä kuivausta -> pienempi energiankulutus	Vähän referenssejä
	Voidaan hyödyntää hukkalämpöä	Haitta-aineiden poisto epävarmaa (koskee erityisesti lannoitekäyttöä)
	Voidaan toteuttaa pienessäkin kokoluokassa	Rejektiveden käsittely / hyödyntäminen tulee ratkaista
		Tuotteen käyttökohteita ei tällä hetkellä tiedossa
		Lainsäädännön rajoitteet (hyväksyntää ei vielä ole; katsotaanko tuote jätteeksi?)
		Fosforin käyttökelpoisuus lannoitekäytössä heikko
		Hajuhaitat
Torrefiointi	Vahvuudet	Heikkoudet
	Fosforin ja hiilen kierrätys	Vähän referenssejä
	Fosforin konsentroidi	Org. haitta-aineiden ja mikromuovien tuhoutumisesta ei riittävästi tietoa
	Sivuvirtojen hyödyntäminen / jalostaminen tuotteiksi mahdollista	Osa hiilestä menetetään
		Kemiallisesti sidottu fosfori heikosti käyttökelpoista kasveille
		Haitallisten metallien konsentroituminen, PAH-yhdisteiden muodostuminen
		Vaatii termisen kuivauksen -> korkea energiantarve
		Hiilituotteen lainsäädäntöä ei vielä ole, REACH-rekisteröinnin tarve epäselvä
		Lopputuotteen kysynnästä ei ole tietoa

Pyrolyysi		Vahvuudet	Heikkoudet
	Fosforin ja hiilen kierrätys		Osa hiilestä menetetään
	Org. haitta-aineiden ja mikromuovien tuhoutuminen		Kemiallisesti sidottu fosfori heikosti käyttökelpoista kasveille
	Fosforin konsentroidi		Haitallisten metallien konsentroituminen, PAH-yhdisteiden muodostuminen
	Tunnettua tekniikkaa		Vaatii termisen kuivauksen -> korkea energiantarve
	Sivuvirtojen hyödyntäminen / jalostaminen tuotteiksi mahdollista		Hiilituotteen lainsäädäntöä ei vielä ole, REACH-rekisteröinnin tarve epäselvä
			Lopputuotteen kysynnästä ei ole varmuutta
Kaasutus		Vahvuudet	Heikkoudet
	Org. haitta-aineiden ja mikromuovien tuhoutuminen		Vähän referenssejä, kehitystyö vähäistä. Kokemukset olemassa olevista laitoksista vaihtelevia
	Kaasumootorikäyttöön soveltuvan kaasun tuottaminen mahdollista		Yksikkökoko oltava riittävän suuri
			Vaatii termisen kuivauksen
			Monimutkainen prosessi, hyödyt verrattuna polttoon pieniä
			Fosforin kierrätys vaatii erillisen talteenotto-käsittelyn (lainsäädäntö ei salli suoraa lannoitekäyttöä). Talteenottoon ei ole valmiita ratkaisuja.
			Orgaaninen aines menetetään valtaosin
Erillispoltto		Vahvuudet	Heikkoudet
	Laajalti käytössä; Euroopassa ja muualla maailmassa paljon referenssejä		Suomessa ei kokemusta (ennen Rovaniemen PAKU-laitosta)
	Org. haitta-aineiden ja mikromuovien tuhoutuminen		Yksikkökoko oltava suuri erityisesti leijupetiteknikalla
	Itsenäinen ja muista riippumaton ratkaisu		Vaatii yleensä termisen kuivauksen
	Energian suhteen omavarainen, mahdollisuus energian tuotantoon		Fosforin kierrätys vaatii erillisen talteenotto-käsittelyn (lainsäädäntö ei salli suoraa lannoitekäyttöä). Talteenottoon ei ole valmiita ratkaisuja.
	Tuhkan jatkojalostus / fosforin kierrätys		Orgaaninen aines menetetään
Yhteispoltto		Vahvuudet	Heikkoudet
	Laajalti käytössä, Euroopassa paljon referenssejä		Olemassa olevien laitosten kapasiteetti ei ole riittävä yhteispolton lisäämiseksi merkittävästi
	Mahdollisuus hyödyntää olemassa olevia laitoksia -> pieni investointikustannus		Liete lämpöarvoltaan alhaista ja voi aiheuttaa haasteita laitoksen operoinnissa -> lietteen vastaanotto kallista / kannattamatonta polttolaitokselle
	Org. haitta-aineiden ja mikromuovien tuhoutuminen		Fosforin kierrätys ei yleensä mahdollista

	Mineraalien hyötykäyttö ja fossiilisten polttoaineiden korvaaminen sementtiteollisuudessa	Voi vaatia erityisiä syöttöjärjestelyitä ja muutoksia ympäristölupaun
		Vaatii yleensä termisen kuivauksen

5.3 YHTEENVETO TEKNIKOIDEN POTENTIAALISTA

5.3.1 Terminen kuivaus

Terminen kuivaus on tunnettua ja laajalti käytössä olevaa tekniikkaa; sen tekninen valmiusaste (TRL) on korkein eli 9. Termisellä kuivauksella voidaan pienentää lietteen massaa ja yhdistämällä siihen rakeistus parantaa materiaalin rakennetta. Maailmalla termistä kuivausta käytetään pääosin polton esikäsitelyynä. Käsittelyssä muodostuvat kaasut tulee käsitellä, jolloin yleensä muodostuu käsittelyä vaativia reaktiivisia. Tekniikka vaatii paljon lämpöenergiaa, ja sen taloudellisuus riippuu pitkälti saatavilla olevan energian hinnasta. Kuivaus ei ratkaise orgaanisten haitta-aineiden, lääkeaineiden ja mikromuovien poistoa. Maanparannusainekäytössä termisesti kuivatun lietteen käyttö mahdollistaa fosforin ja hiilen kierrätyksen.

Suomessa termisesti kuivatun lietteen maanparannusainekäytössä markkinat ovat tällä hetkellä rajalliset, ja tuote joudutaan myymään käytännössä nollahinnalla. Termisen kuivauksen potentiaali nykyistä laajemmin käytettäväksi tekniikaksi riippuu mahdollisuuksista tuotteen käytölle. Suomessa Lakeuden Etapin laitoksen tuote on saatu onnistuneesti markkinoitua maanparannusaineeksi, kun taas Joensuun Veden laitoksessa kuivattu tuote käytetään kompostin raaka-aineena muun lietteen seassa toimivien markkinoiden puuttuessa. Lopputuotteen käyttö myös muissa käyttökohteissa on tällä hetkellä epävarmaa, ja todennäköisesti tuotteen arvo tulee olemaan jatkossakin hyvin alhainen.

