

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LUT School of Engineering Science
Kemiantekniikan koulutusohjelma

Harto Rätty

LIETTEIDEN VEDENPOISTON TEKNIS- TALOUDELLINEN TARKASTELU

Työn tarkastaja: Professori Satu-Pia Reinikainen ja TkT Eeva Jernström

Työn ohjaaja: DI Samuli Nikkanen, Saimia

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Engineering Science
Kemiantekniikan koulutusohjelma

Harto Rätty

Lietteiden vedenpoiston teknis-taloudellinen tarkastelu

Diplomityö

2019

80 sivua, 29 kuvaa, 19 taulukkoa ja 0 liitettä

Tarkastajat: Professori Satu-Pia Reinikainen ja TkT Eeva Jernström

Ohjaaja: DI Samuli Nikkanen, Saimia

Hakusanat: bioliete, laserkäsittely, märkäpyrolyysikäsittely, teknis-taloudellinen tarkastelu

Diplomityössä tutkittiin biolietteen laserkäsittelyä ja märkäpyrolyysiä sekä biohiilen toimivuutta seka- ja biolietteen suodatuksen tukiaineena. Diplomityön tavoitteena oli arvioida ovatko biolietteen esikäsittelymenetelmät teknisesti ja taloudellisesti toteuttamiskelpoisia. Teknistä puolta arvioitiin suodatus tulosten perusteella. Taloudellisesta puolta arvioitiin esimerkki laskelmien avulla. Biohiilen toimivuutta seka- ja biolietteen suodatuksen tukiaineena arvioitiin suodatustulosten perusteella.

Työ teoriaosuudessa esiteltiin tyypillinen jätevedenpuhdistamo ja jätevedenpuhdistamolla syntyvät lietteet. Käytiin läpi lietteenkäsittelyn nykyiset menetelmät ja lietteen loppusijoitus vaihtoehdot. Esiteltiin laser- ja märkäpyrolyysikäsittely. Työn kokeellisessa osassa suoritettiin laboratorio mittakaavan esikäsittely- ja suodatuskokeet.

Suodatus tulosten perusteella laserkäsittely ei paranna biolietteen kuiva-ainepitoisuutta. Taloudellisia laskelmia ei tehty työn aikana, koska ei kyetty määrittämään minkälainen laser soveltuu biolietteenesikäsittelyyn. Sopivan laserin löytäminen biolietteenesikäsittely vaatii jatkotutkimuksia.

Suodatus tulosten perusteella märkäpyrolyysikäsittely parantaa biolietteen kuiva-ainepitoisuutta. Käsitellyn biolietteen kuiva-ainepitoisuus vaihteli 14,9 prosentista 28,5 prosenttiin. Referenssi näytteen kuiva-ainepitoisuus oli 12,0 %. Märkäpyrolyysikäsittely nostaa biolietteen lämpöarvoa ja nopeuttaa suodattumista. Alustavien kannattavuuslaskelmien perusteella biolietteen märkäpyrolyysikäsittelyä ei todettu kannattavaksi.

Suodatus tulosten perustella biohiilen käyttö suodatus apuaineena nopeutta suodattamista. Nopein suodatusaika oli seitsemän kertaa nopeampi kuin referenssi suodatus. Biohiilen käyttö ei paranna biolietteen kuiva-ainepitoisuutta.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology

LUT School of Engineering Science

Degree Program of Chemical Engineering

Harto Rätty

Techno-economic analysis of sludge dewatering

Master's thesis

2019

80 pages, 29 figures, 19 tables and 0 appendices

Examiners: Professor Satu-Pia Reinikainen and D.Sc. (Tech.) Eeva Jernström

Supervisor: M.Sc. (Tech.) Samuli Nikkanen, Saimia

Keywords: biosludge, laser treatment, HTC treatment, techno-economic analysis

This master's thesis studied use of laser and hydrothermal carbonization (HTC) for treatment of biosludge. In addition, the usage of filter aids in the filtration of sludge was studied. The aim of the thesis was to evaluate the feasibility of technically and economically feasible methods for pre-treatment of biosludge. The technical side was evaluated by filtration tests. The economic side was estimated by using example calculations. The usage of filter aids in the filtration was evaluated by filtration results.

The theoretical part introduced a typical wastewater treatment plant, sewage sludge's, current methods of sludge treatment, sludge disposal options and laser and HTC treatment. In the experimental part, performed a laboratory scale pre-treatment and filtration tests.

Based on filtration results, the laser treatment not improved the dry content of biosludge. Financial calculations not done because during thesis can't find a laser which is suitable for treatment of biosludge.

Based on filtration results, the HTC treatment improved the dry content of biosludge. HTC treated biosludge dry content varies 14,9 % to 28,5 %. The reference sample dry content was 12,0 %. HTC treatment improved biosludge calorific value and filtration rate. By preliminary profitability calculations HTC treatment not found profitable.

Based on filtration results, the usage of filter aids in the filtration improved filtration rate. The fastest filtration rate was seven time faster than the reference sample

filtration rate. The usage of filter aids did not improve the dry content of biosludge.

Käytetyt lyhenteet

EPS	Solunulkopuoliset pitkäketjuiset yhdisteet (extracellular polymeric substances)
CO ₂ -laser	Hiilidioksidilaser
CW-laser	Jatkuvatehoinen laser (continuous wave laser)
HTC-	
käsittely	Märkäpyrolyysikäsittely (hydrothermal carbonization treatment)
HTC-hiili	Märkäpyrolyysissä syntyvä hiilipitoinen tuote
KAP	Kuiva-ainepitoisuus, %
m ₁	Astian massa, g
m ₂	Kuivan lietenäytteen ja astian massa, g
m	Märän lietenäytteen massa, g
PSD	Partikkelikokojakauma (Particle size distribution)

Sisällysluettelo

1 Johdanto	9
1.1 Työn rajaus ja tavoitteet	10
2 Jätevedenkäsittely ja syntyvät lietteet	10
2.1 Jätevedenkäsittelyprosessi	10
2.2 Lietteet	12
2.2.1 Metsäteollisuudenlietteet.....	12
2.2.2 Yhdyskuntalietteet.....	14
2.2.3 Biolietteen vedenpoisto-ominaisuudet	16
3 Lietteidenkäsittely	18
3.1 Lietteidenesikäsittely	21
3.1.1 Tiivistys	21
3.1.2 Stabilointi	23
3.1.3 Kunnostus	26
3.2 Lietteiden mekaaninen vedenerotus	28
3.2.1 Ruuvipuristin	30
3.2.2 Suotonauhapuristin.....	30
3.2.3 Linko	31
3.3 Lietteen terminen kuivaus	32
3.3.1 Lietteen suorat kuivaimet	33
3.3.2 Lietteen epäsuorat kuivaimet	34
3.3.3 Biolietteen kuivaus sellutehtaan haihduttamalla.....	34
4 Lietteiden loppusijoitus	36
4.1 Metsäteollisuuden lietteet	36
4.1.1 Lietteen poltto	36
4.1.2 Muut loppusijoitus vaihtoehdot.....	37
4.2 Yhdyskuntalietteet	38
4.2.1 Yhdyskuntalietteen hyötykäyttö.....	38
4.2.2 Yhdyskuntalietteen poltto	40
5 Biolietteen uudet esikäsittelymenetelmät	42
5.1 Biolietteen laserkäsittely	42

5.1.1	Laser	42
5.1.2	Laserit ja prosessiparametrit	44
5.1.3	Laserin vaikutusmekanismi materiaaliin ja soluihin.....	47
5.2	Biolietteen märkäpyrolyysi	49
5.2.1	Prosessiparametrit	51
5.2.2	Märkäpyrolyysin mahdolliset tuotteet.....	52
5.2.3	Teollisen mittakaavan märkäpyrolyysi prosessi	52
6	Lietteen esikäsittelymenetelmien teknillinen ja taloudellinen tarkastelu	54
6.1	Suodatus ja analyysimenetelmät.....	54
6.1.1	Suodatus	54
6.1.2	Analyysimenetelmät.....	57
6.2	Laserkäsittely.....	58
6.2.1	Tulokset.....	59
6.2.2	Taloudellinen tarkastelu	61
6.3	Märkäpyrolyysikäsittely	61
6.3.1	Tulokset.....	63
6.3.2	Taloudellinen tarkastelu	64
6.4	Biohiili suodatuksen tukiaineena.....	66
6.4.1	Tulokset.....	67
7	Pohdintaa	72
8	Yhteenveto	74
	Lähdeluettelo	78

1 JOHDANTO

Nykyisessä aktiivilietemenetelmään perustuvassa jätevedenpuhdistuksessa syntyy erilaisia lietteitä, pääasiassa primääri- ja sekundäärilietettä. Aikaisemmin jätevesipuhdistamo lietteitä on saanut sijoittaa kaatopaikalle, mutta vuodesta 2017 lähtien lainsäädäntö on kiristynyt ja biohajoavan jätteen sijoittaminen on ollut kiellettyä kaatopaikalle (Huopana et al. 2014, s. 3). Lainsäädännön tiukkeneminen on lisännyt mielenkiintoa lietteiden polttoa kohtaa. Yhtenä lietteiden polton haasteena on lietteiden korkea vesipitoisuus, etenkin sekundäärilietteen vesipitoisuus. Sekundäärilietteen osuus lietteistä on lisääntynyt aktiivilietemenetelmän yleistyessä. Sekundääriliete koostuu pääasiassa mikrobimassasta ja kuolleesta soluaineesta. Mikrobimassa eli solut sisältävät solunsisäistä vettä jonka poistaminen on hankalaa mekaanisessa vedenpoistossa ilman sekundäärilietteen esikäsitelyä.

Lietteiden korkea vesipitoisuus aiheuttaa haasteita myös lietteiden hyötykäytössä. Jätevedenpuhdistamo tuottaa tyypillisestä suuren määrän lietettä. Kaiken syntyvän lietteen sijoittaminen lähiympäristöön ei ole useinkaan mahdollista, joten lietettä voi joutua kuljettamaan pitkienkin matkojen päähän. Lietteiden kuiva-ainepitoisuutta nostamalla on mahdollista tehostaa hyötykäyttö mahdollisuuksia ja alentaa lietteen kuljettamisesta aiheutuvia kustannuksia.

Tässä diplomityössä tutkitaan kahta biolietteenesikäsitelymenetelmää ja biohiilen toimivuutta seka- ja biolietteen suodatuksen tukiaineena. Esikäsitelymenetelmiä ovat laserkäsitely ja märkäpyrolyysi. Esikäsitelymenetelmien tarkoituksena on muokata biolietteen vedenpoisto-ominaisuuksia siten, että vedenpoisto tehostuu mekaanisessa vedenpoistossa. Työn teoriaosuudessa esitellään tyypillinen jätevedenpuhdistamo ja jätevedenpuhdistamolla syntyvät lietteet. Sekä käydään läpi lietteenkäsitellyn nykyiset menetelmät ja lietteen loppusijoitus vaihtoehdot. Uudet esikäsitelymenetelmät käydään läpi omassa kappaleessa. Työn kokeellisessa osassa suoritetaan laboratorio mittakaavan esikäsitelykokeet ja suodatuskokeet. Lietteenä kokeissa käytetään metsäteollisuuden biolietettä.

1.1 Työn rajausta ja tavoitteet

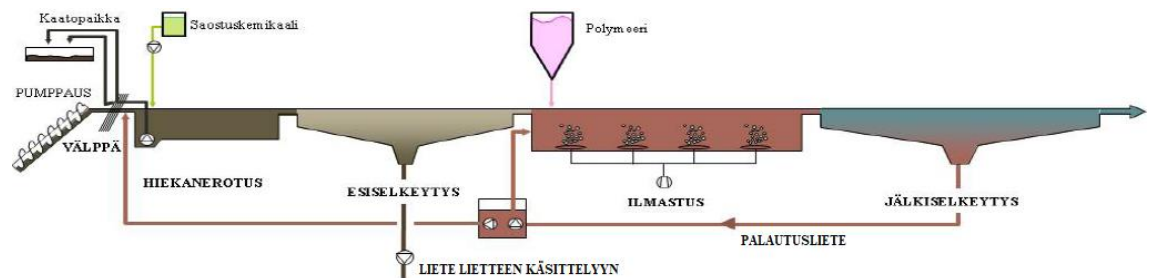
Työ rajataan käsittelemään jätevedenpuhdistuksessa syntyviä lietteitä. Työn ulkopuolelle jätetään muut lietteet esimerkiksi maatalouslietteen ja metsäteollisuuden siistauslietteet. Kokeellisessa osassa keskitytään käsittelemään metsäteollisuuden sekundaariliettä.

Diplomityön tavoitteena on arvioida ovatko valitut biolietteenesikäsittelymenetelmät teknisesti ja taloudellisesti toteuttamiskelpoisia. Teknistä puolta arvioidaan suodatus tulosten perusteella eli nostaako esikäsittely biolietteen kuiva-ainepitoisuutta verrattu referenssiin. Taloudellista puolta arvioidaan esimerkki laskelmien avulla. Laskelmissa arvioidaan esimerkki prosessin investointikustannukset ja mahdolliset tuotot. Biohiilen toimivuutta seka- ja biolietteen suodatuksen tukiaineena arvioidaan suodatus-tulosten perusteella.

2 JÄTEVEDENKÄSITTELY JA SYNTYVÄT LIETTEET

2.1 Jätevedenkäsittelyprosessi

Jätevedenkäsittelyn tarkoituksena on puhdistaa tulevasta jätevedestä epäpuhtauksia, joista on haittaa purku vesistön ympäristölle (Karttunen, 2004, s. 492). Jätevedenpuhdistus koostuu sarjasta erilaisia yksikköoperaatioita ja –prosesseja. Tyypillinen jätevedenpuhdistuslaitos on aktiivilietelaitos joka sisältää seuraavat osat: välppäys, hiekanerotus, esiselkeytys, ilmastus, jälkiselkeytys ja mahdollinen jälkikäsittely (Karttunen, 2004, s. 17). Kuvassa 1 on esitetty tyypillisen jätevedenpuhdistamon prosessikaavio.



Kuva 1. Tyypillinen jätevedenpuhdistamon prosessikaavio (Säylä, Vilpas, 2012).

Jätevedenkäsittely alkaa jäteveden välppäyksellä ja hiekanerotuksella. Välppäyksen tarkoituksena on poistaa jätevedestä karkeimmat epäpuhtaudet, jotka voivat haitata jätevedenpuhdistuksen myöhempiä prosessivaiheita (Karttunen, 2004, s. 53). Hiekanerotuksessa jätevedestä poistetaan hiekka, sora ja kivet. Poiston tarkoituksena on suojella pumppuja ja muita koneellisia laitteita kiviaineksen aiheuttamilta ongelmilta. Kiviaineksen poistaminen on myös hankalaa seuraavissa prosessivaiheissa (Karttunen, 2004, s. 503).

Esiselkeytyksen tarkoituksena on alentaa ilmastusvaiheen kuormitusta. Esiselkeytyksessä jätevedestä poistetaan laskeutuvaa kiintoainesta, öljyjä ja rasvoja. Esiselkeytyksessä voidaan poistaa 50 - 70 % kiintoaineksesta ja vähentää jäteveden biologista hapenkulutusta (BOD) 25 – 40 %. Esiselkeytyksessä syntyvä liete johdetaan lietteen käsittelyyn (Karttunen, 2004, s. 506).

Ilmastusta kutsutaan yleensä aktiivilieteprosessiksi. Aktiivilieteprosessin päätavoitteita ovat orgaanisen aineen, fosforin ja typen poisto (Karttunen, 2004, s. 181 - 182). Aktiivilieteprosessissa jätevettä puhdistetaan mikro-organismien avulla, käytännössä bakteerien avulla. Bakteerit käyttävät happea muuttamaan jätevedessä olevat hiilipitoiset kolloidiset ja liuenneet aineet solumassaksi, hiilidioksidiksi ja vedeksi. Bakteerit poistavat myös typpeä ja fosforia jätevedestä (Tchobanoglous et al. 2003, s. 549-549).

Ilmastuksen jälkeen jätevesi johdetaan jälkiselkeytykseen. Jälkiselkeytyksen tehtävänä on erottaa ilmastuksessa syntynyt solumassa vedestä. Solumassan ominaispaino on hieman vettä suurempi, jolloin se voidaan erottaa vedestä laskeuttamalla (Karttunen, 2004, s. 165). Suurin osa solumassasta palautetaan takaisin ilmastusaltaaseen palautuslietteenä. Ylimääräinen liete johdetaan lietteenkäsittelyyn (Karttunen, 2004, s. 517).