5.3.2 Märkähiilto

Märkähiillolla käsitelty liete voidaan kuivata mekaanisesti 50 – 70% kuiva-ainepitoisuuteen hiilimäiseksi tuotteeksi. Tekniikka kuluttaa varsin vähän energiaa, ja on termiseen kuivaukseen verrattuna merkittävästi energiataloudellisempi. Märkähiilto tähtää yleensä polttoaineen tuotantoon, mutta myös maanparannusaine- ja teollisia käyttökohteita hiillelle on selvitetty. Tuotteen soveltuvuudesta näihin kohteisiin on kuitenkin vielä liian vähän tietoa.

Tekniikasta on vähän kokemuksia täydessä mittakaavassa, ja maailmassa on tietyvästi vain yksi täyden mittakaavan jätevesilietettä käsittelevä laitos. Tekniikan valmiusasteeksi (TRL) arvioidaan 7. Tekniikkaa pidetään kuitenkin potentiaalisena lietteenkäsittelytekniikkana, ja sitä kehitetään aktiivisesti. Suomessa on rakenteilla vuonna 2019 pilot-laitos Heinolaan metsäteollisuuden yhteyteen, ja laitoksessa on tarkoitus tutkia myös jätevesilietteen käsittelyä märkähiillolla.

Tekniikan haittapuolena on käsittelyä vaativan reaktiveden tuotanto. Optimitalanteessa reaktiivettä voidaan hyödyntää mädätyksessä biokaasun tuotannon lisäämiseksi. Käsittelyssä muodostuu myös kaasuja, jotka tulee käsitellä hajujen poistamiseksi. Hajujen käsittelyssä muodostuu yleensä käsittelyä vaativia jätevesiä.

Haitta-aineiden poistosta prosessissa on vaihtelevia tutkimustuloksia. Osassa tutkimuksissa on mitattu erittäin hyviä poistotuloksia, mutta toisissa tutkimuksissa on havaittu heikkoja poistotuloksia ja haitallisten hajoamistuotteiden muodostumista.

Lainsäädännössä ei tällä hetkellä huomioida märkähiillolta tuotettua hiiltä, ja lainsäädäntö voi rajoittaa tuotteen käyttöä. Polttokäytössä keskeistä on, katsotaanko tuote jätteeksi vai tavanomai-

seksi polttoaineeksi. Maanparannusainekäyttö vaatisi kansallista hyväksyntää, jonka saamiseksi todennäköisesti tarvittaisiin lisää tuotteen maanparannusaineeksi soveltuvuutta puoltavaa tutkimusta.

Fosforin talteenottokäsittelyitä märkähiillon yhteydessä kehitetään, mutta näistä tekniikoista ei ole vielä kokemuksia täydessä mittakaavassa.

5.3.3 Torrefiointi

Torrefioinnissa materiaalia käsitellään termisesti hapettomissa tai vähähappisissa olosuhteissa noin 200 – 350 °C:ssa. Liete tulee kuivata termisesti ennen torrefiointia > 85% kuiva-aineeseen. Tuotteena muodostuu hiilimäistä kiintoainetta, kaasuja ja höyryjä. Kaasut ja höyryt voidaan polttaa energiaksi tai jatkokäsitellä öljyn tuottamiseksi. Torrefiointia käytetään maailmalla muutamissa laitoksissa jalostetun polttoaineen tuottamiseksi biomassasta. Puhdistamoliettele torrefiointia ei täydessä mittakaavassa tehdä. Tekniikan valmiusasteeksi lietteen käsittelyssä (TRL) arvioidaan 7.

Torrefiointi mahdollistaisi hiilen maanparannusainekäytössä fosforin ja osittain hiilen kierrätyksen. Orgaanisten haitta-aineiden, lääkeaineiden ja mikromuovien tuhoutumisesta prosessissa on kuitenkin vähän tietoa. Todennäköisesti lämpötila-alue ei ole riittävä ainakaan kaikkien muovien tuhoamiseen.

Torrefiointi on tekniikkana lähellä pyrolyysiä, mutta lämpötila-alue on matalampi. Pyrolyysiä on tutkittu ja käytetään jätevesilietteen käsittelyssä selvästi enemmän kuin torrefiointia, ja pyrolyysiin verrattuna torrefioinnissa on selkeitä haittapuolia. Torrefiointia ei tästä syystä ja referenssien vähydestä johtuen pidetä tällä hetkellä erityisen potentiaalisena tekniikkana lietteen käsittelyssä.

5.3.4 Pyrolyysi

Pyrolyysi on periaatteeltaan samankaltainen kuin torrefiointi, mutta käsittelyn lämpötila on noin 350 – 850 °C. Tuotteena muodostuu vastaavasti hiiltä, kaasuja ja höyryjä. Hiilituotteen orgaanisen aineen osuus on korkeammasta lämpötilasta johtuen pienempi kuin torrefioinnissa. Pyrolyysi vaatii esikäsittelynä termistä kuivausta > 85% kuiva-aineeseen. Puhdistamolietteen pyrolyysilaitoksia on maailmanlaajuisesti käytössä muutamia, ja niistä valtaosa tuottaa hiiltä polttoaineeksi. Suomessa tekniikkaa on testattu Gasumin pilot-laitoksessa, ja HSY suunnittelee suuren pilot-laitoksen toteuttamista. Tekniikan valmiusasteeksi lietteen käsittelyssä (TRL) arvioidaan 8.

Pyrolyysihiilen maanparannusainekäytössä osa hiilestä ja valtaosa fosforista voidaan kierrättää. Hiili toimisi todennäköisesti parhaiten pitkävaikutteisena fosforilannoitteena, sillä rautasaostetun fosforin saatavuus kasveille tutkimusten mukaan heikentyy pyrolyysissä. Hiilituotteelle ei vielä ole hyväksyntää lannoitevalmistukseksi, mutta sen saamista pidetään todennäköisenä. Orgaanisten aineiden ja lääkeaineiden poistosta on varsin hyviä tuloksia. Valtaosa muoveista saadaan tuhottua riittävän korkeissa lämpötiloissa tapahtuvalla käsittelyllä. Pyrolyysissä voi muodostua haitallisia PAH-yhdisteitä, joten niiden pitoisuuden hallinta tulee huomioida lietteen käsittelyssä.

Lietteestä valmistetulle pyrolyysihiilelle selvitetään myös muita hyödyntämismahdollisuuksia, kuten käyttöä suodatin- tai adsorbenttimateriaalina.

Pyrolyysiä pidetään potentiaalisena uutena tekniikkana, joka voisi mahdollistaa fosforin ja hiilen kierrätyksen ilman orgaanisten haitta-aineiden, lääkeaineiden ja muovien päätymistä kiertoon. Tekniikan haittapuolia ovat vaadittavan termisen kuivauksen korkea energiankulutus, raskasmetallien konsentroituuminen hiilituotteeseen ja mahdollinen PAH-yhdisteiden muodostuminen. Keskeinen kysymys on hiilituotteen kysyntä markkinoilla, josta ei tällä hetkellä ole vielä käytännön kokemuksia.

5.3.5 Kaasutus

Kaasutus on tekniikka, jossa tuotetaan polttoon soveltuvaa kaasua. Prosessiin johdetaan pieni määrä ilmaa, jolloin osa syötemateriaalista hapettuu (pala) ja tuotetaan prosessin ylläpitoon tarvittavaa lämpöä. Kaasu voidaan polttaa sellaisenaan tai käsiteltynä kaasumootorissa. Kaasutus vaatii esikäsittelynä termistä kuivausta > 85% kuiva-aineeseen.

Jäännöksenä muodostuu tuhkaa, jonka hiilipitoisuus on hieman polttotuhkaa korkeampi. Kaasutuksen lämpötiloissa orgaanisten haitta-aineiden, lääkeaineiden ja mikromuovien arvioidaan tuhoutuvan tehokkaasti. Kaasutuksessa tuhkaan voi kuitenkin sitoutua PAH-yhdisteitä. Tuhkan käyttömahdollisuudet ovat käytännössä vastaavat kuin polttotuhkan, eli tärkeimmät hyödyntämiskohteet ovat maanrakennuksessa ja teollisuudessa esim. asfaltin, sementin ja tiilien raaka-aineena. Lannoitekäyttö vaatisi fosforin talteenottokäsittelyä.

Puhdistamolietteen kaasutuslaitoksia on maailmassa muutamia, ja tekniikan kehittäminen on suhteellisen vähäistä. Tekniikan valmiusasteeksi lietteen käsittelyssä (TRL) arvioidaan 8. Saksassa on kolme laitosta, joissa valmistaja Sülzle-Kopf on pyrkinyt demonstroimaan tekniikkaa. Laitosten toiminnassa on kuitenkin ollut merkittäviä haasteita, ja sitä ei tällä hetkellä pidetä Saksan markkinoilla kilpailukykyisenä vaihtoehtona poltolle.

Erillispolttoon verrattuna kaasutuksen etuna voidaan pitää mahdollisuutta tuottaa kaasumootorin polttoaineeksi soveltuvaa kaasua, minkä ansiosta voidaan saavuttaa sähköntuotannossa korkea hyötysuhde. Toisaalta prosessi on monimutkainen ja kallis erityisesti kaasun puhdistuksen osalta, joten se todennäköisesti ei ole kilpailukykyinen esimerkiksi polttoon verrattuna.

5.3.6 Erillispoltto

Lietteen erillispoltto on laajalti käytössä oleva ja yleistyvä tekniikka Euroopassa ja muualla maailmassa. Maailmanlaajuisesti referenssilaitoksia on satoja. Tekniikan valmiusaste (TRL) on 9. Lietteen polttoon käytetään useita tekniikoita, joista leijupetipoltto on tällä hetkellä Euroopassa yleisin tekniikka. Leijupetipoltto vaatii suurta laitospakapiteettia, mutta poltto voidaan toteuttaa pienemmissä mittakaavassa mm. arinatekniikalla tai suomalaisella PAKU-tekniikalla. Poltto vaatii yleensä ainakin osittaista termistä kuivausta.

Poltto tuhoaa tehokkaasti lietteessä olevat orgaaniset haitta-aineet, lääkeaineet ja mikromuovit. Tuhkan lannoitekäyttö on nykylainsäädännöllä mahdollista vain fosforin talteenottokäsittelyllä. Talteenottokäsittelytekniikoita kehitetään aktiivisesti, mutta tällä hetkellä tekniikat eivät vielä ole taloudellisesti kannattavia. Keski-Euroopassa tuhkaa varastoidaan odottamaan myöhempää fosforin talteenottoa. Tuhkaa voidaan myös hyödyntää maanrakennuksessa maata stabiloivana ja tukevoittavana materiaalina tai teiden pohjakerroksen materiaalina. Tuhkaa voidaan käyttää myös mm. asfaltin, sementin ja tiilien raaka-aineena.

Erillispoltto vähentää lietteen määrää säilyttäen fosforin kierrätyksen mahdollisuuden. Tuhkan käyttökohteita on mahdollista löytää teollisuudesta, mutta näissä käyttökohteissa fosforia ei saada kiertoon. Tuhkaa varastoimalla poltto on itsenäinen ja markkinoista riippumaton tekniikka. Erillispoltto voi olla potentiaalinen ratkaisu erityisesti alueilla, joissa lietemäärät ovat suuria suhteessa lietetuotteiden kysyntään.

Talteenottotekniikoita polttotuhkan fosforin kierrätykseen kehitetään tällä hetkellä voimakkaasti. Saksassa ja Sveitsissä on lainsäädännöllä asetettu vaatimukset, joiden mukaan kierrätysreitti tuhkan fosforille täytyy löytyä noin 10 – 15 vuoden kuluessa. Näiden lainsäädännön velvoitteiden myötä teknisiä ratkaisuja kehitetään aktiivisesti. Potentiaalisten fosforin talteenottotekniikoiden kustannukset vaikuttavat tällä hetkellä korkeilta, mutta todellisia kustannuksia tekniikoiden vakiinnuttua ei vielä voida arvioida, koska tekniikat eivät ole tällä hetkellä tarpeeksi kehittyneitä.

5.3.7 Yhteispoltto

Yhteispoltto tarkoittaa lietteen polttoa muun materiaalin seassa esim. jätteenpolttolaitoksissa, voimalaitoksissa tai sementtiuuneissa. Yhteispoltto on Euroopassa hyvin yleistä, ja pelkästään Saksassa on n. 50 yhteispolttolaitosta. Tekniikan valmiusaste (TRL) on 9. Suomessa yhteispolttoa tehdään Haapaveden turvevoimalassa ja muutamissa metsäteollisuuden kattiloissa. Yhteispoltto ei yleensä mahdollista fosforin kierrätystä.

Yhteispolton etu on mahdollisuus käyttää olemassa olevaa polttolaitoskapasiteettia. Käytännössä vapaata polttokapasiteettia on kuitenkin Suomessa vähän, joten yhteispolton lisääminen kokonaan tasolla merkittävästi ei ole mahdollista.

Liete on lämpöarvoltaan alhaista ja voi aiheuttaa haasteita laitoksen operoinnissa, joten lietteen vastaanotto voi olla epäedullista polttolaitokselle. Useat laitokset eivät halua siksi vastaanottaa lietettä ja vastaanottohinnat ovat korkeita. Lietteiden poltto katsotaan jätteen poltaksi, joten lietteiden polttaminen voi vaatia muutoksen polttolaitoksen ympäristölupaan ja muutoksia savukaasujen monitorointiin tai käsittelyyn. Lisäksi lietteelle voidaan tarvita erilliset syöttöjärjestelyt.

Sementtiuunipoltossa termisesti kuivattu liete korvaa fossiilista polttoainetta, ja sen mineraaleja voidaan hyödyntää. Euroopassa tämä on yleinen sovelluskohde, ja Suomessakin tätä käyttöä on selvitetty sementin ja kevytsoran valmistuksessa. Lietteiden käyttö on teollisuuden kannalta kiinnostavaa erityisesti päästökaupan säästöpotentiaalin vuoksi.