Jälkiselkeytyksen jälkeen jätevedessä on vielä vaihtelevia määriä kolloidisia, partikkelimaisia ja liuenneita aineita. Jäljellä olevat epäpuhtauksia voidaan puhdistaa jäteveden jälkikäsittelyssä. Jäteveden jälkikäsittelyn tarve riippuu jätevedenpuhdistamon ympäristöluvan ehdoista (Tchobanoglous et al. 2003, s. 1037).

Jälkikäsitteilymenetelmiä ovat erilaiset erotus ja kemialliset käsitteilymenetelmät. Erotusmenetelmiä ovat erilaiset suodatusmenetelmät, kuten syväsuodatus, pinta-suodatus ja kalvosuodatus, sekä adsorptio aktiivihiileen. Kemiallisia käsitteilymenetelmiä ovat kemiallinen saostus, kemiallinen hapetus ja desinfiointi (Tchobanoglous et al. 2003, s. 1038-1042).

2.2 Lietteet

Jätevedenpuhdistus tuottaa erilaisia lietteitä. Lietteet eroavat laadullisesti sekä määrällisesti toisistaan. Jätevedenpuhdistuksessa syntyvät lietteet voidaan ryhmitellä synty- ja erottamistapojen perusteella tai nimetä sen mukaan missä prosessivaiheessa ne ovat syntyneet. Esiselkeytyksestä poistettua lietettä kutsutaan primääri-, raaka-, mekaaniseksi- tai kuitulietteeksi. Jälkiselkeytyksestä poistettua lietettä kutsutaan sekundääri-, ylijäämä- tai biolietteeksi. Näiden kahden lieteen yhdistelmää kutsutaan seka- tai yhdistelmälietteeksi. Jätevedenpuhdistuksessa syntyy myös kemiallista lietettä, jos jätevedenpuhdistamolla käytetään kemiallista jälkisaostusta. Kemiallisesta lietettä kutsutaan myös tertiäärilietteeksi. Jätevedenpuhdistuksessa syntyy mädätettyä lietettä, jos lietteenkäsittelyyn sisältyy mädättäjä (Karttunen, 2004, s. 557).

2.2.1 Metsäteollisuudenlietteet

Suomessa metsäteollisuuden jätevedet puhdistetaan pääosin biologisissa jätevedenpuhdistamoissa. Jätevedenpuhdistuksessa syntyy kahta erilaista lietettä: primääri-lietettä eli kuitulietettä ja sekundäärilietettä eli biolietettä (Lohiniva et al. 2001, s. 23). Vuonna 2009 metsäteollisuudessa syntyi noin 425 tuhatta tonnia lietteitä (Huopana et al. 2014, s. 5) Tuotantoprosessi vaikuttaa huomattavasti syntyneen lieteen määrään ja koostumukseen. Esimerkiksi kemihierrettä valmistava tehdas synnyttää lietettä noin 85 kg/t tuotetta, kun taas sellua ja puuvapaata paperia valmistava tehdas synnyttää lietettä noin 5,7 kg/t tuotetta. Jätevedenpuhdistuksessa syntyvät lietteet tarvitsevat jatkokäsittelyä, koska ne ovat liian vesipitoisia loppusijoitettavaksi (Lohiniva et al. 2001, s. 23-26).

Kuituliete erotetaan jätevedestä esiselkeytysaltaassa laskeuttamalla. Kuituliete sisältää pääasiassa puun kuituja ja muita helposti laskeutuvia kiintoaineita, kuten kuorta, pigmenttejä ja täyte- ja lisäaineita. Kuitulietteen koostumus riippuu paljolti tuotantoprosessista. Taulukosta I nähdään, että kuitulietteen (primääriliete) tuhkapitoisuuden vaihtelu väli on huomattavan suuri. Alhaisimmat tuhkapitoisuudet ovat sellutehtaiden kuitulieteteissä ja korkeimmat hienopaperitehtaiden kuitulieteteissä (Lohiniva et al. 2001, s. 23-24).

Kuitulietteen kuiva-ainepitoisuus esiselkeyttimeltä tullessaan on noin 0,5 – 3 % (Liimatainen et al. 2000, s. 25). Mekaanisen veden erotuksen jälkeen kuitulietteen kuiva-ainepitoisuus vaihtelee välillä 35 – 40 % ja sen tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa on 4 – 6 MJ/kg. Kuivan kuitulietteen tehollinen lämpöarvo on 12 – 19 MJ/kg (taulukko I). Kuitulietettä syntyy selluteollisuudessa noin 2 % tuotannon määrästä ja paperi- ja kartonkiteollisuudessa noin 1,5 – 2 % tuotannon määrästä kuiva-aineksi laskettuna (Lohiniva et al. 2001, s. 24).

Taulukko I. Primääri ja biolietteen tyyppillisiä koostumuksia (Liimatainen et al. 2000, s. 25)

Ominaisuus	Primääriliete	Bioliete
Tuhka (%)	5 – 60	15 – 20
Kuidut (%)	40 – 65	–
Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg _{ka})	12 – 19	15,5 – 18,5
Hiili (%)	25 – 45	45 – 47
Vety (%)	3 – 5,5	5,4 – 6,5
Happi (%)	15 – 35	25 – 35
Typpi (%)	1,2 – 4,5	1,5 – 4,7
Rikki (%)	< 0,5	1,2 – 3,8
Natrium (%)	–	0,4 – 1,6
Fosfori (%)	< 0,1	0,3 – 0,8
Kloori (%)	0,2 – 0,5	0,1 – 0,7
Kalium (%)	–	0,1 – 0,3
C/N suhde	32 – 930 : 1	6 – 115 : 1

Biolietettä syntyy jätevedenpuhdistuksen aktiivilieteprosessissa. Bioliete erotetaan puhdistetusta vedestä jälkiselkeytysaltaassa laskeuttamalla. Suurin osa biolieteteestä pumpataan takaisin aktiivilieteprosessin alkuun ja ylimääräinen bioliete poistetaan

lietteenkäsittelyyn (Liimatainen et al. 2000, s. 9). Bioliete koostuu pääasiassa mikrobimassasta ja kuolleesta soluaineesta. Biolietteeneseen on myös adsorboitunut puusta peräisin olevia uuteaineita ja ligniiniä. Ligniinin osuus biolietteestä voi olla 30 – 70 % ja loput pääasiassa rasvoja, hiilihydraatteja ja valkuaisaineita. Biolietteen sisältämät epäorgaaniset aineet ovat peräisin pääasiassa puusta ja korvauskemikaaleista. Biolietteen tyypillinen koostumus on esitetty taulukossa I (Lohiniva et al. 2001, s. 24, Liimatainen et al. 2000, s. 24).

Metsäteollisuuden lietteet eroavat yhdyskunta jätevesilietteistä koostumukseltaan ja vedenpoisto-ominaisuuksiltaan. Metsäteollisuuden lietteet sisältävät enemmän puusta peräisin olevia aineksia, kuten selluloosaa, ligniiniä ja hiilihydraatteja, sekä sellun- ja paperinvalmistuksesta peräisin olevia epäorgaanisia aineita. Yhdyskuntalietteet sisältävät enemmän rasvoja ja ravintoaineita (typpi, fosfori), sekä raskasmetalleja. Metsäteollisuuden lietteet eivät sisällä suolistobakteereja (Lohiniva et al. 2001, s. 24-25).

Osalla metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoista on käytössä kemiallinen puhdistamo. Kemiallisessa puhdistuksessa jätevedessä olevaa kiintoainetta sidotaan kemikaaleilla suuremmiksi flokeiksi. Yleisiä kemikaaleja kemiallisessa puhdistuksessa ovat alumiini-, ferro- ja ferrisuolat sekä kalkki. Kemiallisen puhdistuksen jälkeen syntyneet flokit erotetaan selkeytys altaassa laskeuttamalla puhdistetusta vedestä. Syntynyt kemiallinen liete ohjataan lietteenkäsittelyyn. Kemiallisella lietteellä on yleensä huonot vedenpoisto ominaisuudet (Lohiniva et al. 2001, s. 25, Liimatainen et al. 2000, s. 9-10).

2.2.2 Yhdyskuntalietteet

Suomessa syntyy vuosittain noin 150 000 tonnia yhdyskuntalietteitä (Vilppanen & Toivikko, 2017). Suurin osa Suomen jätevedenpuhdistamoista käyttää aktiivilietemenetelmää jätevesienpuhdistukseen (Suomen Vesilaitosyhdistys ry, 2016, s. 83).

Mekaaninen liete koostuu kiintoaineesta, joka erotetaan laskeuttamalla jätevedestä esiselkeytyksessä. Mekaaninen liete sisältää tyypillisesti yli 70 % orgaanista materiaalia. Mekaaninen liete on yleensä harmaata ja limaista, sekä useimmiten erittäin

voimakkaan hajuista. Mekaaninen liete on ominaisuuksiltaan helposti mätänevää, tiivistä ja sitkeää. Sitkeyden takia mekaanisen lietteen juoksevuus on huono. Huono juoksevuus aiheutuu hajoamattomista ja limaisista orgaanisista kolloideista. Mekaanista lietettä syntyy noin 150 g/m^3 jätevettä (Karttunen, 2004, s. 557-558, Lohiniva et al. 2001, s. 18, Tchobanoglous et al. 2003, s. 1453). Taulukossa II on esitetty mekaanisen (raaka) lietteen tyypillinen kemiallinen koostumus.

Taulukko II. Raaka- ja biolietteen tyypilliset kemialliset koostumukset (Tchobanoglous et al. 2003, s. 1454).

Ominaisuus	Raakaliete		Bioliete
	Vaihteluväli	Tyypillinen arvo	Vaihteluväli
Kuiva-aineen määrä (TS), %	2,0-8,0	5,0	0,83-1,16
Haihtuvat aineet, % kuiva-aineesta	60-80	65	59-88
Rasvoja, % kuiva-aineesta			
eetteriin liukenevaa	6-30	-	-
eetterillä uutettu	7-35	-	5-12
Proteiinia, % kuiva-aineesta	20-30	25	32-41
Typpeä N, % kuiva-aineesta	1,5-4,0	2,5	2,4-5,0
Fosforia P_2O_5 , % kuiva-aineesta	0,8-2,8	1,6	2,8-11,0
Kaliumia K_2O , % kuiva-aineesta	0-1	0,4	0,5-0,7
Selluloosaa, % kuiva-aineesta	8,0-15,0	10,0	-
Rautaa, % kuiva-aineesta	2,0-4,0	2,5	-
Piitä SiO_2 , % kuiva-aineesta	15,0-20,0	-	-
pH	5,0-8,0	6,0	6,5-8,0
Alkaalisuus, ml/l CaCO_3	500-1500	600	580-1700
Orgaanisia happoja, mg/l Hac	200-2000	500	1100-10000

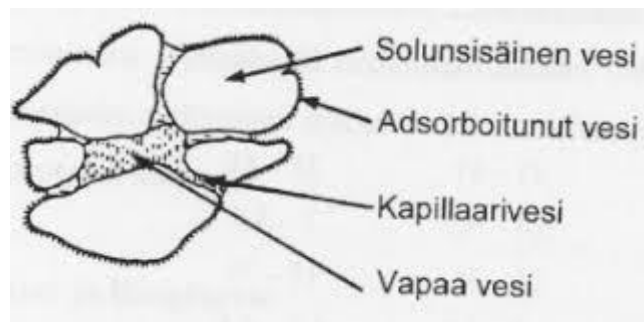
Aktiivilietemenetelmässä kiintoainesta poistetaan mikro-organismien avulla. Mikro-organismit muuttavat hiilipitoisen orgaanisen materiaalin kaasuiksi ja solukudokseksi. Ylimääräinen solukudos poistetaan prosessista ns. ylijäämälietteenä eli biolietteenä (Lohiniva et al. 2001, s. 18). Bioliete on yleensä ruskean väristä ja omaa flokkimaisen rakenteen. Bioliete on hyvin vesipitoinen ja helposti pumpattava. Hyvä kuntoisen biolietteen haju on muistuttaa maaperän hajua, mutta biolietteellä on taipumus ”pilaantua” nopeasti jolloin sen haju muuttuu mädäntyneeksi. Bioliete mätänee helposti. Biolietettä muodostuu noin $90 - 240 \text{ g/m}^3$ jätevettä riippuen käyte-

tystä biologisesta puhdistusprosessista (Karttunen, 2004, s. 557-558, Tchobanoglous et al. 2003, s. 1453). Taulukossa II on esitetty biolietteen tyypillinen kemiallinen koostumus.

Yhdyskuntalietteet sisältävät hyödyllisiä ravinteita ja hivenaineita, kuten typpeä, fosforia ja kaliumia. Yhdyskuntalietteitä ravinteita hyödynnetään lannoitekäyttöön. Yhdyskuntalietteet voivat myös sisältävät haitallisia raskasmetalleja, patogeeneja ja myrkyllisiä orgaanisia aineita. Nämä voivat rajoittaa lietteen hyötykäyttöä (Tchobanoglous et al. 2003, s. 1452).

2.2.3 Biolietteen vedenpoisto-ominaisuudet

Vesi on sitoutuneena biolietteeseen eri tavoin. Biolietteessä oleva vesi luokitellaan kahteen eri kategoriaan: vapaaseen veteen, joka on helposti erotettavissa ja sitoutuneeseen veteen, joka on sitoutunut fyysisesti tai kemiallisesti biolietteen kiintoaineen kanssa. Vapaavesi sijaitsee kiintoainepartikkeleiden välissä ja erottuu painovoimaisessa laskeutuksessa. Kapilaarivesi sijaitsee ”ansassa” flokkien sisällä ja se voidaan erottaa rikkomalla flokin rakenne. Osa kapilaarivedestä voidaan erottaa mekaanisesti. Adsorboitunut vesi on fyysisesti sitoutunut kiintoainepartikkeleiden pinnalle. Adsorboitunutta vettä ei pysty erottamaan mekaanisella vedenerotuksella. Solunsisäinenvesi sijaitsee solujen (bakteerien) sisällä ja on kemiallisesti sitoutunut kiintoainepartikkeleihin. Kapilaari-, adsorboitunutta- ja solunsisäistävettä kutsutaan sitoutuneeksi vedeksi. Biolietteen sitoutunut vesi on yksi merkittävin tekijä, joka vaikuttaa vedenpoiston tehokkuuteen (Mowla, Tran & Allen, 2013). Kuvassa 2 on esitetty eri tavat, jolla vesi esiintyy biolietteessä.



Kuva 2. Veden jakautuminen biolietteessä (Liimatainen et al. 2000, s. 26).

Biolietteen partikkelikolla ja partikkelikokojakaumalla on iso merkitys vedenpoisto ominaisuuksiin. Partikkelikokoon ja partikkelikokojakaumaan vaikuttavat jätevedenpuhdistuksessa ja lietteenkäsittelyssä tapahtuvat sekoitukset, viipymäajat, lämpötilamuutokset, kemikaaliannostukset ja pH-muutokset. Myös biolietteen tyyppipitoisuudella ja ilmastusvaiheen lietekuormalla on vaikutusta partikkelikokojakaumaan. Biolietteen sisältämien bakteerien koko vaihtelee välillä 0,5 – 5 μm , flokkien 20 – 200 μm ja aggregaattien koko voi olla jopa 2000 μm (Liimatainen et al. 2000, s. 27).