Yhteispolttoa voidaan pitää potentiaalisena osittaisena lietteiden käsittelyn ratkaisuna erityisesti sellaisissa sovelluskohteissa, joissa lietteiden poltto ei vaadi suuria toimenpiteitä eikä aiheuta ongelmia polttoprosessissa. Erityisen suositeltavia ovat kohteet, joissa saavutetaan päästövähennyksiä fossiilisia polttoaineita korvaamalla. Fosforin kierrätys ennen polttoa tulisi kuitenkin ratkaista, jotta käsittely olisi kestävä ravinteiden kierrätyksen näkökulmasta.

6 YHTEENVETO

Lietteen termiselle käsittelylle on olemassa useita tekniikoita, joista osa on valmista ja laajalti käytössä olevaa tekniikkaa ja osa uudempia, vielä kehitysvaiheessa olevia tekniikoita. Terminen kuivaus, erillispoltto ja yhteispoltto ovat yleisesti käytettyjä tekniikoita, kun taas märkähiilto (HTC), torrefiointi, pyrolyysi ja kaasutus ovat lietteen käsittelyssä suhteellisen vähän käytettyjä tekniikoita.

Vaikka eri prosessien numeerisessa valmiusasteessa (TRL) ei ole suurta eroa, todellisuudessa joukossa on sekä tekniikoita, joista on vuosikymmenten kokemus, että tekniikoita, joista vasta ensimmäiset demonstraatiolaitokset ovat käynnissä. Osaa tekniikoista, kuten pyrolyysiä, märkähiiltoa ja fosforin talteenottotekniikoita polttotuhkasta, kehitetään hyvin aktiivisesti, ja ne voivat ottaa ratkaisevia kehitysaskelaita lähivuosina. Tässä selvityksessä käsiteltyjen tekniikoiden lisäksi on olemassa useita erilaisia termiseen käsittelyyn perustuvia lietteenkäsittelytekniikoita, jotka ovat vielä kehitystasalla. On mahdollista, että tulevaisuudessa myös jokin näistä tekniikoista nousee potentiaaliseksi ratkaisuksi.

Termit käsittelymenetelmät ovat kustannustehokkaita vain melko suurissa yksiköissä. Laitokset olisi taloudellisinta toteuttaa tekniikasta riippuen vähintään keskisuudessa kokoluokassa (> 5000 t TS/a), ja esimerkiksi leijupetipolton tapauksessa vielä huomattavasti tätä suurempana. Jos kaikki Suomen puhdistamolietteet käsiteltäisiin termisesti, se voitaisiin tehdä alle 20 keskisuudessa laitoksessa. Tällaisessa skenaariossa lietteen keskimääräiset kuljetusmatkat jäisivät alle 50 kilometriin. Suuren mittakaavan polttolaitoksia koko Suomeen mahtuisi korkeintaan noin viisi. Jos kaikki liete käsiteltäisiin viidessä optimaalisesti sijoitetussa laitoksessa, olisi keskimääräinen kuljetusmatka hieman yli 100 kilometriä. Keskitetyssä termisessä käsittelyssä lietteen mekaaninen kuivaaminen mahdollisimman korkeaan kuiva-ainepitoisuuteen on olennaista sekä kuljetettavan määrän että termisen käsittelyn energiatehokkuuden näkökulmasta.

Ratkaisevana tekijänä käsittelymenetelmää valittaessa on pidettävä lopputuotteen markkinoita. Uudella tekniikalla on voitava valmistaa sellaista tuotetta, jolla on kysyntää markkinoilla. Kestävyysnäkökulmasta olisi myös tärkeää, että valittavat tekniikat mahdollistavat fosforin kierrätyksen, ja olisivat hiilijalanjäljeltään mahdollisimman edullisia. Niiden tekniikoiden kohdalla, jotka eivät mahdollista fosforin kierrätystä, kierrätys voitaisiin hoitaa muulla tavoin ennen termistä käsittelyä, esimerkiksi talteenottokäsittelyllä joko jätevedestä tai lietteestä. Termisellä käsittelyllä tulisi myös pystyä varmistamaan, että lietteestä valmistettu tuote täyttää sille asetetut laatuvaatimukset ja on käyttökohteessaan pitkälläkin aikavälillä turvallista huomioiden niin mikrobiologiset tekijät ja haitalliset metallit kuin myös orgaaniset haitta-aineet, lääkeaineet ja mikromuovit.

Terminen kuivaus, torrefiointi ja pyrolyysi tuottavat maanparannusaineeksi soveltuvia tuotteita, ja mahdollistavat siten fosforin kierrätyksen ilman erityistä fosforin talteenottokäsittelyä. Markkinoiden todellisesta kysynnästä laajassa mittakaavassa ei ole kuitenkaan vielä riittävästi tietoa ja kokemusta. Olennaista on, voidaanko tekniikoiden osoittaa poistavan haitalliset aineet riittävän tehokkaasti. Nykytietämyksen mukaan pyrolyysillä voidaan päästä näistä tekniikoista parhaaseen orgaanisten haitta-aineiden, lääkeaineiden ja mikromuovien poistoon. Termisellä kuivauksella ei saavuteta näiden aineiden merkittävää poistoa, ja torrefiointin osalta tutkimusta tarvittaisiin lisää.

Märkähiillolla käsitellyn lietteen soveltuvuudesta lannoitevalmistukseen ei ole tällä hetkellä riittävästi tietoa. Polttoainekäytössä hiilituote poltetaan yleensä yhdessä muun polttoaineen kanssa, mikä ei luo edellytyksiä kannattavaan fosforin talteenottoon tuhkasta. Märkähiillolla käsitellyn lietteen erillispoltosta ja mahdollisuudesta erottaa fosfori näin tuotetusta tuhkasta ei tällä hetkellä ole riittävästi tietoa. Märkähiiltotekniikkaan on myös kehitteillä fosforin talteenottotekniikoita, joissa fosfori pyritään erottamaan omaksi jakeekseen ennen hiilituotteen polttoa.

Lietteen kaasutus ja erillispoltto tuottavat tuhkaa, jota voidaan nykyisin hyödyntää materiaalina. Tuhkaan jäävän fosforin kierrätys vaatisi erillistä talteenottokäsittelyä, sillä nykyinsäädäntö ei mahdollista tuhkan suoraa lannoitekäyttöä. Tekniikoita fosforin talteenottoon tuhkasta kehitetään hyvin aktiivisesti, mutta niiden käyttöönottoa hidastaa käsittelyn tällä hetkellä korkea hinta. Lietteen yhteispoltossa fosforia ei yleensä voida kierrättää, joten yhteispoltto-ovellutuksissa fosforin talteenotto tulisi toteuttaa ennen polttoa.

Kaikista tekniikoista ei ole vielä tarpeeksi tietoa koskien lääkeaineiden, orgaanisten haitta-aineiden ja mikromuovien poistoa prosessissa. Termisen kuivauksen tiedetään olevan riittämätön näiden aineiden tehokkaaseen poistoon, kun taas märkähiillon ja torrefioinnin tehokkuudesta näiden aineiden poistossa tarvittaisiin lisää tietoa. Torrefioinnin ja pyrolyysin osalta tarvittaisiin tietoa myös siitä, kuinka hyvin PAH-yhdisteiden sitoutumista tuotteeseen voidaan teknisin ratkaisuin hallita. Kaasutus ja polttotekniikat ovat tehokkaita mainittujen haitta-aineiden poistossa, mutta kaasutuksen tapauksessa tulee huomioida PAH-yhdisteiden mahdollinen sitoutuminen tuhkaan. Suomessa pilotoidaan lähitulevaisuudessa pyrolyysiä ja märkähiiltoa varsin suurella mittakaavalla, ja kokeiden odotetaan lisäävän tietoa mm. haitallisten aineiden vähenemisestä näissä prosesseissa.

Kaikkien termisten käsittelymenetelmien osalta tulee lisäksi huomioida, että materiaalin kuivamassan vähentyessä haitalliset metallit konsentroituvat tuotteeseen, ja pitoisuudet voivat joissain tapauksissa ylittää lannoitevalmisteille sallitut arvot.

Lietteen termisten käsittelymenetelmien hiilijalanjälkivaikutus vaihtelee merkittävästi tekniikoiden välillä. Tärkeimpiä hiilijalanjälkeen vaikuttavia tekijöitä ovat energian kulutus ja tietyillä tekniikoilla kemikaalien kulutus, tuotetut jätteet sekä käsittelyn suorat kasvihuonekaasupäästöt. Tuotteiden käytöllä voidaan välttää päästöjä hyödyntämällä lietteen energiasisältöä, ravinteita tai mineraaleja. Merkittävimmät vältetyt päästöt saavutetaan silloin, kun lietteen energialla voidaan korvata fossiilista polttoainetta. Myös lannoitekäytössä voidaan päästöjä välttää merkittävässä määrin. Termisissä menetelmissä kuitenkin yleensä menetetään typpeä, jolloin menetetään myös mahdollisuus typpi-lannoitteiden tuotannon päästöjen välttämiseen.

Laskelmien perusteella positiivinen päästöjen ja päästöhyvitysten nettovaikutus saavutetaan märkähiillokäsittelyllä ja lietteen poltolla sementtiuunissa. Muilla termisillä menetelmillä päästöt ovat päästöhyvityksiä suurempia. Tuotteen käyttökohde ja sillä saavutettavat päästöhyvitykset vaikuttavat merkittävästi hiilijalanjälkeen; erityisen selkeästi tämä näkyy sementtiuunipoltossa, jossa lietteen energialla voidaan korvata fossiilista kivihiiltä tai koksia. Hiilijalanjäljen ohella tulee käsittelyn kokonaiskestävyyden kannalta huomioida myös muita tekijöitä, erityisesti fosforin kierrätettävyys.

Tekniikoiden kehitykseen vaikuttaa vahvasti valmisteilla oleva uusi EU:n lannoitelainsäädäntö sekä eri maiden kansalliset lainsäädännöt. EU:n tuleva lainsäädäntö tulee mahdollistamaan jätepohjaisen tuotteiden rekisteröintiä EU:n laajuisesti hyväksytyiksi lannoitteiksi. Puhdistamolietteestä valmistetuille tuotteille asetetaan kuitenkin rajoituksia ja vaatimuksia mm. valmistustapojen ja tuotteiden laadun osalta. Lainsäädännön valmistelu on vielä kesken, eivätkä lopulliset vaatimukset EU-lannoitteille ole tiedossa. EU-maat voivat hyväksyä kansallisesti lannoitevalmisteiksi myös sellaisia tuotteita, jotka eivät täytä EU-lannoitteille asetettuja vaatimuksia. Suomessa uuden kansallisen lannoitelainsäädännön valmistelu aloitetaan sen jälkeen, kun EU:n uusi lainsäädäntö on vahvistettu.

7 VIITTEET

Albrecht, R.B. et al. (1997). Sludge treatment and disposal. Management approaches and experiences. Document by ISWA's Working group on Sewage&Wasteworks Sludge. European Environment Agency. Environmental Issues Series No. 7. 54 s.

Atienza-Martinez, M., Fonts, I., Abrego, J., Ceamanos, J., Gea, G., (2013). Sewage sludge torrefaction in a fluidized bed reactor. Chem. Eng. J. 222, 534–545.

AVA-CO2 (2010) Questions & Answers - AVA-CO2 and Hydrothermal Carbonisation (HTC). October 2010, AVA-CO2

AVA-CO2 (2012). Energy of the Future. AVA-CO2 Schweiz AG. Viitattu 26.4.2019. Saatavilla: <http://duene-greifswald.de/doc/rrr2013/talks/HTC.pdf>

AVA-CO2 (2015) AVA-CO2 develops phosphorus recovery process. *Membrane Technology*, pp.1-6.

Bioenergy International (2017a). Black is the new green with Swedish “Torr-How”. Bioenergy International Pellets Special 3/2017, s. 16-18.

Bioenergy International (2017b). Baltania plans to invest in an industrial scale torrefaction biocoal plant in Estonia. Bioenergy International, Pellets & Solid Fuels 24.11.2017. Viitattu 27.2.2019. Saatavilla: <https://bioenergyinternational.com/pellets-solid-fuels/baltania-plans-invest-industrial-scale-torrefaction-biocoal-plant-estonia>

Bridle, T. R. & Pritchard, D. (2004). Energy and nutrient recovery from sewage sludge via pyrolysis. *Water Science and Technology*, 50(9), 169-175.

Bucheli, T., Hilber, I. & Schmidt, H. (2015) Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated aromatic compounds in biochar. *Biochar environmental management - science, technology and implementation*, Lehmann J. & Joseph S. (eds.), pages. 595-624. Routledge, Oxon.

Butler, E. (2019). Vastaus tiedusteluun, henkilökohtainen sähköposti. Sülze-Kopf Syngas GmbH. Kontaktihenkilö Eoin Butler.

Buttmann, M. (2018). Industrial Scale Plant for Sewage Sludge Treatment by Hydrothermal Carbonization in Jining/China and Phosphate Recovery by Terranova® Ultra HTC Process. TerraNova Energy GmbH. Viitattu 20.3.2019. Saatavilla: <https://www.aquaenviro.co.uk/wp-content/uploads/2018/04/Marc-Buttmann-final.doc.pdf>

Campos, A., Judex, J. (2018) P-recovery potential from thermal gasified sludge. Sülze-Kopf Syngas. Phosphorus recovery from wastewater - IWA Sweden seminar, Malmö 11.4.2018.