Biolietteen vedenpoistoon vaikuttaa myös sen geelimäinen rakenne. Geelimäisen rakenteen aiheuttavat solunulkopuoliset pitkäketjuiset yhdisteet eli EPS (extracellular polymeric substances). EPS yhdisteet ovat korkeasti varautuneita polymeerejä, jotka muodostavat verkkomaisen matriisin. Matriisi sitoo bakteereja ja mikroorganismeja sekä adsorboi vettä. EPS:n koostuu pääasiassa polysakkarideista ja proteiineista. EPS voi myös sisältää humus aineita. Hajottamalla lietteen EPS matriisi entsyymi-, ultraäänikäsitteilyllä tai termisellä käsitteilyllä biolietteen vedenpoisto-ominaisuuksia voidaan parantaa (Mowla, Tran & Allen, 2013)

Lietepartikkelien, flokkien ja aggregaattien välissä oleva vapaa vesi erottuu tiivistimessä. Tiivistimen jälkeen biolietteen kuiva-ainepitoisuus on noin 2 – 4 %. Mekaanisessa vedenerotuksessa biolietteestä erottuu kapilaari- ja adheesiovesi, jolloin voidaan saavuttaa noin 20 % kuiva-ainepitoisuus. Biolietettä ei voida puristaa tätä kuivemmaksi, ilman tukiainetta. Sekalietteellä voidaan saavuttaa noin 30 – 35 % kuiva-ainepitoisuus mekaanisella vedenerotuksella. Primäärilietteen kuidut tukevat

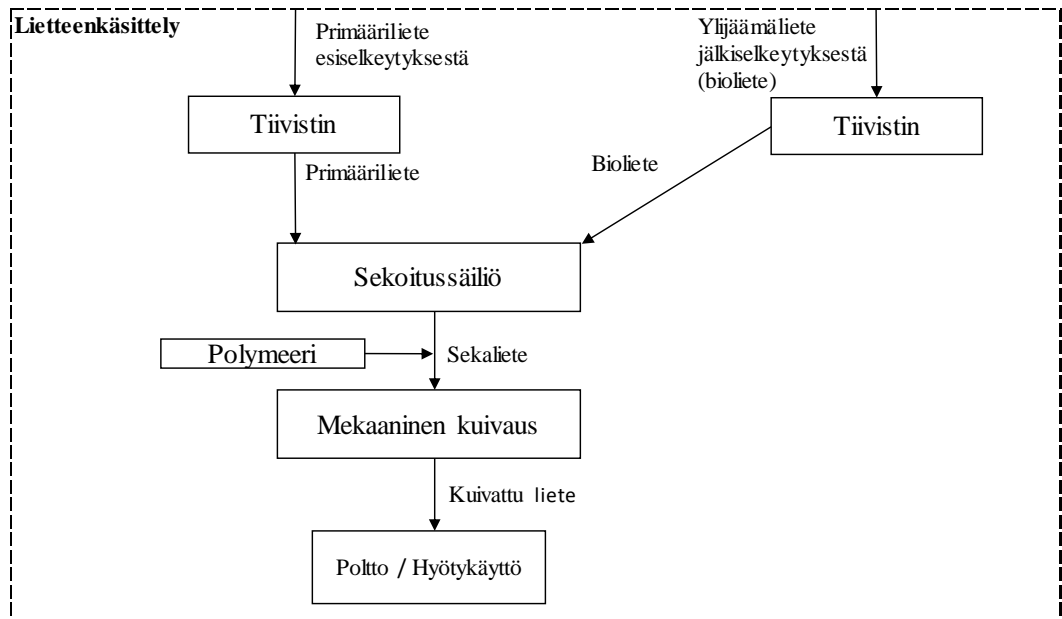
lietettä puristuksen aikana ja mahdollistavat biolietteen solunsisäisen veden määrään vähenemisen. Solunsisäinen vesi voidaan poistaa vain termisillä tai kemiallisilla menetelmillä, jotka tuhoavat solurakenteen. Termisiä tai kemiallisia menetelmiä ovat terminen kuivaus, kompostointi ja alkalikäsittely (Liimatainen et al. 2000, s. 26-27).

3 LIETTEIDENKÄSITTELY

Lietteiden tehokas ja asianmukainen käsittely on edellytys, jotta jätevedenpuhdistuslaitos voi toimia tehokkaasti ja kannattavasti. Lietteiden käsittelyn tarkoituksena on:

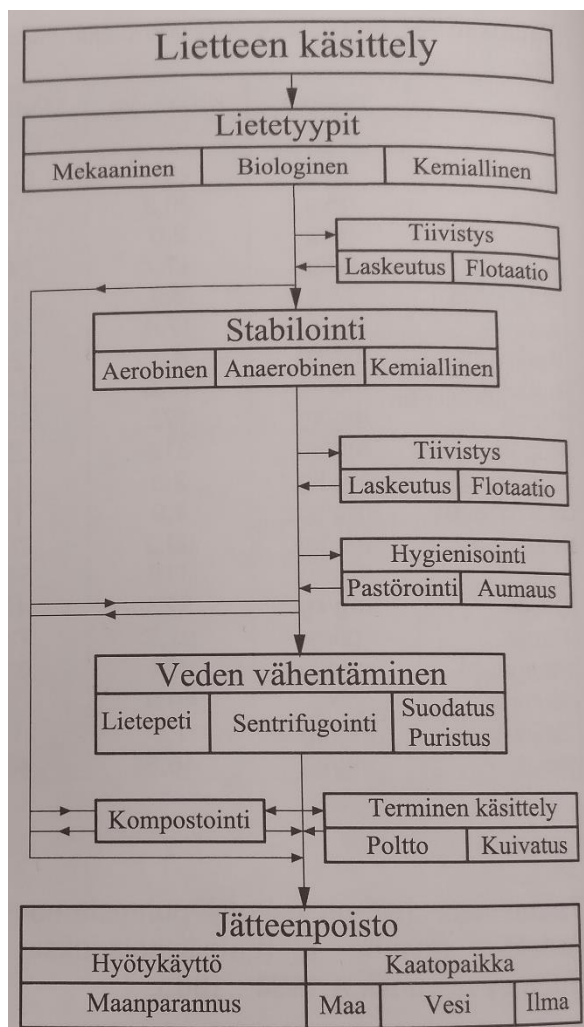
- Pienentää lietteen määrää, jolloin lietteen käsitteleminen, kuljettaminen ja varastointi helpottuvat.
- Stabiloida liete, jolla estetään lietteen orgaanisen aineen hajoaminen ja siitä syntyvät haju haitat.
- Hygienisoida liete, jonka tarkoituksena on tuhota lietteen sisältämät haitalliset bakteerit, virukset ja loiset.
- Saattaa liete sellaiseen muotoon, että sen loppukäyttökohteen kannalta teknisesti ja taloudellisesti hyvässä muodossa (Karttunen, 2004, s. 556).

Kuvassa 3 on tyypilliset metsäteollisuuden lietteen pääkäsittelymenetelmät. Tyypillisesti primääri- ja sekundaarilietteet tiivistetään omissa tiivistimissä ja johdetaan sekalietesäiliöön, jossa eri lietteet yhdistetään ennen mekaanista vedenpoistoa. Ennen mekaanista vedenpoistoa sekalietteeseen lisätään polymeeriä parantamaan vedenpoistoa. Mekaaniseen kuivaukseen käytetään tyypillisesti joko ruuvi- tai suotonauhapuristinta.



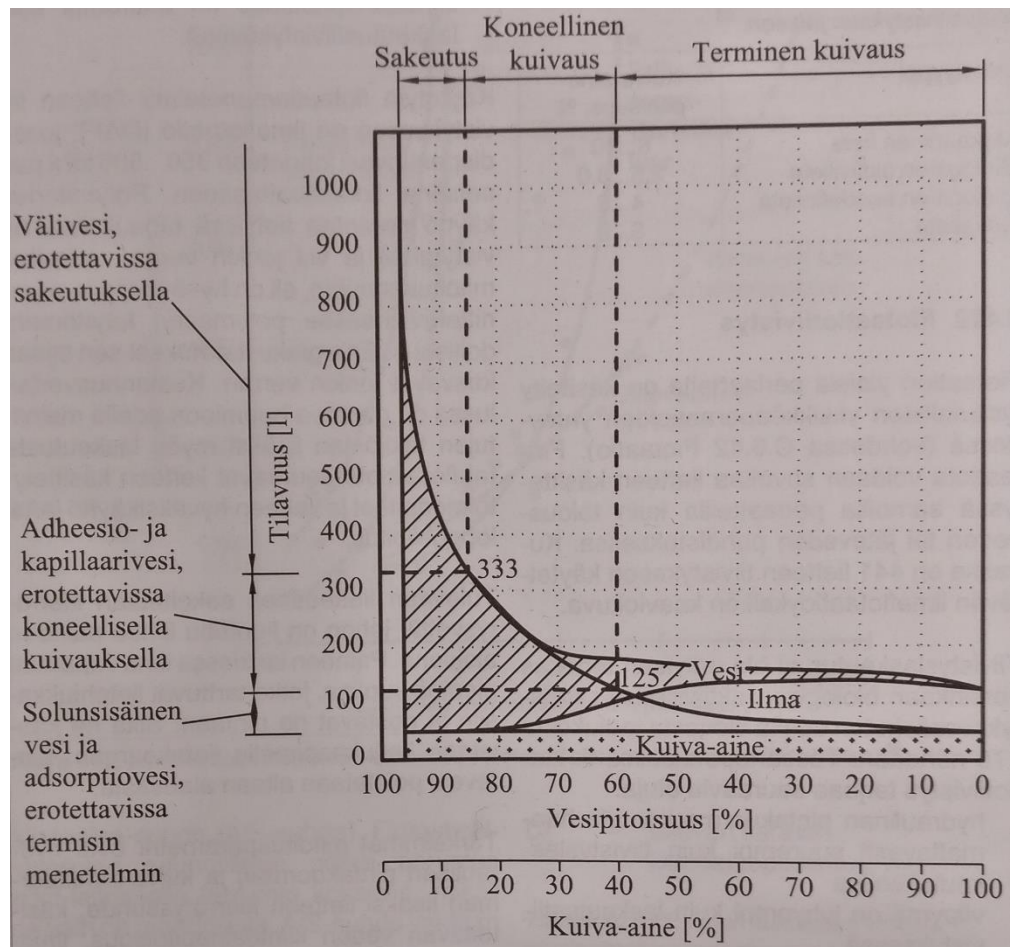
Kuva 3. Tyypilliset metsäteollisuuden lietteen käsittelymenetelmät.

Yhdyskuntalietteiden pääkäsittelymenetelmät ovat esitetty kuvassa 4. Tyypillisesti mekaaninen ja biologinen liete tiivistetään samassa tiivistimessä. Tiivistyksen jälkeen liete stabiloidaan tyypillisesti mädättämällä. Mädätetty liete kuivataan mekaanisesti lingolla. Yhdyskuntalietteen käsittelyvaiheet ja lukumäärä voi vaihdella tarpeiden mukaan (Karttunen, 2004, s. 560).



Kuva 4. Yhdyskuntalietteiden pääkäsittelymenetelmät (Karttunen, 2004, s. 560).

Lietteen kuiva-ainepitoisuus vaikuttaa merkittävästi lietteen kokonaismäärään ja käsittely- ja kuljetuskustannuksiin. Kuvassa 5 on esitetty lietteen tilavuuden ja kuiva-ainepitoisuuden välinen suhde. Kuvasta voi havaita, että lietteen sisältämästä vedestä on 70 – 75 % vapaata vettä (välivettä), joka voidaan erottaa sakeuttamalla. Kapilaari- ja adheesioveden osuus on 20- -25 %. Kapilaari- ja adheesiovesi voidaan poistaa mekaanisella vedenpoistolla. Tehokkaalla mekaanisella vedenpoistolla (koneellisella kuivauksella) on mahdollista päästä noin 40 % kuiva-ainepitoisuuteen. Adsorptio- ja solunsisäisen veden osuus on noin 2 %. Kuvasta voi havaita, että lietteen kokonaistilavuus ei juurikaan pienene 30 % kuiva-ainepitoisuuden jälkeen. 30 %:n jälkeen lietteen huokostilavuus kasvaa ja liete muuttuu kevyemmäksi, mutta kokonaistilavuus ei juurikaan muutu (Karttunen, 2004, s. 562-563).



Kuva 5. Lietteen tilavuus eri kuiva-ainepitoisuuksilla (Karttunen, 2004, s. 563).

3.1 Lietteidenesikäsittely

Lietteidenesikäsittelyn tarkoituksena on pienentää kuivattavien lietteiden määrää, parantaa lietteiden laatua ja vähentää loppusijoituksesta aiheutuvia haittoja. Esikäsitellyssä lietteiden määrää vähennetään nostamalla lietteiden kuiva-ainepitoisuutta. Lietteiden laatua ja haitallisuutta parannetaan vähentämällä lietteiden biologista aktiivisuutta. Esikäsitely koostuu tiivistyksestä, stabiloinnista ja kunnostuksesta (Lohiniva et al. 2001, s. 38).

3.1.1 Tiivistys

Tiivistyksen tarkoituksena on nostaa lietteen kuiva-ainepitoisuutta. Vettä poistetaan painovoimaisesti laskeuttamalla tai flotaation avulla. Tiivistyksen jälkeiset lietteen

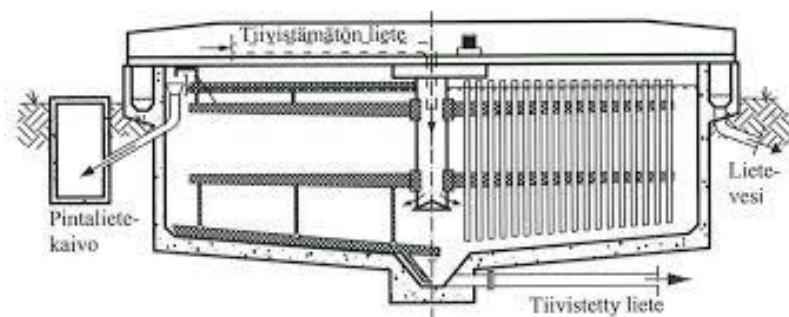
kuiva-ainepitoisuudet ovat esitelty taulukossa III. Tiivistyksellä on olennainen vaikutus lietteen määrään ja sillä on ratkaiseva merkitys seuraavien käsittelyprosessien onnistumiseen ja kustannuksiin. Tiivistyksessä käytetään yleensä laskeutus- tai floataatiotiivistimiä (Lohiniva et al. 2001, s. 38, Karttunen, 2004, s. 560).

Primääri- ja sekundaarilietteet voidaan tiivistää omissa tiivistimissä tai sekalietteenä samassa tiivistimessä. Metsäteollisuudessa ei välttämättä tiivistetä primääri- liettä vaan se johdetaan suoraan vedenerotukseen (Lohiniva et al. 2001, s. 39, Liimatainen et al. 2000, s. 10).

Taulukko III. Eri lietetyyppien kuiva-ainepitoisuudet tiivistyksen jälkeen (Liimatainen et al. 2000, s. 10, Karttunen, 2004, s. 564).

Lietetyyppi	Metsäteollisuus lietteet	Yhdyskunta lietteet
	%	%
Primääri liete	2 - 10	6 - 10
Sekundääri liete	3 - 4	2,5 - 3
Sekaliete	-	5 - 9

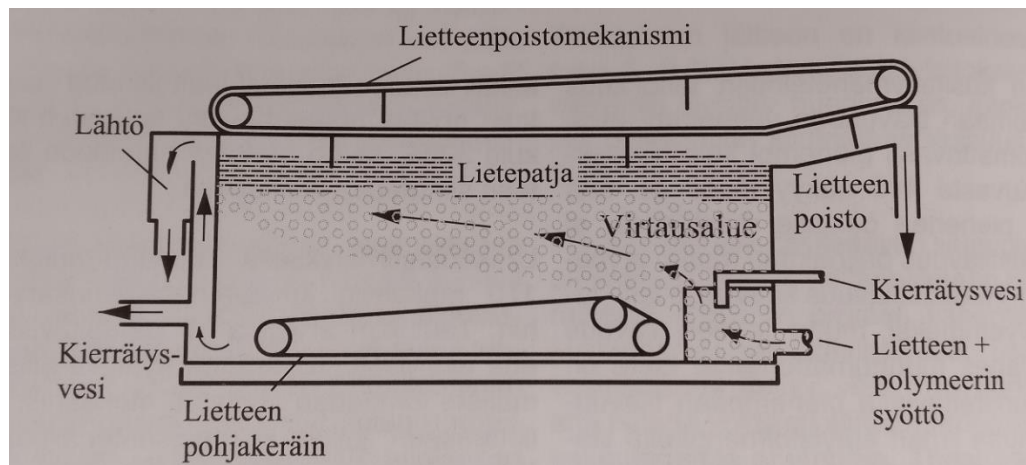
Laskeutustiivistyksessä lietepartikkelit laskeutuvat painovoiman avulla kohti tiivistimen pohjaa. Tiivistynyt liete pumpataan altaan pohjalta jatkokäsittelyyn (kuva 6). Liettevesi poistetaan altaan yläosasta imu- tai teleskooppiputkien avulla ja johdetaan takaisin jätevedenkäsittelyyn (kuva 6). Laskeutustiivistämöt voivat olla jatkuva- tai panostoimisia. Lietteen laskeutusaika vaihtelee 6–12 h. Laskeutusajan ei suositella ylittävän 12 h, koska pidemmällä laskeutusajalla liete alkaa helposti mätänemään (Lohiniva et al. 2001, s. 38).