Carrington, E. G. 2001. Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction, final report. Study contract No B4-3040/2001/322179/MAR/A2 for the European Commission directorate – general environment.

Cohen, Y. (2018). Ash2Phos - Clean commercial phosphorus products from sewage sludge ash. Phosphorus recovery from wastewater - IWA Sweden seminar, Malmö 11.4.2018.

C-Green (2019). C-Green's response to inquiry from Pöyry 2019-01-28 (julkaisematon). Kontaktihenkilö: Peter Axegård, C-Green Technology AB.

Dhir, R., Ghatoora, G., Lynn, C. (2017) Sustainable Construction Materials, 1st Edition Sewage Sludge Ash. Woodhead Publishing 2017. ISBN 9780081009871

Earto (2014). The TRL Scale as a Research & Innovation Policy Tool, EARTO Recommendations. Viitattu 13.2.2019. Saatavissa:

https://www.earto.eu/wp-content/uploads/The_TRL_Scale_as_a_R_I_Policy_Tool_-_EARTO_Recommendations_-_Final.pdf

Ekpo, U., Ross, A., Camargo-Valero, M., Williams, P. (2016) A comparison of product yields and inorganic content in process streams following thermal hydrolysis and hydrothermal processing of microalgae, manure and digestate. *Bioresource Technology*, 200. 951 - 960. ISSN 0960-8524

Energie Forum Karlsruhe. Internet-sisältö. Viitattu 25.2.2019. Saatavilla: <http://energieforum-karlsruhe.de/de/energie-hot-spots/ava-co2/>

Escala, M., Zumbühl, T., Koller, C., Krebs, R. (2011). Machbarkeitsstudie BAFU 2011 Schlussbericht: Hydrothermale Carbonisierung von Klärschlamm. ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen.

Evira (2017). Eviran määräys kansallisesta lannoitevalmisteiden tyyppinimiluettelosta. Määräyksen nro 1/2016, 18.3.2016. Konsolidoitu versio 27.12.2017.

Finnsementti (2019). Henkilökohtainen sähköposti. Yhteyshenkilö: Ursula Kääntee.

Flaga, A. (2007) Sludge Drying. Institute of Heat Engineering and Air Protection, Cracow University of Technology. Viitattu 21.2.2019. Saatavilla:

https://www.kth.se/polopoly_fs/1.650795.1550157791!/JPS13p71.pdf

Fjäder, P. (2016). Yhdyskuntajätevesilietteiden maatalouskäytön ja viherrakentamisen riskit RUS-SOA I-III Loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 43. 58 s. + liitteet.

Fonts, I., Gea, G., Azuara, M., Ábrego, J., & Arauzo, J. (2012). Sewage sludge pyrolysis for liquid production: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(5), 2781-2805.

Hamburg Wasser (2019). Hamburg Wasser und Remondis bauen die weltweit erste Recycling-anlage für Phosphor. Viitattu 4.6.2019. Saatavilla:

<https://www.hamburgwasser.de/privatkunden/unternehmen/presse/hamburg-wasser-und-remondis-bauen-die-weltweit-erste-recycling-anlage-fuer-phosphor/>

HELCOM (2017) Recommendation 38/1 on Sewage Sludge Handling. Saatavilla:

<http://www.helcom.fi/Recommendations/Rec%2038-1.pdf>

Hey, T.; Koch, T.; la Cour Jansen, J. (2017) Reseberättelse från studieresa i Tyskland till reningsverk med termisk slamförgasning. VA-Teknik Södra. Rapport Nr. 07, 2017.

HSY (2019) Selvitys lietehiilen lupaprosesseista viranomaisten näkökulmasta. Pöyry Finland Oy, 21.1.2019.

Huygens, D., Saveyn, H., Tonini, D., Eder, P. & Sancho, D. (2018). Pre-final STRUBIAS Report. DRAFT STRUBIAS recovery rules and market study for precipitated phosphate salts & derivatives,

thermal oxidation materials & derivatives and pyrolysis & gasification materials in view of their possible inclusion as Component Material Categories in the Revised Fertiliser Regulation.

Ingelia. The Ingelia patented HTC plant. Internet-sisältö. Viitattu 25.2.2019. Saatavilla: <https://ingelia.com/index.php/modelo-negocio/carbonizacion-de-biomasa/?lang=en>

Inoue, K. (2007) The Plan for Mitigation of Global Warming by Tokyo Metropolitan Sewerage Bureau - Earth Plan 2004. Viitattu 22.2.2019. Saatavilla: <https://www.niph.go.jp/soshiki/suido/pdf/h21JPUS/abstract/r2-4.pdf>

ISY (2008). Itä-Suomen Ympäristölupavirasto. Päätös Nro 112/08/2, Dnro ISY-2008-Y-85. Kuhasalon jätevedenpuhdistamon ympäristölupa, Joensuu.

Jagaba, A.H., Shuaibu, A., Umaru, I., Musa, S., Lawal, I.M. and Abubakar, S. (2019). Stabilization of Soft Soil by Incinerated Sewage Sludge Ash from Municipal Wastewater Treatment Plant for Engineering Construction. *Sustainable Structures and Materials, An International Journal*, 2(1), pp.32-44.

Jin et al. (2016). Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials*

Jones, A. (2017) Sewage Sludge Gasification as an Alternative to Incineration. Proceedings of the Water Environment Federation, Residuals and Biosolids 2017, pp. 415-427(13). Water Environment Federation DOI: <https://doi.org/10.2175/193864717821496329>

Jääskeläinen, A. (2009). Tutustumiskierros keskitetyille biokaasulaitoksille 14.9.- 15.9.2009. Savonia-ammattikorkeakoulu. Viitattu 14.3.2019. Saatavilla: https://portal.savonia.fi/img/amk/sisalto/teknologia_ja_ymparisto/ymparistotekniikka/Biokaasulaitos_kierros%20syyskuu%2009.pdf

Kainulainen, A. (2017). Biomassojen innovatiiviset hyödyntämismenetelmät – projektin julkinen loppuraportti. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY 14.8.2017.

Karki, S., Poudel, J., Cheon, S. (2018) Thermal Pre-Treatment of Sewage Sludge in a Lab-Scale Fluidized Bed for Enhancing Its Solid Fuel Properties. *Appl. Sci.* 2018, 8, 183

Kawasaki, M. (2010) Sewage Sludge Gasification. Cover story, Highlighting Japan, December 2010. Viitattu 11.3.2019. Saatavilla: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KAWASAKI%202010%20Sewage%20Sludge%20Gasification.pdf

Koch, T. (2018) Potential benefits for P-recovery by sludge gasification. Phosphorus recovery from wastewater - IWA Sweden seminar, Malmö 11.4.2018.