Kuva 6. Laskeutustiivistimen periaatekuva (Karttunen, 2004, s. 562).

Laskeutustiiivistämöt ovat yleisin lietteiden tiivistämisessä käytettävä menetelmä. Laskeutustiiivistämön hyviä puolia ovat prosessin helppohoitoisuus, soveltuvuus erityyppisille lietteille ja pienet käyttökustannukset. Huonoja puolia ovat suurehko tilantarve sekä mahdolliset hajuongelmat (Lohiniva et al. 2001, s. 39).

Flotaatiotiiivistyksessä lietteeseen sekoitetaan kierrätysvettä. Kierrätysveten on liuotettu ilmaa paineen alaisena. Ilma vapautuu pieninä kuplina, kun paine laskee. Vapautuneet ilmakuplat tarttuvat lietehiukkasiin ja nostavat ne pintaan muodostaen lietepatjan. Liete kaavitaan ketjukaapimella lietekouruun. Flotaatiotiiivistyksessä voidaan käyttää polymeerejä tehostaan veden poistoa (Lohiniva et al. 2001, s. 39, Karttunen, 2004, s. 564). Kuvassa 7 on esitetty flotaatiotiiivistimen periaatekuva.



Kuva 7. Flotaatiotiiivistimen periaatekuva (Karttunen, 2004, s. 564).

Flotaatiotiiivistyksen hyviä puolia ovat, että se soveltuu kevyille lietteille, sekä lyhyt viipymäaika ja pienitilantarve verrattuna laskeutustiiivistämöön. Flotaatiotiiivistyksen huonoja puolia ovat suurempi energian kulutus ja mahdollinen polymeerien käyttö, jolloin sen käyttökustannukset ovat kalliimmat verrattuna laskeutustiiivistämöön (Lohiniva et al. 2001, s. 39, Karttunen, 2004, s. 564).

3.1.2 Stabilointi

Lietteen stabiloinnin tarkoituksena on keskeyttää orgaanisen aineksen hajoamisprosessi ja saattaa liete vähemmän haitalliseen tilaan jatkokäsittelyn helpottamiseksi. Lietteen stabilointi voidaan tehdä biologisesti (anaerobinen mädätys), aerobisesti

(kompostointi), kemiallisesti (kalkkistabilointi) tai fysikaalisesti (lämpökäsittely) (Lohiniva et al. 2001, s. 39-40, Karttunen, 2004, s. 569-670).

Kalkkistabiloinnissa lietteen pH nostetaan yli yhteentoista, jolloin biologinen toiminta lakkaa. Kalkkia annostellaan lietteeseen niin paljon, että pH on vielä 14 vuorokauden jälkeen yli yksitoista. Kalkkia voidaan annostella lietteeseen ennen tiivistystä tai kuivatusta tai kaivatuksen jälkeen. Ennen tiivistystä tai kuivatusta lisätty kalkki parantaa vedenpoisto-ominaisuuksia ja vähentää hajuhaittoja. Ennen tiivistystä tai kuivatusta on käytettävä sammutettua kalkkia. Kuivauksen jälkeen voidaan käyttää myös poltettua kalkkia. Kalkkistabiloinnin etuja ovat prosessin yksinkertaisuus. Kalkkistabiloinnissa kaikki patogeeniset bakteerit ja virukset kuollevat lietteestä. Haittapuolia ovat korkeat kemikaalikustannukset ja liete määrän lisääntyminen (Karttunen, 2004, s. 570-571). Kalkkistabilointia käytetään lähinnä pienillä kunnallisilla jätevedenpuhdistamoilla (Lohiniva et al. 2001, s. 40).

Mädätyksessä orgaanisesti hajoavaa biomassaa hajotetaan metaanibakteerien avulla hapettomissa olosuhteissa. Mädätyksessä muodostuu biokaasua (metaania), hiilidioksidia ja jäännöslietettä. Mädätysprosessi voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa orgaaninen aines hajoaa (hydrolysoituu) bakteereille sopivaksi molekyyleiksi, esimerkiksi sokereiksi. Toisessa vaiheessa ensimmäisen vaiheen tuotteet hajoavat yksinkertaisiksi orgaanisiksi hapoiksi. Kolmannessa vaiheessa metaanibakteerit muuttavat toisen vaiheen tuotteita metaaniksi ja hiilidioksidiksi. Noin 40 % orgaanisesta aineksestä muuttuu kaasuksi, 50 % jää lietteeseen ja 10 % liukenee lietevedeen, kun mädättämö toimii normaalisti (Karttunen, 2004, s. 205, 571-572).

Mädätyksen kaasun tuotanto riippuu olennaisesti kahdesta pääparametrista: lämpötilasta ja viipymä ajasta. Mädätyksessä käytetään kahta eri lämpötilaa. Noin 35 °C toimivaa mädätystä kutsutaan mesofiiliseksi lämpötilaksi ja noin 55 °C toimivaa mädätystä kutsutaan termofiiliseksi lämpötilaksi. Mesofiilinen lämpötila on yleisemmin käytetty. Termofiilistä lämpötilaa käytetään harvemmin, johtuen suuremmista lämpöhäviöistä ja teknisten hankaluuksien vuoksi, vaikka sen metaanin

tuotanto on suurempi, prosessi on hieman nopeampi ja tarvittavat rakenteen pienempiä. Mesofiilisessä mädättämössä lietteen läpimeno aika vaihtelee 15 – 25 päivän välillä. Mesofiilisessä mädätyksessä lieteen syöttö kuiva-ainepitoisuus on maksimissaan 15 %. Termofiilisessä mädätyksessä syöttö kuiva-ainepitoisuus vaihtelee 20 – 40 % välillä (Karttunen, 2004, s. 571, Lohiniva et al. 2001, s. 41, Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukyky –selvitys, 2007, s.19).

Metsäteollisuudessa mädätystä käytetään vähän. Vain bioliete soveltuu mädätettäväksi, sillä primäärilietteen sisältämä kuitu hajoaa huonosti mädätettäessä. Biolietteen sisältämä ligniini ei juurikaan hajoa mädätyksessä, mutta se ei haittaa prosessia (Liimatainen et al. 2000, s. 100-101). Vuonna 2016 73 % yhdyskuntalietteistä mädätettiin (Vilppanen & Toivikko, 2017, s. 6).

Mädätys vähentää lietteen määrää ja muuttaa lietteen kuivatusominaisuuksia. Yleensä mädätys huonontaa lietteen vedenpoisto-ominaisuuksia. Liimatainen et al. ovat arvioineet, että mädätetyn lietteen vedenpoisto-ominaisuuksien heikkeneminen voi johtua partikkelikoon pienentymisestä. Mädätys lisää vedenpoistokemikaalien kulutusta noin $0,5 - 2 \text{ kg/t}_{\text{ka,liete}}$ (Liimatainen et al. 2000, s. 103-104).

Lietteiden kompostointi eli aerobinen käsittely on monimutkainen biologinen prosessi, jossa aerobiset bakteerit hajottavat orgaanista ainesta hapellisissa olosuhteissa. Kompostoinnin lopputuotteena syntyy orgaanista humusta, hiilidioksidia, suoloja, vettä ja lämpöenergiaa. Kompostoinnissa syntynyt lämpöenergia kuluu prosessin lämmitykseen ja solusynteesiin. Kompostin lopputuote on stabiilia, hajutonta ja hygieenistä (Lohiniva et al. 2001, s. 44, Liimatainen et al. 2000, s. 55).

Lietteen kompostointi voidaan suorittaa aumakompostorissa tai reaktorikompostoreissa. Reaktorikompostoinnin etuina verrattuna aumakompostointiin ovat prosessin parempi tehokkuus, stabiilius ja hygienia. Tyypillisiä reaktorikompostointitekniikoita ovat rumpu- ja tunnelikompostointilaitokset. Aumakompostoria käytetään reaktorikompostorin jälkikompostina silloin, kun lopputuotteelta vaaditaan erityis-

ominaisuuksia esimerkiksi maanparannuskäyttöä varten (Ojanen, 2001, s. 24). Aumakompostorissa viipymäaika on 20 – 30 päivää ja reaktorikompostorissa viipymäaika on muutamia viikkoja. Kompostoinnin huonoja puolia ovat suuri tilantarve, ilmastusaineen tarve sekä haju- ja emissiohaitat. (Lohiniva et al. 2001, s. 46)

Liete on kuivattava mekaanisesti ennen kompostoimista, sillä kompostointiprosessi tarvitsee onnistuakseen tietyn kuiva-ainepitoisuuden. Mekaanisesti kuivatun lietteen joukkoon sekoitetaan yleensä tukiainetta lisäämään massan huokoisuutta ja nostamaan kuiva-ainepitoisuutta, jos liete on liian kostea. Kompostoinnin tukiaineena voidaan käyttää turvetta, kuivaa lehti- ja neulaskariketta, haketta, kuorta tai kutterilastua (Lohiniva et al. 2001, s. 45, Liimatainen et al. 2000, s. 59-60).

Kompostointia voidaan käyttää myös lietteen kuivamiseen. Kun lietettä kuivataan kompostoimalla, käytetään termiä bioterminen kuivaus. Biotermisellä kuivauksella liete voidaan kuivata noin 45 – 55 % kuiva-ainepitoisuuteen (Liimatainen et al. 2000, s. 55-56).

Metsäteollisuudessa käytetään lähinnä aumakompostoreita. Kompostoitua lietettä käytetään mm. kaatopaikkojen maisemointiin (Liimatainen et al. 2000, s. 55). Yhdyskuntalietteistä 24 % kompostoitiin vuonna 2016. 39 % yhdyskuntalietteistä mädätettiin ja mädätysjäännös kompostointiin (Vilppanen & Toivikko, 2017, s. 6). Kompostoitua yhdyskuntalietettä käytetään esimerkiksi viherrakentamisessa, kaupunkien puistorakentamisessa ja golfkenttien rakentamisessa (Lohiniva et al. 2001, s. 46)

3.1.3 Kunnostus

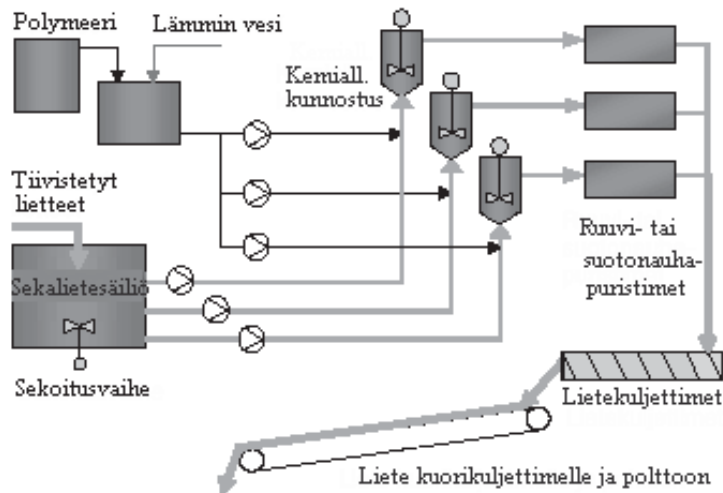
Lietteen kunnostuksen tavoitteena on parantaa lietteen mekaanista vedenerotusta. Lietteen kunnostaminen voi tapahtua kemiallisesti tai fysikaalisesti. Fysikaalisia menetelmiä ovat lietteen lämpökäsittely tai jäädyttäminen. Kemiallinen kunnostus on yleisempää, koska se on yleensä taloudellisempi ja joustavampi (Karttunen, 2004, s. 577-578).

Kemiallisen kunnostuksen tarkoituksena on sitoa liitepartikkeleita yhteen ja parantaa lietteen vedenerotusominaisuuksia. Käytettyjä kemikaaleja ovat yleensä alumiini- ja rautasuolat, kalkki tai orgaaniset polyelektrolyytit (polymeerit). Epäorgaaniset suolat koaguloivat kalkin kanssa liitepartikkeleita ja neutraloivat samalla lietehiukkasten negatiivista pintavarauksia, jolloin hiukkaset muodostavat isompia flokkeja. Orgaaniset polyelektrolyytit sitovat liitepartikkeleita isommiksi aggregaateiksi ja muodostavat kestäviä flokkeja. Orgaanisten polyelektrolyyttien vaikutus lietehiukkasten pintakemiaan riippuu niiden ioniluonteesta tai kemiallisesta koostumuksesta. Orgaanisia polyelektrolyyteja on olemassa anionisia, kationisia, amfolyyttisiä ja nonionisia (Lohiniva et al. 2001, s. 50, Liimatainen et al. 2000, s. 12). Kunnostus kemikaalit voivat nostaa lietteen kuiva-ainepitoisuutta. Polymeerit eivät nosta kuiva-ainepitoisuutta vaan parantavat vedenerotusominaisuuksia. Rautasuolat ja kalkki voivat nostaa kuiva-ainepitoisuutta jopa 20 – 30 % (Tchobanoglous et al. 2003, s. 1555).

Metsäteollisuudenlietteille kunnostus kemikaalien annostus riippuu biolietteen osuudesta sekalietteessä. Biolieteosuuden ollessa noin 30 – 50 % kuluu kemikaalia noin 2 – 4 kg/t_{ka,liete}. Metsäteollisuudessa käytetään pääasiassa orgaanisia kunnostus kemikaaleja. Epäorgaanisten kunnostus kemikaalien haittapuolina ovat lisääntynyt tuhkapitoisuus ja mahdolliset polttokattilan korroosio ongelmat lietteen poltossa (Liimatainen et al. 2000, s. 12). Yhdyskuntalietteille käytetään useimmiten orgaanisia kunnostus kemikaaleja, koska ne eivät lisää merkittävässä määrin lietteen kokonaisuutta. Kunnostus kemikaalin annostelu riippuu lietteen laadusta ja liete suhteista. Keskimääri annostus vaihtelee 1 – 7 kg/t_{ka,liete} (Karttunen, 2004, s. 578).

Kunnostus kemikaali lisätään yleensä lietteen joukkoon ennen mekaanista vedenpoistoa (kuva 8). Kemikaalit annostellaan lietteeseen yleensä nestemäisessä muodossa. Kuivana toimitetut kemikaalit liuotetaan lämpimään veteen ennen lisäämistä lietteen sekaan. Kemikaalin ja lietteen annetaan reagoida sekoittimella varustetussa säiliössä noin 1 – 3 min ennen lietteen johtamista vedenpoistoon. Linkouksen yhteydessä viipymäaika on huomattavasti lyhyempi noin muutaman sekunnin luokkaa. Kemikaali tulee sekoitta hellävaraisesti lietteen joukkoon, jotta syntyneet flokit eivät hajoa ennen vedenerotus vaihetta. Kunnostus kemikaalia voidaan lisätä myös

ennen tiivistintä tehostamaan laskeutusta tai flotaatiota (Lohiniva et al. 2001, s. 50, Liimatainen et al. 2000, s. 12).



Kuva 8. Perinteinen metsäteollisuuden lietteenkäsittelylaitos, johon on kuvattu kunnostus kemikaalien lisäys kohta lietteen käsittely prosessissa (Liimatainen et al. 2000, s. 10).

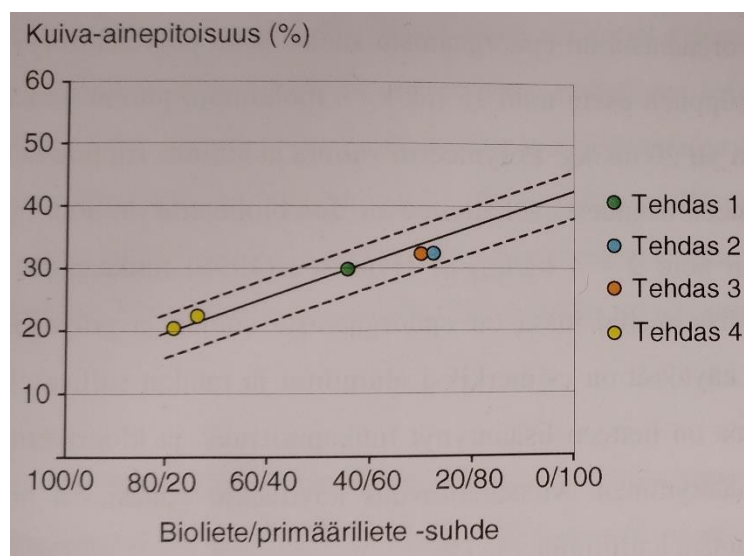
Fysikaalisessa kunnostuksessa pyritään rikkomaan lietteen kemiallinen rakenne, jotta solunsisäinen vesi saataisiin myös poistettua. Lämpökäsittelyn tarkoituksena on laskea veden viskositeettia ja rikkoa lietteen kemiallista rakennetta. Lämpökäsittelyn hyviä puolia ovat vedenpoiston paraneminen. Jäädettämällä liete pyritään rikkomaan soluja (bakteereja) ja siirtämään solunsisäinen vesi välivedeksi, jolloin vedenpoisto ominaisuuden paranevat. (Lohiniva et al. 2001, s. 50-51, Tcho-banoglous et al. 2003, s. 1557-1558).

3.2 Lietteiden mekaaninen vedenerotus

Mekaanisen vedenerotuksen tarkoituksena on pienentää lietteen määrää ja muuttaa liete kiinteään muotoon, poistamalla siitä jäljellä oleva vapaa vesi, sekä mahdollisemman suuri osa sitoutuneesta vedestä (Liimatainen et al. 2000, s. 26-27). Lietteiden mekaaniseen vedenerotukseen käytetään pääasiassa linkoja, ruuvi- ja suotonauhapuristimia. Kuivatuslaitteen valinnassa on huomioitava laitteen hankinta- ja käyttökustannukset, lietteen laatu ja määrä, kuivatun lietteen tavoite kuiva-ainepitoisuus, suodosveden kiintoainepitoisuus, erotusaste sekä kuivatun lietteen mahdolliset kuljetuskustannukset (Lohiniva et al. 2001, s. 53-56)

Lietteen kuiva-ainepitoisuuden tavoite riippuu lietteen jatkokäsittelystä tai loppusijoituksesta. Poltettaessa liete kuiva-ainepitoisuus tavoite on yleensä 35 %, jolloin lietteestä saadaan hieman nettoenergiaa. Muihin jatkokäsittely- tai loppusijoitustarkoituksiin riittää yleensä 15 – 20 % kuiva-ainepitoisuus. Pidemmälle viety kuivatus lisää yleensä kustannuksia ja huonontaa erotusastetta (Lohiniva et al. 2001, s. 53, Liimatainen et al. 2000, s. 11).

Primääri- ja sekundäärilietteen suhteella on vaikutusta sekalietteen kuiva-ainepitoisuuden mekaanisen vedenerotuksessa. Kuvassa 9 on esitetty eri metsäteollisuustehtaiden sekalietteen kuiva-ainepitoisuuksia eri primääri- ja bioliete suhteilla mekaanisen vedenerotuksen jälkeen. Kuvasta 9 nähdään, että bioliete osuuden lisääntyessä kuivatus tulos heikkenee.

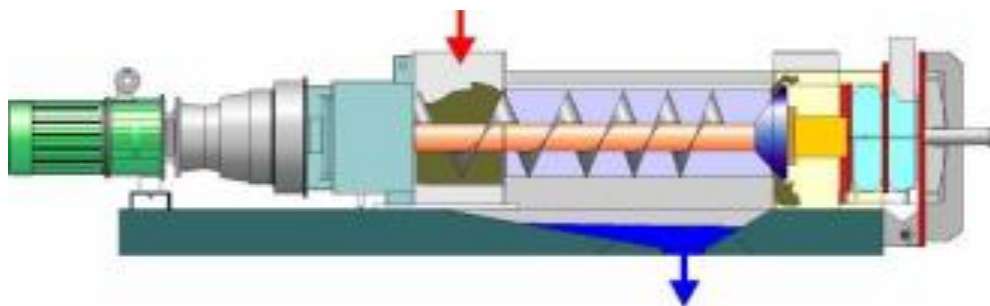


Kuva 9. Lietteen kuiva-ainepitoisuus mekaanisen vedenerotuksen jälkeen eri metsäteollisuuden tehtailla (Liimatainen et al. 2000, s. 11).

Lietteiden käsittelyssä on otettava myös huomioon lietteiden virtausominaisuudet kuiva-ainepitoisuuden noustessa. Primääriliete on suhteellisen hyvin liikuteltavaa kuivuessaankin, koska se on hienojakoista kiintoainetta. Bioliete on jo 10 % kuiva-ainepitoisuudessa ”kiinteä”, joten se ei enää ole pumpattavissa, koska sen viskositeetti on liian suuri. Sekalietteen virtausominaisuuden riippuvat biolietteen osuudesta (Liimatainen et al. 2000, s. 27).

3.2.1 Ruuvipuristin

Ruuvipuristimessa (kuva 10) liete syötetään rei'itetyn sylinterin sisään (kuvassa 10 punainen nuoli). Sylinterin sillä oleva kartiomainen ruuvi kuljettaa lietettä eteenpäin. Liete puristuu sylinterin seinää vasten, jolloin vesi erottuu lietteestä ja poistuu sylinterin reikien läpi (Ojanen, 2001, s 20).



Kuva 10. Ruuvipuristin (Lohiniva et al. 2001, s. 56).

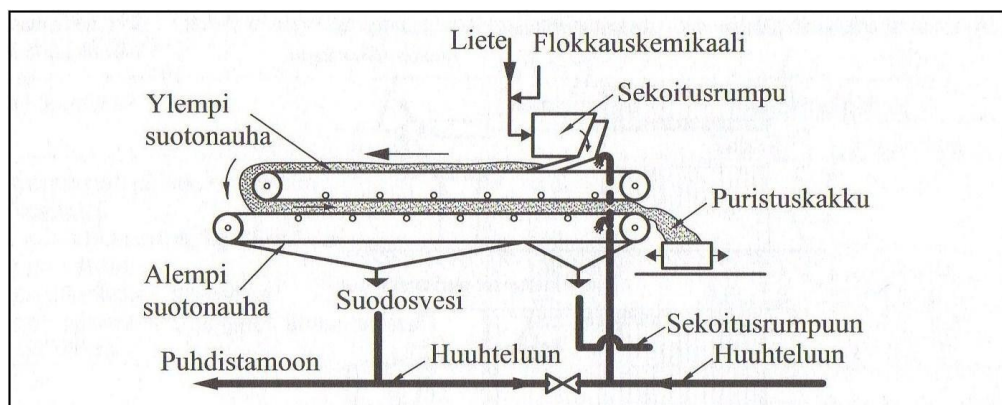
Osaan ruuvipuristimista voidaan syöttää matalapainehöyryä. Höyryn käyttö laskee veden ja lietteen välistä viskositeettia, jolloin veden poistuminen helpottuu. Höyryn avulla lietteen kuiva-ainepitoisuus nousee noin 5 %. Höyryn käyttö pienentää myös ruuvin ja lietteen välistä kitkaa, jolloin ruuvipuristimen tehontarve ja kuluminen vähenevät (Lohiniva et al. 2001, s. 56, Liimatainen et al. 2000, s. 13).

Ruuvipuristimia käytetään lähinnä metsäteollisuudessa, jossa lietteet sisältävät kuitulietettä. Yleensä lietettä kunnostetaan kemiallisesti ennen ruuvipuristinta, jotta saavutetaan riittävän korkea kuivatun lietteen kuiva-ainepitoisuus. Lietteen kuiva-ainepitoisuus vaihtelee välillä 15 – 50 % riippuen biolietteen osuudesta kuivattavassa lietteessä. Ruuvipuristin soveltuu parhaiten lietteille, jossa biolietteen osuus on alle 40 % (Lohiniva et al. 2001, s. 56, Ojanen, 2001, s 20).

3.2.2 Suotonauhapuristin

Suotonauhapuristimessa lietteestä poistetaan vettä painovoiman ja puristuksen avulla. Suotonauhapuristin vaatii lietteen esikäsittelyn ja kemiallisen kunnostuksen, sillä sopiva syöttösakeus on noin 1 – 4 % (Lohiniva et al. 2001, s. 54). Puristimessa liete syötetään viiralle, joka tukee ja kuljettaa muodostunutta lietekakkua eteenpäin.

Puristimessa vesi poistuu ensin painovoima avulla ja sen jälkeen puristamalla viirujen välissä (Liimatainen et al. 2000, s. 13). Suotonauhapuristimen periaatekuva on esitelty kuvassa 11.



Kuva 11. Suotonauhapuristimen periaatekuva (Karttunen, 2004, s. 568).

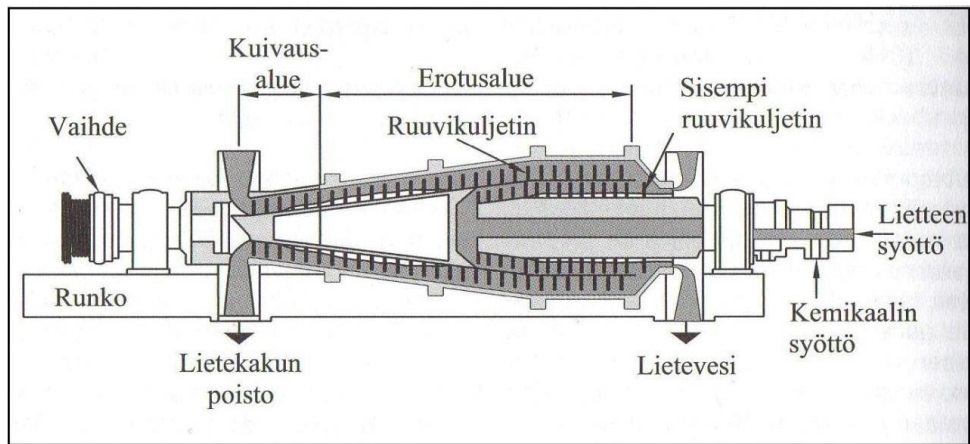
Suotonauhapuristin soveltuu pääasiallisesti sekalietteilte. Suotonauhapuristin ei sovellu pelkän biolietteen kuivaamiseen, vaan se vaatii biolietteen joukkoon primäärilietettä tai lisäainetta, kuten turvetta. Suotonauhapuristimella voidaan saavuttaa kuitulietteilteillä noin 40 – 45 %, biolietteilteillä noin 10 – 20 % ja sekalietteilteillä noin 12 – 35 % kuiva-ainepitoisuus (Lohiniva et al. 2001, s. 54-55, Liimatainen et al. 2000, s. 13).

Suotonauhapuristimen hyviä puolia ovat, että se on varsin luotettava ja alhainen tehontarve sekä kakun kiintoainepitoisuus. Huonoja puolia suotonauhapuristimella on sen herkkyyys tulevan lietteen laadulle, viiran lyhyt käyttöikä ja rajoitettu hydraulinen kapasiteetti (Lohiniva et al. 2001, s. 55, Liimatainen et al. 2000, s. 13). Suotonauhapuristimia on käytössä paljon pienillä ja keskisuurilla yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla sekä metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoilla (Lohiniva et al. 2001, s. 55).

3.2.3 Linko

Lingossa veden poistuminen lietteestä perustuu keskipakovoimaan. Linko koostuu pyörivästä rummista ja rummun sisällä olevasta ruuvikuljettimesta. Näiden

kahden nopeuserot poikkeavat hiukan toisistaan. Lingossa liete syötetään syöttöputken avulla lingon keskelle. Keskipakovoima erottaa lietteen rummun kehälle, josta liete poistuu ruuvikuljettimen avustamana rummun kartiomaisen pään kautta. Lietteiden kuivuminen tapahtuu rummun kartiomaisen pään loppuvaiheella (kuvassa 12: kuivausalue). Neste poistuu lingon toisesta päästä (Lohiniva et al. 2001, s. 53-54).



Kuva 12. Lingon periaatekuva (Karttunen, 2004, s. 568).

Linkoja käytetään lietteille joilla on heikot vedenpoisto-ominaisuudet, kuten biolietteilte ja kemiallisesti puhdistetuille lietteille. Tyypillisesti liete kunnostetaan ennen linkousta kemiallisesti, jotta saavutetaan tarpeeksi korkea lietteiden kuiva-ainepitoisuus. Lingolla saavutetaan noin 20 – 35 % kuiva-ainepitoisuus yhdyskuntalietteilte. Lingon etuja ovat, että sen rakenne on täysin suljettu, jolloin aerosoleja ei pääse ilmaan kuivauksen aikana. Tämä on etu etenkin kuivattaessa yhdyskuntalietteilte. Linkoja käytetäänkin yleisesti yhdyskuntalietteiden kuivauksessa (Lohiniva et al. 2001, s. 53, Ojanen, 2001, s 21).

3.3 Lietteen terminen kuivaus

Termisen kuivauksen tarkoituksena on nostaa lietteiden kuiva-ainepitoisuutta haihduttamalla lietteestä vettä lämmön avulla. Termiset kuivausmenetelmät voidaan jaotella suoriin ja epäsuoriin menetelmiin. Lietteen kuivatuksessa käytetään yleensä höyryä tai kuumia savukaasuja. Suorassa kuivausmenetelmässä lietettä kuivataan

suoraan höyryllä tai savukaasuilla. Epäsuorassa kuivatusmenetelmässä lämpö siirtyy lämpöpinnana läpi lietteeseen, jolloin liete ja lämpöä tuova höyry tai savukaasut eivät ole kosketuksissa toisiinsa (Liimatainen et al. 2000, s. 36, Ojanen, 2001, s 21). Termisen kuivurin valintaan vaikuttavat seuraavat tekijät: kuivattavan lietteen kuiva-ainepitoisuus, käytettävissä oleva energia ja sen hinta, tilavaatimukset sekä kuivatun lietteen käyttötarkoitus ja kapasiteetti (Lohiniva et al. 2001, s. 62)

Lietteen termistä kuivausta käytetään, kun halutaan nostaa lietteen kuiva-ainepitoisuutta korkeammalle kuin mitä mekaaninen kuivauksella on mahdollista saavuttaa. Lietteen termisellä kuivauksella voidaan saavuttaa 80 – 90 % kuiva-ainepitoisuuksia. Tyypillisesti termistä kuivausta käytetään ennen polttoa tai lietteestä valmistetaan lannoitteita. Terminen kuivaus parantaa huomattavasti lietteen poltto-ominaisuuksia sekä hygienisoi ja stabilisoi lietettä (Liimatainen et al. 2000, s. 36, Ojanen, 2001, s 21).

Metsäteollisuudessa biolietettä voidaan polttaa soodakattilassa. Tällöin bioliete kuivataan mustalipeän seassa sellutehtaan haihduttamalla (Liimatainen et al. 2000, s. 80).

3.3.1 Lietteen suorat kuivaimet

Suorissa kuivaimissa lämpö siirretään kuumasta höyrystä tai kaasuista suoraan lietteeseen. Tyypillisiä suoria kuivaintyyppisiä ovat pyörivä rumpukuivain ja leijupetikuivain (Ojanen, 2001, s 23).

Rumpukuivaimessa lietteen kuiva-ainepitoisuus voi olla yli 90 %. Liette syötetään rumpuun ja rumpun pyörimisliike ja kuumailmavirta siirtävät lietettä kohti rumpun toista päätä. Rummussa märkäliete joutuu kosketuksiin kuumien kaasujen kanssa, jolloin liete kuivuu. Syötettävän lietteen tulee olla vähintään 65 %:n kuiva-ainepitoisuudessa, jolloin rumpun tukkeutumis vaara pienenee. Osa kuivatetusta lietteestä voidaan sekoittaa märänlietteen joukkoon syöttö lietteen kuiva-ainepitoisuuden nostamiseksi (Ojanen, 2001, s 23).

Leijupetikuvaimessa puhalletaan kuumia kaasuja kuivaimen alaosaan ylöspäin. Ylöspäin nouseva kaasu virta kannattelee lietehiukkasia siihen asti, kunnes ne ovat kuivuneet. Savukaasujen mukana poistuneet lietehiukkaset poistetaan sykloneilla ja syötetään märänlieteen joukkoon. Leijupetikuvaimella saavutetaan yli 90 % kuiva-ainepitoisuuksia (Ojanen, 2001, s 24).