Lakeuden Etappi (2019). Vuosikertomus 2018. Käsittely ja hyödyntäminen. Viitattu 25.5.2019. Saatavilla: <https://julkaisut.etappi.com/vuosikertomus-2018/kasittely-ja-hyodyntaminen/>

Lassi, U.; Wikman, B. (toim.) (2011). Biomassan kaasutus sähköksi, lämmöksi ja biopolttoaineiksi. HighBio-projektijulkaisu. Jyväskylän yliopisto, Kokkolan yliopistokeskus Chydenius.

Lemming, C., Scheutz, C., Bruun, S., Jensen, L.S. and Magid, J. (2017). Effects of thermal drying on phosphorus availability from iron-precipitated sewage sludge. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 180(6), pp.720-728.

- Lin, D.F., Lin, K.L. and Luo, H.L. (2007). A comparison between sludge ash and fly ash on the improvement in soft soil. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 57(1), pp.59-64.
- Lohiniva E, Mäkinen T, Sipilä K. (2001). Lietteiden käsittely – Uudet ja käytössä olevat tekniikat. VTT Tiedotteita.
- Luke (2018) Jätevesilietteiden käyttö lannoitteena ei ole uhka ruokaturvalle. Uutinen 10.4.2018. Luonnonvarakeskus. Viitattu 4.6.2019. Saatavilla: <https://www.luke.fi/uutiset/jatevesilietteiden-kaytto-lannoitteena-ei-ole-uhka-ruokaturvalle/>
- Mendler (2012). Positionspapier zur hydrothermale Carbonisierung (HTC-Verfahren). Hunziker Betatech AG 11. Winterthur, Dezember 2012.
- NEVE (2018) Rovaniemelle nousee lietteenpolttolaitos. Napapiirin Energia ja Vesi Oy. Tiedote 11.4.2018. Viitattu 8.3.2019 Saatavilla: <https://www.epressi.com/tiedotteet/kaupungit-ja-kunnat/rovaniemelle-nousee-lietteenpolttolaitos.html>
- Ojanen, P. (2001) Sellu- ja paperitehtaiden lietteiden käsittely ja hyötykäyttö sekä niitä rajoittavat tekijät. Kaakkois-Suomen ympäristökeskus, Alueelliset ympäristöjulkaisut 223.
- Ortner & Hensler (1995). Beurteilung von Kunststoffbränden. Bei einer Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs entstehende Stoffe nach den Anhängen II - IV der 12. BImSchV. (saksankielinen)
- Paganus, R. (2019). Henkilökohtaiset keskustelut ja sähköpostiviestit 12.3.2019, 13.3.2019, 23.4.2019, 21.5.2019. Riitta Paganus, Käyttömestari, Joensuun Vesi.
- Pakarinen, J (2014). Kotihoidon optimointi. Pro gradu -tutkielma. Itä-Suomen yliopisto 28.1.2014. Viitattu 20.5.2019. Saatavilla: http://cs.uef.fi/sipu/2014_MSc_Pakarinen_Joni.pdf
- Pekkala, S. (2019) Rovaniemen lietteenpolttolaitos – tilannekatsaus. Satu Pekkala 16.1.2019. Napapiirin Energia ja Vesi Oy
- PSAVI (2013). Lietteen termisen kuivainlaitoksen ympäristöluvan lupamääräysten tarkistaminen, Haapavesi. Lupapäätös nro 20/2013/1. Dnro PSAVI /313/04.08/2010. Pohjois-Suomen Aluehallintovirasto 5.3.2013.
- Poudel, J.; Ohm, T.; Lee, S.H.; Oh, S.C. (2015). A study on torrefaction of sewage sludge to enhance solid fuel qualities. *Waste Manag.* 2015, 40, 112–118.
- Pulka, J.; Manczarski, P.; Koziel, J.A.; Białowiec, A. (2019) Torrefaction of Sewage Sludge: Kinetics and Fuel Properties of Biochars. *Energies* 2019, 12, 565.
- Pöyry (2018) Baltania OÜ and Pöyry sign EPCM services assignment for first industrial scale Torrefied Pellet Plant. Pöyry PLC, Press release 21.11.2018. Viitattu 27.3.2019. Saatavissa: <https://www.poyry.com/news/baltania-ou-and-poyry-sign-epcm-services-assignment-for-first-industrial-scale-torrefied-pellet-plant>
- Pöyry Switzerland (2017) Best Practices in Western Europe – Sewage Sludge Management and Incineration in Western Europe. Technical report. Pöyry Switzerland Ltd. 30.11.2017.
- Pöyry Switzerland (2018). Supercritical Water Gasification of Sewage Sludge. Business case study of sewage sludge treatment options. Pöyry Switzerland Ltd. 28.6.2018.

Ribeiro, J., Godina, R., Matias, J., & Nunes, L. (2018). Future Perspectives of Biomass Torrefaction: Review of the Current State-Of-The-Art and Research Development. *Sustainability*, 10(7), 2323.

Ruuhela, S. (2016). Puhdistamolietteen käsittelyn hankinnan laatukriteerien kehittäminen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Luonnontieteiden tiedekunta, Kemian ja biotekniikan laitos.

Sitra (2007) Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukyky -selvitys. Pöyry Environment Oy. ISBN 978-951-563-597-6

Snowden-Swan, L. et al. (2016) Hydrothermal Liquefaction and Upgrading of Municipal Wastewater Treatment Plant Sludge: A Preliminary Techno-Economic Analysis. Pacific Northwest National Laboratory Richland, Washington 99352

Susteen (2019). Susteen technologies. Internet-sisältö. Viitattu 6.4.2018. Saatavilla: <https://susteen-tech.com/en/technology>

STELA (2019). Digestate belt dryer. STELA Laxhuber GmbH. Viitattu 21.2.2019. Saatavilla: https://www.stela.de/en/app/media/resource/_j59hqe5e.deliver?&layout=og.pdf&mode=download

Sülzle-Kopf. SynGas sewage sludge utilization. Internet-sisältö. Viitattu 11.3.2019. Saatavilla: <https://suelzle-kopf.de/en/syngas/references>

Thamer, D & Jenewin, W. (2016). Safe sludge disposal calls for thermal drying methods. *Water & Wastewater International*. 1.6.2006. Viitattu 21.2.2019. Saatavilla: <https://www.waterworld.com/articles/wwi/print/volume-21/issue-3/roundup/sludge-management/safe-sludge-disposal-calls-for-thermal-drying-methods.html>

Thornberg, D. (2018). Working towards P-recovery from sludge ash in Copenhagen. BIOFOS. Phosphorus recovery from wastewater - IWA Sweden seminar, Malmö 11.4.2018.

Tervahauta, E. (2015). Metsäkuljetusmatkan määrittäminen ja mittauskäytännöt. Opinnäytetyö, Metsätaloussinööri (AMK). Lapin ammattikorkeakoulu, Luonnonvara- ja ympäristöala, Metsätalouden koulutusohjelma. Viitattu 20.5.2019. Saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/91294/Tervahauta_Erika.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Tilastokeskus (2013). Linnunteitä oikeille teille. Artikkelit 9.12.2013. Viitattu 20.5.2019. Saatavilla: https://www.stat.fi/artikkelit/2013/art_2013-12-09_003.html?s=0

TJL (2003) Jätteen ja jätevesilietteen käsittelyn kehittäminen. Ympäristövaikutusten arviointiohjelma. Turun jätelaitos ja Turun Seudun Puhdistamo Oy.