Suorien kuivaimien hyviä puolia verrattuna epäsuoriin kuivaimiin ovat usein niiden parempi suorituskyky ja yksinkertaisempi rakenne. Huonoja puolia ovat huonompi toimivuus matalissa lämpötiloissa, räjähdysten mahdollisuus ja kaasujen sisältämät epäpuhtaudet, varsinkin vahvat hajuyhdisteet (Ojanen, 2001, s 24).

3.3.2 Lietteen epäsuorat kuivaimet

Epäsuorassa kuivauksessa lämpö siirtyy lietteeseen lämpöpinnan läpi, jolloin liete ja lämmittävä aine eivät sekoitu keskenään. Lämpöpinnan läpi siirtynyt lämpö haihduttaa lietteestä vettä ja kuivattaa lietteen. Epäsuoria kuivureita ovat esimerkiksi ruuvikuivurit, kiekkokuivurit, spiraalikuivuri, kuplivaleijupetikuvurit ja kierto-leijupetikuvurit (Lohiniva et al. 2001, s. 62, Ojanen, 2001, s 22).

Epäsuoran kuivauksen hyviä puolia ovat poistokaasujen pieni määrä ja hyvä energiankäytön hyötysuhde. Epäsuoran kuivauksen ongelmana voi olla lämpöpintojen likaantuminen jolloin lämmön siirtokyky laskee ja kuivatus tulos heikkenee. Muita huonoja puolia voivat olla lietteen epätasainen kuumenemien ja syttymisvaara kuivurin sisällä (Liimatainen et al. 2000, s. 53, Ojanen, 2001, s 23-23).

3.3.3 Biolietteen kuivaus sellutehtaan haihduttamalla

Metsäteollisuudessa bioliettä voidaan polttaa soodakattilassa mustalipeän seassa. Tällöin bioliete kuivataan sellutehtaan haihduttamossa mustalipeän seassa. Biolietteen osuus mustalipeästä on tyypillisesti 1 – 2 % kuiva-aineksi laskettuna. Metsäteollisuuden primääriliete ei sovellu kuivattavaksi haihduttamossa, koska primäärilietteen sisältämät kuidut haittaavat haihduttamon toimintaa (Liimatainen et al. 2000, s. 80).

Sellutehtaan haihduttamo koostuu yleensä 5 – 7 haihdutin vaiheesta. Haihduttimet on kytketty sarjaan. Ensimmäiseen haihdutus vaiheeseen syötetään primäärihöyryä. Ensimmäisen vaiheen haihdehöyry syötetään toisen vaiheen ja niin edelleen. Primäärihöyryn paine on tyypillisesti 3 – 5 bar. Höyry kulkee mustalipeän kulkusuuntaan nähden vastavirtaan. Haihduttimina käytetään lamelli- tai putkiihaihduttimia. Haihduttimien jälkeen osalla tehtailla voi olla mustalipeän väkevöittimet. Väkevöittämiin syötetään väliottohöyryä, jonka paine on tyypillisesti 10 – 11 bar. Väkevöittimien avulla mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti noin 72 – 80 % ja parhaimmillaan jopa 85 % (Liimatainen et al. 2000, s. 80-83).

Bioliete tulee kuivata mekaanisesti ennen syöttämistä haihduttamolle. Mekaaninen kuivaus suoritetaan dekanterilingolla, joka sopii pelkän biolietteen vedenpoistoon. Mekaaninen vedenpoisto säästää haihduttamon kapasiteettia ja vähentää höyryn kulutusta ja kustannuksia. Mekaaninen vedenpoisto vähentää biolietteen mukana tulevan kloorin määrää. Bioliete on linkoamisen jälkeen noin 10 – 15 % kuiva-ainepitoisuudessa (Liimatainen et al. 2000, s. 85).

Lingottu bioliete sekoitetaan mustalipeän joukkoon esikäsitteilylaitteistossa ennen syöttämistä haihduttamolle. Bioliete voidaan syöttää haihduttamon alkupäähän tai välilipeä vaiheeseen. Yleensä bioliete syötetään välilipeä vaiheeseen, koska haihduttamon alkupäässä haihdus kapasiteetti voi olla rajoittava tekijä. Mustalipeän kemikaalit edesauttavat biolietteen soluseinien liukenemistä ja siten tehostavat veden haihdutusta (Liimatainen et al. 2000, s. 85-86).

Rajoittavia tekijöitä biolietteen käytössä haihduttamolla ovat haihdutuskapasiteetti rajoitukset ja haihdutusyksiköiden tukkeutumis riski. Biolietteen mukana tulevat kuidut voivat aiheuttaa tukoksia haihdutusyksiköiden jakolaatikoissa ja siten heikentää haihdutus tehoa. Bioliete voi aiheuttaa muutoksia sekundäärilauhteiden laatuun, jolloin epäpuhtauksia voi päästä muihin prosesseihin. Bioliete voi myös vaikuttaa mustalipeän viskositeettiin ja kiehumispisteeseen nousuun (Liimatainen et al. 2000, s. 90).

4 LIETTEIDEN LOPPUSIJOITUS

EU:n jätelainsäädännön tavoitteena on ensisijaisesti välttää jätteiden syntymistä, toisena tavoitteena on hyödyntää jäte materiaalina tai energiana (Lohiniva et al. 2001, s. 27). Aikaisemmin jätevesipuhdistamo lietteitä on saanut sijoittaa kaatopaikalle, mutta vuodesta 2017 lähtien biohajoavan jätteen sijoittaminen on ollut kiellettyä kaatopaikalle (Huopana et al. 2014, s. 3).

Jätevesipuhdistamo lietteiden kohdalla jätteen synnyn välttäminen on usein hankalaa. Metsäteollisuudessa syntyvät jätevesipuhdistamo lietteet hyödynnetään yleensä energiana, polttamalla liete kuoren kanssa (Liimatainen et al. 2000, s. 14). Yhdyskuntalietteistä suurin osa hyödynnetään maataloudessa ja viherrakentamisessa (Vilppanen & Toivikko, 2017, s. 7).

4.1 Metsäteollisuuden lietteet

Metsäteollisuudessa yleisin jätevesipuhdistamo lietteiden loppusijoitus on polttaa se kuoren ja muun jätetuun mukana tehtaan apukattilassa. Metsäteollisuuslietteiden muita loppusijoitus ja hyötykäyttö vaihtoehtoja ovat kaatopaikkojen maisemointi, viherrakentaminen ja metsä- ja peltolevitys (Liimatainen et al. 2000, s. 14, Ojanen, 2001, s 28).

4.1.1 Lietteen poltto

Lietettä voidaan polttaa mm. leijukerroskattiloissa, soodakattilassa, massapolttolaitoksessa, arinakattiloissa tai rumpu-uuneissa. Liete voidaan polttaa sekoitettuna pääpolttoaineeseen tai yksinään (Lohiniva et al. 2001, s. 68). Metsäteollisuudessa liete poltetaan nykyisin leijukerroskattiloissa, koska mekaanisesti kuivattu liete ei sovellu yhtä hyvin poltettavaksi arinakattiloissa (Liimatainen et al. 2000, s. 15).

Lietteen poltettavuuteen vaikuttavat lietteen kosteus ja koostumus mm. tuhkapitoisuus. Yleensä lietteen poltosta ei saada talteen energiaa. Lietteen poltto vaatiikin käytännössä tukipolttoaineen käyttöä, koska palamisen ylläpitäminen vaatii, että

polttoaineen tehollisen lämpöarvon tulee olla vähintään tasolla 5 MJ/kg. Tyypillisesti tukipolttoaineena käytetään kuorta. Lietteiden poltto on mahdollista ilman tukipolttoainetta, jos lietteiden kuiva-ainepitoisuus on riittävän korkea. Ilman tukipolttoainetta poltettavan lietteiden kuiva-ainepitoisuuden tulee olla 30 – 50 % riippuen polttomenetelmästä. Käytännössä polttamisen tarkoitus on saada liete helpommin käsiteltävään muotoon ja vähentää lietteiden tilavuutta (Alakangas et al., 2016, s. 167).

Lietteiden poltossa on otettava huomioon, että kattilalle voi aiheutua haittavaikutuksia lietteiden poltosta. Haittavaikutuksia voivat olla mm. kerrostumien syntyminen lämpöpinnoille, savukaasumäärän lisääntyminen, korroosio, höyryntuotannon ja kuorenpolttokapasiteetin pieneneminen (Lohiniva et al. 2001, s. 68).

Metsäteollisuuden bioliete voidaan polttaa sellutehtaan soodakattilassa yhdessä mustalipeän kanssa. Ennen polttoa soodakattilassa bioliete kuivataan mekaanisesti lingolla ja syötetään haihduttamolle, jossa se kuivataan termisesti yhdessä mustalipeän kanssa. Kappaleessa 3.3.3 on kerrottu tarkemmin biolietteiden termisestä kuivauksesta sellutehtaan haihduttamalla. Kuituliete poltetaan yhdessä kuoren kanssa kuorikattilassa. Kuituliete ei sovellu termisesti kuivattavaksi haihduttamalla, koska kuidut voivat haitata haihduttamon toimintaa (Liimatainen et al. 2000, s. 80).

4.1.2 Muut loppusijoitus vaihtoehdot

Metsäteollisuuden jätevesilietteitä voidaan käyttää maa- ja metsätaloudessa maanparannukseen ja lannoitukseen. Maanviljelyksessä käytettävien lietteiden on täytävätkin lainsäädännön asettamat laatuvaatimukset raskasmetalli- ja patogeenisuoksille sekä esikäsitteilylle. Lietteiden käytölle maataloudessa on myös vaatimuksia ravinnepitoisuudelle ja kuiva-ainepitoisuudelle. Metsäteollisuuden lietteet sisältävät vähemmän ravinteita, kuin yhdyskuntalietteet. Lietteiden käyttö maataloudessa rajoittaa myös yleinen vastustus. Jätevesilietteitä ei pidetä riittävän turvallisenä lannoitteena ruuaksi käytettävien kasvien kasvatuksessa (Ojanen, 2001, s 52-53).

Jätevesilietettä on mahdollista käyttää metsien lannoitukseen tuhkan ohella. Metsien lannoitukseen lietettä voidaan käyttää istutusten yhteydessä taimikoille ja har-

vennushakkuiden jälkeen. Metsälannoituksen haitta puolena ovat mahdollisesti lisääntyvät ravinnehuhtoutumat ja metsien virkistyskäytölle aiheutuvat haitat. Virkistyskäytölle aiheutuvia haittoja voidaan vähentää pelletöimällä tai rakeistamalla liete (Ojanen, 2001, s 53).

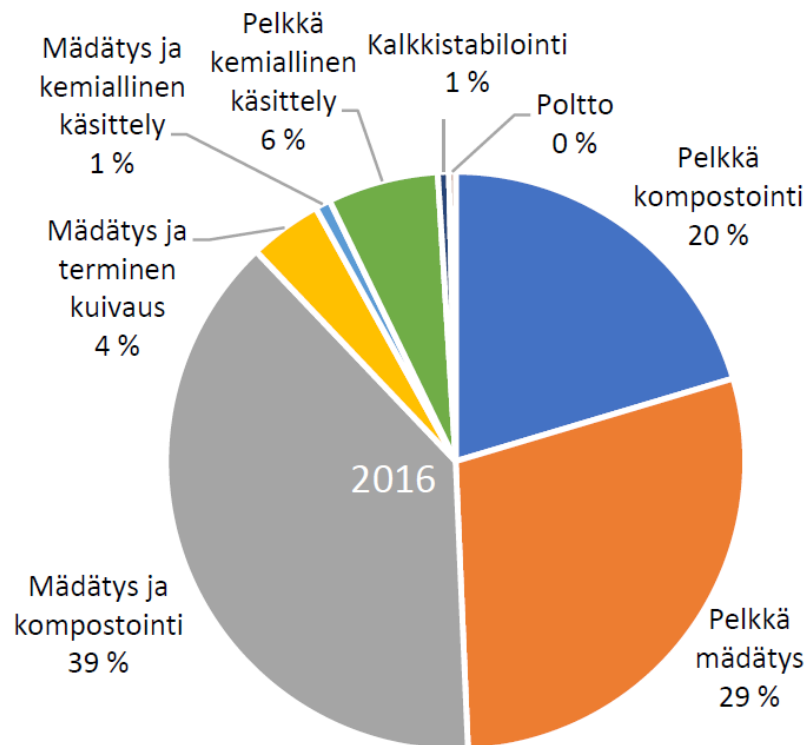
Metsäteollisuuden jätevesilietteitä voidaan käyttää myös maisemointi ja viherrakentamiseen. Parhaiten maisemointi ja viherrakentamiseen sopii kompostoitu liete. Maisemointi ja viherrakentamiseen on määritelty pitoisuusrajat, mutta ne ovat väljempiä kuin viljelykäyttöön tarkoitettut. Lietteen käyttö viherrakentamisessa edellyttää, että kompostimulta on tasalaatuista tuotetta (Ojanen, 2001, s 48).

4.2 Yhdyskuntalietteet

Yhdyskuntalietteiden käsittely on muuttunut merkittävästi viime vuosina. Puhdistusvaatimusten kiristyessä jätevedenpuhdistus on keskittynyt suuremmille laitoksille, minkä johdosta pieniä kompostilaitoksia on lakkautettu. Mädätyksen suosion kasvaessa lietteenkäsittelyä on myös keskitetty suurempiin yksiköihin. Lietteenkäsittely on myös usein ulkoistettu jätevedenpuhdistamon ulkopuoliselle yritykselle. Tällöin lietteenkäsittely on mahdollista ulkoistaa osittain tai kokonaan, jolloin vastuu käsittelyketjun hallinnasta saattaa siirtyä pois jätevedenpuhdistamolta (Vilppanen & Toivikko, 2017, s. 2-3).

4.2.1 Yhdyskuntalietteen hyötykäyttö

Yhdyskuntaliete on käsiteltävä ennen kuin se voidaan toimittaa hyötykäyttöön. Yhdyskuntalietteen tulee täyttää laatu- ja hygieniakriteerit. Jos yhdyskuntalietteitä hyötykäytetään maataloudessa tai viherrakentamisessa edellyttää se, että lietteet käsitellään joko biologisesti kompostoimalla, mädättämällä tai vanhentamalla, kemiallisesti kalkkistabiloinnilla tai happo-vetyperoksidikäsitelyllä, tai fysikaalisesti kuumentamalla (terminen kuivaus). Yhdyskuntaliete voidaan myös polttaa, mutta se on Suomessa vielä harvinaista. (Vilppanen & Toivikko, 2017, s. 2).



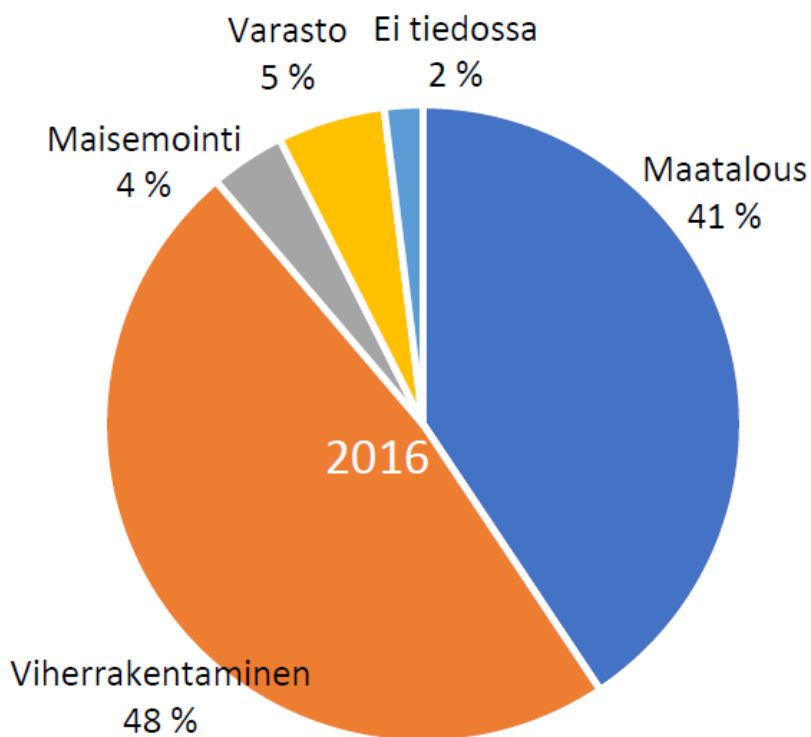
Kuva 13. Yhdyskuntalietteiden käsittelymenetelmät vuonna 2016 (Vilppanen & Toivikko, 2017, s. 6)

Kuvassa 13 on esitetty yhdyskuntalietteiden käsittelymenetelmien osuudet vuonna 2016. Yleisin käsittelymenetelmä yhdyskuntalietteille oli mädätys. Noin 73 % yhdyskuntalietteistä mädätettiin vuonna 2016. Myös kompostointi oli yleinen käsittelymenetelmä yhdyskuntalietteille. Kompostointia käytettiin noin 59 %:lle yhdyskuntalietteistä. Loppujen käsittelymenetelmien osuus oli noin 12 %. Niistä yleisin oli kemiallinen käsittely 6 % osuudella (Vilppanen & Toivikko, 2017, s. 6).

Vuonna 2016 yhdyskuntalietteitä syntyi 147 000 tonnia kuivaksi laskettuna. Yhdyskuntalietteiden hyötykäyttökohteet vuonna 2016 on esitetty taulukossa IX ja kuvaajassa 14. Suurin yhdyskuntalietteiden hyötykäyttökohde on viherrakentaminen. Vuonna 2016 noin puolet kokonaislietemäärästä käytettiin viherrakentamiseen. Maatalouteen toimitettiin 41 % yhdyskuntalietteistä. Kaatopaikkojen maisemointiin käytettiin 4 % lietteistä vuonna 2016 (Vilppanen & Toivikko, 2017, s. 6-7).

Taulukko IV. Yhdyskuntalietteiden hyötykäyttökohteisiin toimitetut lietemäärät vuonna 2016 (Vilppanen & Toivikko, 2017, s. 7)

Hyötykäyttökohde	Määrä (kuiva tonneja)
Maatalous	59 800
Viherrakentaminen	70 800
Maisemointi	5 600
Varasto	8 000
Ei tiedossa	2 900
Yhteensä	147 000



Kuva 14. Yhdyskuntalietteiden hyötykäyttö osuudet vuonna 2016 (Vilppanen & Toivikko, 2017, s. 7)

4.2.2 Yhdyskuntalietteen poltto

Suomessa oli vuonna 2015 kaksi voimalaitosta jotka polttivat pieniä määriä yhdyskuntalietteitä. Laitokset ovat Fortumin Riihimäen voimalaitos ja Vapon Haapaveden pienvoimalaitos. Molempien laitosten poltettavista jakeista liete muodostaa marginaalisen osan. Laitosten ympäristölupa määrittelee kuinka paljon yhdyskun-

talietteitä poltettava materiaali saa sisältä. Haapaveden pienvoimalaitoksella yhdyskuntalietettä voidaan polttaa korkeintaan 1 % kaiken polttoaineen määrästä. Fortum Riihimäen voimalaitoksella yhdyskuntalietettä voidaan polttaa 30 kt/a (sis. myös eläinperäisen jätteen), mutta kuitenkin korkeintaan 10 % kaiken polttoaineen määrästä. Vuonna 2017 on jätetty kaksi uutta ympäristölupahakemusta yhdyskuntalietteenpolttolaitoksille. Yhdyskuntalietteen polttoa suunnittelevat Napapiirin Energia ja Vesi Oy Rovaniemellä ja Tampereen Keskuspuhdistamo Oy (Vilppanen & Toivikko, 2017, s. 4).

Yhdyskuntaliete on määritelty lietteenpolttodirektiivissä jätteeksi. Jätteenpolttoasetuksenmukaisesti palamislämpötilan tulee olla vähintään 850 °C. Korkea palamislämpötila aiheuttaa rajoituksia yhdyskuntalietteen käytölle polttolaitoksessa, koska yhdyskuntalietteellä on tyypillisesti korkea vesipitoisuus ja matala lämpöarvo. Eri polttotekniikoilla on merkittäviä eroja kuinka suuri osa polttoaineesta voi olla yhdyskuntalietettä. Tyypillisesti yhdyskuntalietteen osuus on alle 10 %. Yhdyskuntalietteen polttoon soveltuu parhaiten leijupolttotekniikka. Leijupolttotekniikalla voidaan polttaa myös märkiä lietettä, kunhan märän lietteen osuus ei ole yli 10 %:a poltettavasta materiaalista. Arinapoltto voidaan myös käyttää yhdyskuntalietteen polttamiseen. Arinapoltto rajoittaa lietteen korkea kuiva-ainepitoisuus vaatimus jonka tulee olla vähintään 45 % (Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukyky –selvitys, 2007, s. 31,33).

Yhdyskuntalietteen polttoa rajoittaa myös sen likaavuus ja tuhkan käyttäytyminen. Myös jätevedenpuhdistuksessa käytettävät epäorgaaniset kemikaalit lisäävät polttoaineen tuhkapitoisuutta sekä aiheuttavat kuonan ja klinkkerin muodostumista. Muita yhdyskuntalietteen polttoa rajoittavia tekijöitä ovat polttolaitosten korkeat porttimaksut ja polttolaitosten pitkinä ja monimutkaisina pidetyt ympäristölupaprosessit, sekä tuhkan hävittämisen haasteet (Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukyky –selvitys, 2007, s. 31, Vilppanen & Toivikko, 2017, s. 4)

Yhdyskuntalietteen poltossa syntyvää tuhkaa ei voida käyttää lannoitevalmisteena eikä maanparannusaineena, koska tuhkaa ei ole määritelty lannoiteasetuksen tyyppinimiluettelossa. Yhdyskuntalietteen poltossa syntyvää tuhka tulee käsitellä stabiiliksi ja sijoittaa kaatopaikalle tai jätteenkäsittelylaitokseen. Kaatopaikka on tuhkan yleisin loppusijoitus paikka. Tuhkaa voidaan hyödyntää joissakin tapauksissa tiilien valmistuksessa, tienrakennuksen täyteaineena ja sementin valmistuksessa. Tuhka on mahdollista hyöty käyttää, jos se erotetaan eri jakeisiin. Esimerkiksi fosfori on mahdollista erottaa lannoitteiden valmistukseen. (Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukyky –selvitys, 2007, s. 30-31).

5 BIOLIETTEEN UUDET ESIKÄSITTELYMENETELMÄT

Työssä tutkitaan kahden uutta biolietteen esikäsittelymenetelmää. Esikäsittelymenetelmät ovat laserkäsittely ja märkäpyrolyysi. Kuten kappaleessa 2.2.1 kerrottiin, bioliete koostuu pääasiassa mikrobimassasta ja kuolleesta soluaineesta. Mikrobimassa eli solut sisältävät solunsisäistä vettä joka ei poistu mekaanisessa vedenpoistossa. Biolietteen esikäsittelyn ideana on rikkoa solut, jolloin solunsisäinen vesi vapautuu ja on mahdollista poistaa mekaanisessa vedenpoistossa. Laserkäsittelyssä solut rikotaan lasersäteen avulla ja märkäpyrolyysissä lämmön avulla.

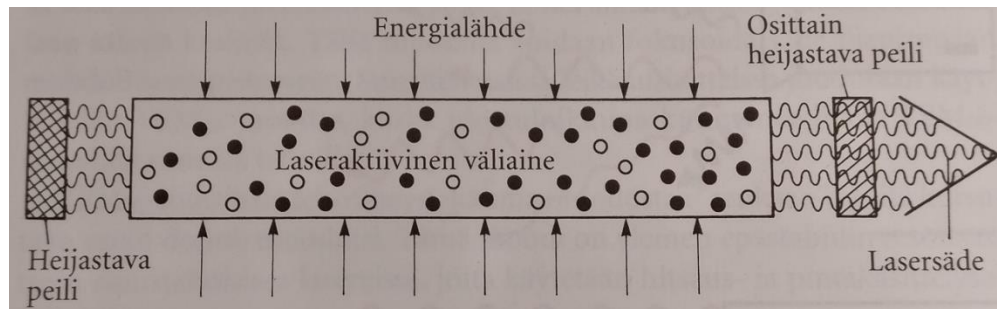
5.1 Biolietteen laserkäsittely

Laservaloilmion teorian esitti Albert Einstein vuonna 1912. 60-luvun alussa kehitettiin ensimmäinen laserlaite. Laser vakiinnutti paikkansa teollisena työkonena 80-luvun lopussa. Perinteisesti laseria on käytetty konepajateollisuudessa. Laseria käytetään leikkaamiseen, merkkäamiseen, poraamiseen, pintakäsittelyyn ja hitsaukseen. Laseria käytetään myös monissa muissa sovelluksissa esimerkiksi viihde- ja näytöstarkoituksissa, kirurgiassa, tiedonsiirto sovelluksissa, mittauksessa ja kaukokartoituksessa (Kujanpää et al., 2005, s. 14, 33-34).

5.1.1 Laser

Sana laser tulee englannin kielen sanoista Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Tämä tarkoittaa, että valoa vahvistetaan stimuloitun emission

avulla. Kaikki laserit ovat siis optisia vahvistimia, jotka koostuvat kolmesta pääkomponentista. Komponentteja ovat laseroiva väliaine, kaksi peiliä (ainakin toinen on puoliläpäisevä) ja pumppausenergia. Väliaine voi olla kiinteää, nestettä tai kaasu. Pumppausenergiaa käytetään virittämään väliaineen elektroneja korkeammalle energiatasolle. Pumppausenergia voi olla esimerkiksi sähköä tai valoenergiaa. Laservalo on lähes yhdensuuntaista eli kollimoitua, samanvaiheista eli koherenttia ja yksiväristä eli monokromaattista. Nämä ominaisuudet tuovat laserille ainutlaatuisia ominaisuuksia varattuna normaaliin valoon. (Kujanpää et al., 2005, s. 33-34).



Kuva 15. Laseroinnin periaate (Kujanpää et al., 2005, s. 35).

Lasersäde muodostuu ns. resonaattorissa. Resonaattori koostuu kahdesta peilistä ja laseroivasta väliaineesta (kuva 15). Resonaattorissa olevaa väliaineeseen tuodaan energiaa jolloin väliaineen elektronit virittyvät korkeammalle energiatasolle. Kun väliaineen elektronit palaavat alempaan tilaan, samalla vapautuu energiaa fotonien muodossa. Jos muodostuneet fotonit törmäävät muihin virittyneen tilan elektroneihin aiheuttaa se virittyneen tilan purkautumisen, jossa vapautuu uusia fotoneja. Kyseistä tapahtumaa kutsutaan stimuloitukseksi emissioksi. Lasersäde muodostuu kahden peilin väliin, jossa valo kulkee edestakaisin ja vahvistaa stimuloitua emissioita ko. suunnassa. Toinen peileistä on puoliläpäisevä, jolloin lasersäde pääsee ulos resonaattorista (Kujanpää et al., 2005, s. 34).

Lasersäde voi olla jatkuvatehoinen (CW-laser, continuous wave) tai pulssattu (pulsilaser, pulse laser). Jatkuvatehoisessa lasersäteessä säteen teho on jatkuva ja tasainen. Pulssilaserissa lasersäde on yksittäinen pulssi, jota toistetaan sarjana. Pulssin

kesto voi vaihdella sekunnista femttosekuntiin (10^{-15} s). Pulssattu lasersäde voidaan muodostaa pulssilaserilla tai pulssaamalla CW-laserin sädettä. Pulssilaserilla voidaan tuottaa lyhyitä ja suuritehoisia laserpulsseja kohtuullisen pieneni tehoisella laserilla (Kujanpää et al., 2005, s. 39-40).

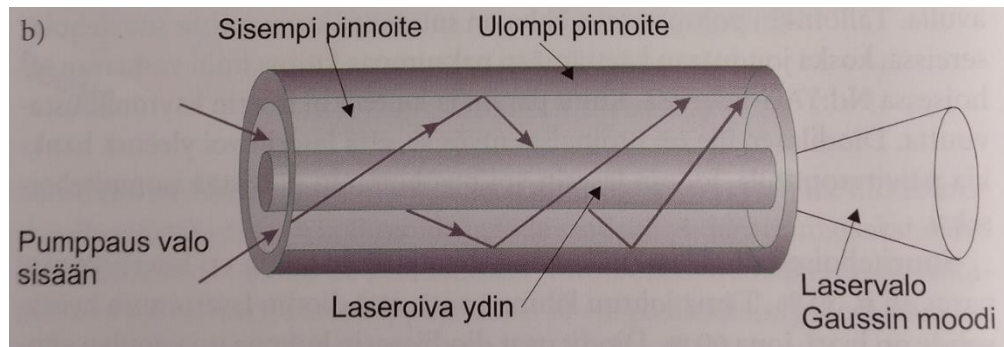
5.1.2 Laserit ja prosessiparametrit

Hiilidioksidilaser (CO_2 -laser) on yleinen teollisuuslaser. Hiilidioksidilaser käyttää laseroivana väliaineena kaasuseosta, joka muodostuu hiilidioksidista, typestä ja heliumista. Hiilidioksidilaserin kaasuseos on resonaattorikohtainen. Tyypillisesti resonaattorikaasu sisältää hiilidioksidia 1 – 9 %, typpeä 13 – 35 % ja heliumia 60 – 85 %. Hiilidioksidi toimii varsinaisena laseroivana kaasuna. Typen tehtävänä on toimia eräänlaisena herättäjänä. Typpi avustaa sähköisen energian siirtoa CO_2 -molekyyliin. Resonaattorissa syntyy aina hukkalämpöä. Heliumin tarkoitus on sitoa ylimääräinen lämpö ja siirtää ylimääräinen lämpö pois resonaattorista. Heliumilla on kyky siirtää lämpöä tehokkaasti, eikä helium haittaa varsinaista laserointiprosessia. Hiilidioksidilaser toimii infrapuna-alueella. Sen tuottamat aallonpituudet ovat $10,6 \mu\text{m}$ ja $9,6 \mu\text{m}$. Laseroivaa väliainetta viritetään hiilidioksidilaserissa sähkövirran avulla. Hiilidioksidilaserin hyötysuhde on 10 – 15 %. Teoreettinen hyötysuhde hiilidioksidilaserilla on noin 21 % (Kujanpää et al., 2005, s. 54-55). Hiilidioksidilaserin hyviä puolia on suhteellisen edullinen hankinta hinta. Huonoja puolia ovat huono hyötysuhde sekä lasersäde pitää kuljettaa peilien avulla käsiteltävään kohteeseen (Kellens et al., 2014).

Diodilaser koostuu monista pienistä diodilasereista. Laserointi tapahtuu diodissa. Resonaattorina diodissa toimii puolijohde. Diodit kootaan noin 20 diodin nipuiksi joita voidaan pinota päällekkäin, jolloin saadaan lasermoduuli. Lasermoduulia kutsutaan myös nimellä pakka. Suuri tehoisissa diodilasereissa yhdistetään pakkojen tuottamia säteitä samalle optiselle akselille. Diodilaserin tuottama säteen koko on isompi kuin muissa lasereissa. Diodilaserin aallonpituudet ovat 808, 940 ja 980 nm. Yleisimmin käytettyjä ovat 808 ja 940 nm (Kujanpää et al., 2005, s. 65-67). Diodilaserin hyviä puolia ovat korkea hyötysuhde (noin 30 %), kompakti koko, edulli-

set ylläpito kustannukset, suhteellisen alhainen hankinta hinta ja lasersädettä voidaan kuljettaa optisella kuidulla. Huonoja puolia ovat säteen laatu ja aallonpituus-alue (Kujanpää et al., 2005, s. 67, Kellens et al., 2014)

Kuitulaserissa lasersäde synnytetään suoraan optisen kuidun sisään. Kuidun sisään pumpataan valoa diodilaserilla. Kuidun ydin on saostettu laseroivalla väliaineella. Kuitulaserissa kuitu itsessään toimii resonaattorina. Kuitulaserin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 16. Kuitulaserit ovat tyypillisesti rakenteeltaan modulaarisia. Korkea teho saadaan yhdistämällä useamman moduulin säteet toisiinsa (Kujanpää et al., 2005, s. 68). Kuitulaserin tuottama aallonpituus on 1060 nm. Kuitulaserin hyviä puolia ovat hyvä hyötysuhde, korkea säteen laatu, edulliset ylläpito kustannukset ja lasersädettä voidaan kuljettaa optisella kuidulla. Huonoja puolia ovat korkea hankinta hinta (Kellens et al., 2014).



Kuva 16. Kuitulaserin toimintaperiaate (Kujanpää et al., 2005, s. 68).