Tokyo Bureau of Sewerage (2010). Kiyose Water Reclamation Center Starts Using Gasification System to Treat Sewage Sludge. Tokyo Bureau of Sewerage, September 2010. Internet-sisältö. Viitattu 11.3.2019. Saatavilla: http://www.gesui.metro.tokyo.jp/english/news/r_and_r08/

Toru, O. (2006). Making Fuel Charcoal from Sewage Sludge for Thermal Power Generation Plant – First in Japan. Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government. Viitattu 15.2.2019. Saatavilla: <http://www.gesui.metro.tokyo.jp/english/pdf/tp0701.pdf>

UBA (2013). Sewage Sludge Management in Germany. Umweltbundesamt. Julkaistu 1.9.2013.

UNEP (2004) General Technical Guideline on the Environmentally Sound Management of Wastes Consisting of, Containing or Contaminated with Persistent Organic Pollutants. Open-ended Work-

ing Group Report of the Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal.

VVY (2017) Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 46. Suomen Vesilaitosyhdistys ry.

VVY (2018) Lietteiden hyödyntäminen ilman maatalouskäyttöä -hankkeen loppuraportti. Vesilaitosyhdistys 2018.

Veolia (2019) Bioco Solutions. Tuote-esite (julkaisematon), Veolia Water Technologies. Kontaktihenkilö Pauli Hyvärinen.

Vieno, N. 2015. Haitta-aineet puhdistamo- ja hajalietteissä. Vantaanjoen ja Helsingin seudun vesiensuojeluyhdistys ry. Julkaisu 73/2015.

Vieno, V., Sarvi, M., Salo, T., Rämö, S., Ylivainio, K., Pitkänen, T. ja Kusnetsov, J. (2018). Puhdistamolietteiden sisältämien haitta-aineiden aiheuttamat riskit lannoitekäytössä. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 58/2018. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 129 s.

Weiner, B., Baskyr, I., Poerschmann, J., & Kopinke, F. D. (2013). Potential of the hydrothermal carbonization process for the degradation of organic pollutants. *Chemosphere*, 92(6), 674-680.

Werther, J. & Ogada, T. 1999. Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 25, s. 55–116.

Winnfors, E. (2019) Återvinning av fosfor på gång i Tyskland. *Cirkulation* 2/2019. Viitattu 13.3.2019. Saatavilla: <https://www.cirkulation.se/artiklar-och-notiser/%C3%A5tervinning-av-fosfor-paa-gaang-i-tyskland>

Ylivainio, K., Jermakka, J., Wikberg, Hanne & Turtola, E. (2019). Lämpökemiallisen käsittelyn vaikutus jätevesilietefosforin lannoitusarvoon : Jätevesien fosfori kiertoön lannoitteeksi (PREcover) -hankkeen loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 3/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 67 s.

Youichi, Koga; Hiroshi, Oonuki; Takeshi, Amari; Yuuki, Endo; Kazuaki, Kakurata; Kimitoshi, Ose (2007) Solid Fuel Production from Sewage Sludge with Pyrolysis and Co-firing in Coal Power Plant. Mitsubishi Heavy Industries Ltd. Technical Review Vol. 44 No. 2, July 2007. Viitattu 15.2.2019. Saatavilla: <https://pdfs.semanticscholar.org/ac98/f43db3806cb5b2681ec6994097802e4eb9e9.pdf>

Yuan et al. (2015) Sewage sludge biochar: Nutrient composition and its effect on the leaching of soil nutrients

LIITTEET

LIITE 1 MUOVIEEN HAJOAMISLÄMPÖTILAT

LIITE 1 MUOVIEEN HAJOAMISLÄMPÖTILAT

Muovilaji Plastic Type				Esiintyminen Main Utilisation	Osa kokonaisku- lutuksesta maailmassa Percentage of Global Use	Hajoamis- lämpötila Destruction Temperature
Luokka	Alaluokka	Laji	Lyhennys			
Kestomuovit Thermoplasts	Polyolefiinit	Polyeteeni	PE	pakkauksia, kaapelit, putket, koneosat	32%	340-440
		Polypropeeni	PP	pakkauksia, kotelot, kankaat, putket, koneosat	23%	330-410
	Vinylkloridit	Polyvinyyli	PVC	rakennusosat, putket, lattiat, tekonahka, kaapelit	16%	200-300
	Styreenipolymeerit	Polystyreeni	PS	eristeet, pakkaukset, koneosat	10%	300-400
	Polyester	Polykarbonaatti	PC	korva lasia eri käyttötarkoituksessa	1%	350-400
		Polyetyleentereftalaatti	PTP	rakennusosat		285-305
		Polyetylentereftalatti	PET	pakkauksia, kankaat	7%	285-305
	Akryylihartsi	Polymetyylimeta-akryylatti	PMMA	rakennusosat, lattiat, kankaat		170-330
	Polyamiidit		PA	sähkötekniikka, kankaat, kuidut	1%	300-350
	Polyfenyleenit	Polyfenyleenoksidi	PPO	koneosat		200
		Polyfenyleensulfidi	PPS	koneosat		700
		Polyeeterisulfonit	PES, PSU, PSO	palonesto, membranit		380
	Polyoksimetyyleeni		POM	koneosat, vetokedjut		220
	Seluloosaeteri		"SE"	liimat, pesuaineet, kosmetiikka, lääke- ja kangasteollisuus		225-230
	Seluloosaesteri		CN, CA, CP, CAB	Kankaat, savukesuodattimet, kampaat		225-230
Fluoripolymeerit	Polytetrafluorietyyleeni	PTFE	pinnoitus: putket, keittiöastiat, kankaat, korut		510-540	
	Polyvinyyli-idenfluoriidi	PVDF	putkipinnoite, pakkaukset, Li-akut, kaiutimet		340	
	Polyvinyylifluoriidi	PVF	kalvot, metallipinnoitus		350	
	Polyklooritrifluorietyyleeni	PCTFE	koneosat, pakkaukset		350	
Kertamuovit One-Way Plastics	Fenoplastit		"FP"	koneosat		270-400
	Polyuretaanit		PUR	eristeet, pinnoitukset, liimat, kengät, patjat, kondoomit	6%	200-220
	Aminoplastit		UF, MF	liima (esim. lastulevyssä)		350-400
	Tyydyttömättömät polyesterit	Polyesterihartsit	"PH"	koneosat, säiliöt		140
	Epoksidihartsit		EP	liima, lattiat, lakat		250-450
Polyimidit		PI	lakat, membranipinnoitus		500	
					96%	

Muovien hajoamislämpötilat (Ortner & Hensler 1995)