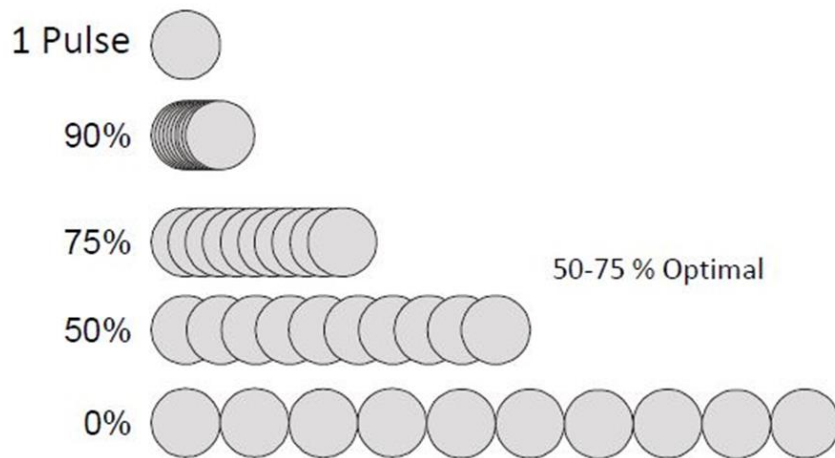
Laserkäsittelyn vaikuttaa laser kohtaisen aallonpituuden lisäksi laserin parametrit. Jatkovatehoisen laserin parametreja ovat laserteho, työstönopeus, polttopisteen halkaisija ja polttopisteen paikka. Pulssilaser parametreja ovat laserteho, pulssipituus, työstönopeusnopeus, overlap, viivaväli, polttopisteen halkaisija ja polttopisteen sijainti (Kujanpää et al., 2005, s. 305-306).

Laserteho vaikuttaa saavutettavaan työstönopeuteen sekä kuinka syväälle lasersäde tunkeutuu materiaaliin. Työstönopeus vaikuttaa laserkäsittely nopeuteen. Työstönopeus vaikuttaa kuinka paljon lämpöä siirtyy työstettävään materiaaliin, kun käytetään vakio tehoa (Kujanpää et al., 2005, s. 305).

Polttopisteen halkaisija vaikuttaa lasersäteen tehottiheyteen yhdessä lasertehon kanssa. Pienempi polttopisteen halkaisija mahdollistaa suuremman tehottiheyden samalla teholla. Polttopisteen sijainti vaikuttaa lasersäteen tehottiheyteen materiaalin pinnalla. Tehottiheys on suurimmilla, kun polttopiste on asetettu materiaalin pinnalle. Tehottiheys heikkenee materiaalin pinnalla, kun polttopistettä siirretään ylös tai alaspäin (Kujanpää et al., 2005, s. 307).

Pulssin pituus vaikuttaa lasersäteen huipputehoon, lämmöntuontiin ja pulssin energiaan. Lyhentämällä pulssin pituutta saavutetaan korkeampi huipputeho, mutta samalla pulssin energia laskee ja lämmöntuonti materiaaliin vähenee.

Overlap tarkoittaa kuinka paljon perättäiset pulssit menevät päällekkäin. Kuvassa 17 on havainnollistettu pulssien päällekkäisyyttä välillä 0 – 90 %. Suurempi overlap välittää enemmän lämpöä työstettävään materiaaliin.

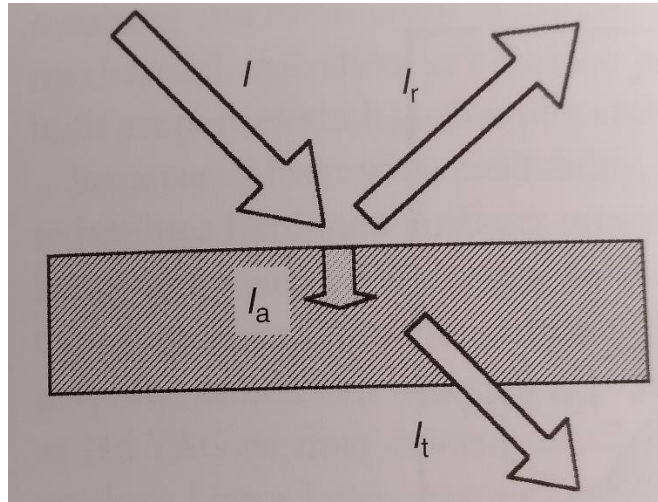


Kuva 17. Pulssilaserin overlap periaatekuva.

Bioliikkeen laserkäsittelyssä lasersädettä liikutetaan edestakaisin astian reunalta reunalta. Lasersäteiden siirtymää kohtisuorassa edestakaiseen liikkeeseen kutsutaan viivaväliksi (hatch). Viivaväliä muuttamalla voidaan vaikuttaa laserkäsittelyn nopeuteen ja lasersäteiden käsittelemään pinta-alaan.

5.1.3 Laserin vaikutusmekanismi materiaaliin ja soluihin

Lasersäteen osuessa materiaaliin osa säteestä absorboituu materiaaliin, osa taittuu materiaalin sisään ja kulkee sen läpi tai heijastuu rajapinnalta takaisin (kuva 18). Lasersäteen absorptio ja läpäisevyys eri aallonpituuksille on materiaali ja aallonpituuskohtainen ominaisuus. Lasersäteen absorptioon vaikuttaa moni tekijä. Tärkeimmät tekijät ovat materiaali, valon aallonpituus, lämpötila ja absorboivan pinnan laatu. Lasersäteen absorptio vaikuttaa suoraan materiaalin työstettävyyteen (Kujanpää et al., 2005, s. 44).

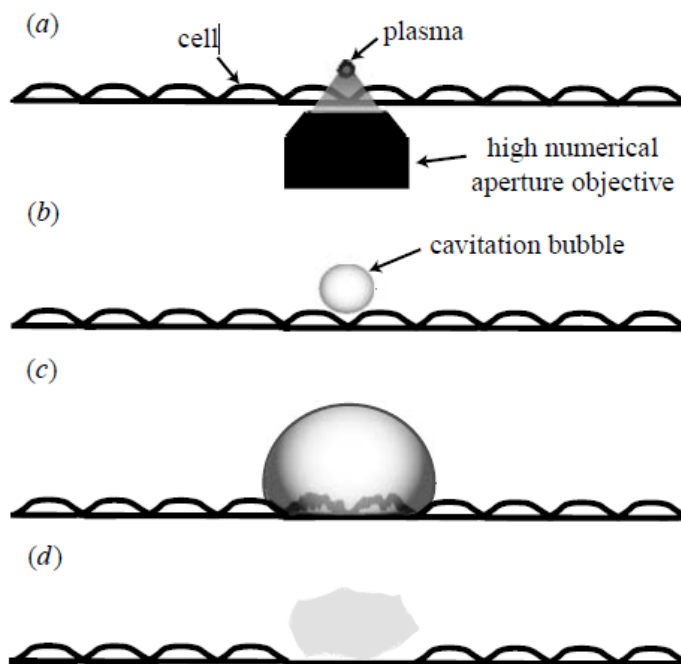


Kuva 18. Lasersäteen käyttäytyminen materiaalissa. I on tuleva lasersäde, I_r on heijastunut lasersäde, I_t on materiaalin läpi mennyt lasersäde ja I_a on materiaaliin absorboitunut lasersäde (Lackner, 2008, s. 1197).

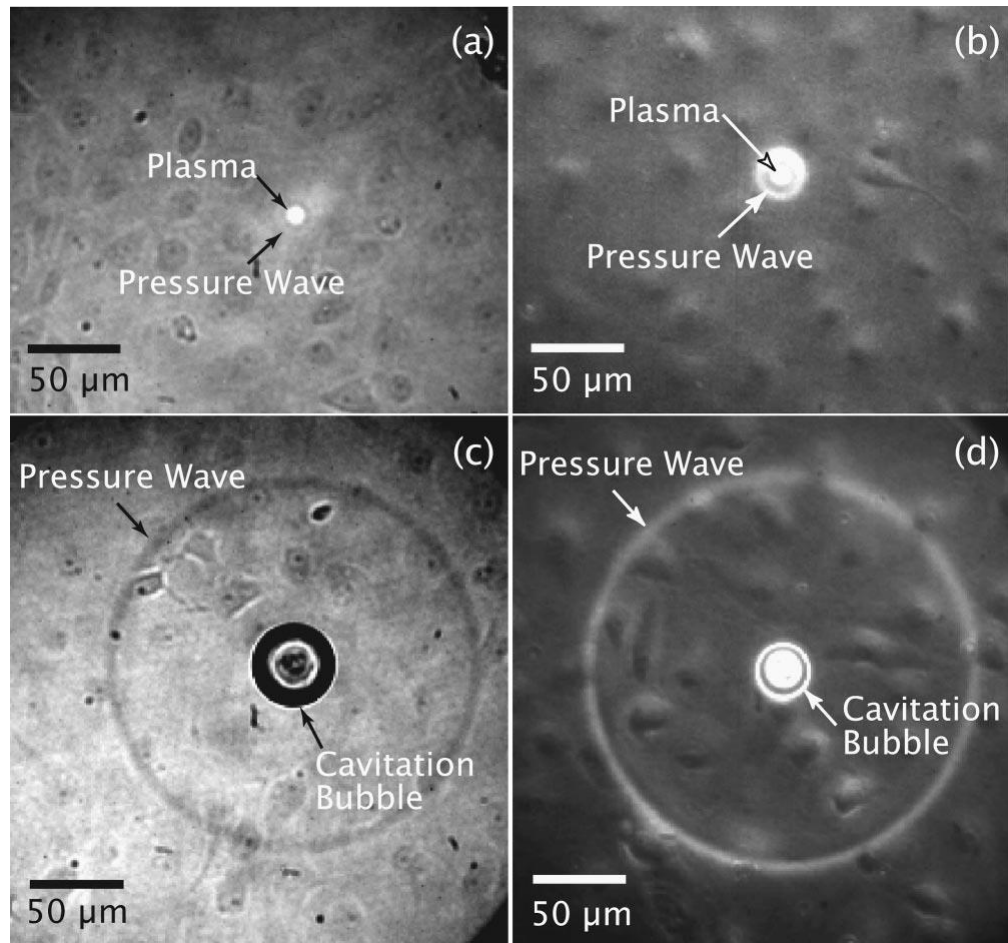
Lasersäteen vaikutus biologiseen kudokseen riippuu aallonpituudesta, käsittely ajasta ja tehottiheydestä. Aallonpituudella 780 – 3000 nm lasersäde vahingoittaa eniten solukudosta. Aallonpituudella 10600 nm lasersäde adsorboituu solujen sisältämään veteen aiheuttaen höyrystymistä ja fotokoagulaatiota (photocoagulation) (Lackner, 2008, s. 1214-1215).

Biologiseen kudokseen vaikuttaa lasersäteen muodostama lämpö ja suurilla tehottiheyksillä lasersäteen muodostama plasman. Lasersäteen tuoma lämpö aiheuttaa solukudoksessa fyysisiä muutoksia, kuten koagulaatiota, hiiltymistä ja haihtumista. Plasmanmuodostus aiheuttaa voimakkaan shokkiaallon joka rikkoo solukudosta.

(Lackner, 2008, s. 1215-1216). Solujen hajotuksen periaate plasman avulla on esitetty kuvassa 19. Pulssilaserin säde muodostaa plasmaa (kuva 19 a). Plasman muodostumisen seurauksena syntyy paineaalto (kuva 20), jonka seurauksena syntyy kavitaatio kupla (kuva 19 b) joka laajenee ja supistuu (kuva 19 c). Solut jotka sijaitsevat kavitaatio kuplan vaikutusalueella rikkoontuvat (kuva 19 d) (Brown & Audet, 2008).



Kuva 19. Solu hajotuksen periaate pulssilaserilla. a) laserpulssi muodostaa plasmaa, b) kavitaatio kuplan muodostus, c) laajeneva kavitaatio kupla ja d) kavitaatio kuplan vaikutusalueella olevat solut rikkoontuvat (Brown & Audet, 2008)

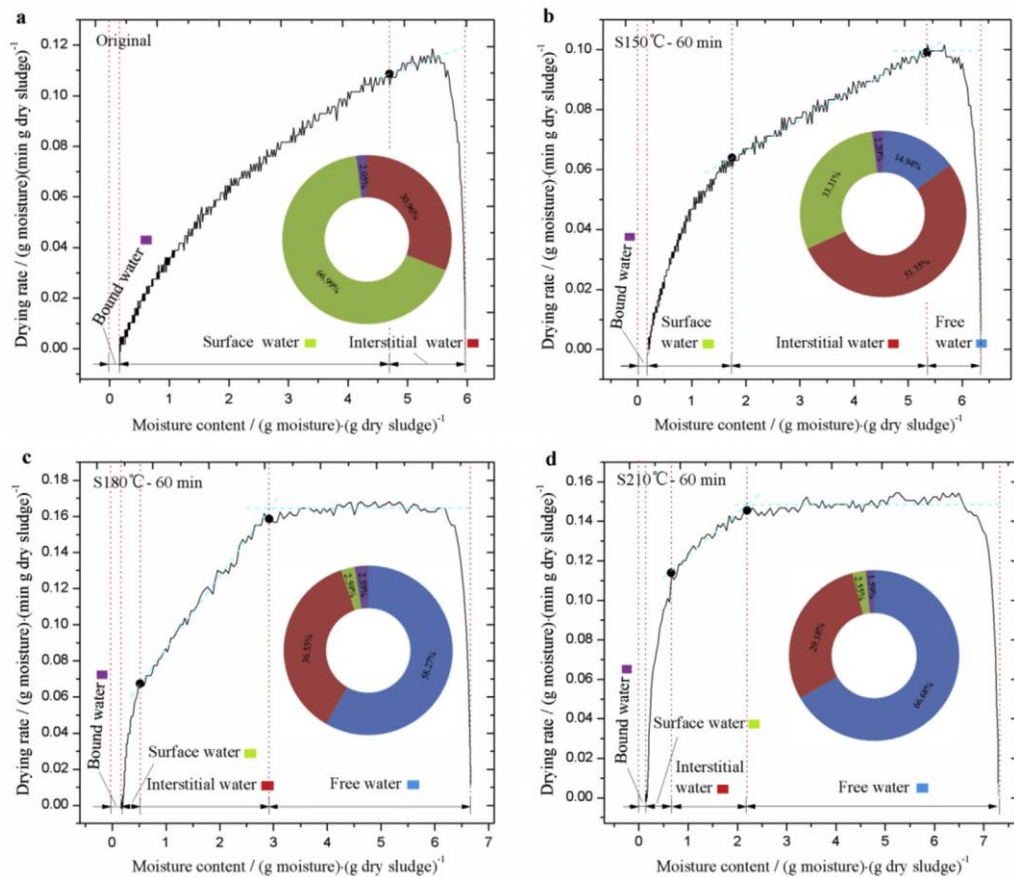


Kuva 20. Plasman ja kavitaatio kuplan muodostus soluviljelmässä käytettäessä pulssilaseria. A ja b kuvat 10 ns laserpulssein jälkeen ja c ja d kuvat 67 ns laserpulssein jälkeen (Rau et al., 2004).

5.2 Biolietteen märkäpyrolyysi

Märkäpyrolyysi eli hydrothermal carbonization (HTC) on prosessi, jossa vesipitoista biomassaa muunnetaan hiili pitoiseksi tuotteeksi, suhteellisen matalassa lämpötilassa (180 – 250 °C) ja korkeassa autogeenisessä paineessa (1 – 4 MPa) suljetussa astiassa. Käsittelyaika märkäpyrolyysi käsittelyssä on tyypillisesti useita tunteja. Märkäpyrolyysin päätuote on hiili pitoinen kiinteä tuote. Syntyvä hiili pitoinen tuote on hydrofiilisempi, energia tiheämpi ja hauraampi (helposti mureneva) kuin lähtö materiaali. Muita syntyviä tuotteita ovat prosessi vesi ja kaasut (Luque et al., 2016, s. 513).

Märkäpyrolyysi prosessin suurin hyöty on, että sen avulla voidaan käsitellä raaka-aineita, joiden käsittely on hankala muilla menetelmillä. Lietteet sopivat hyvin märkäpyrolyysin raaka-aineeksi niiden sisältämän korkean vesipitoisuuden vuoksi (Luque et al., 2016, s. 521). Wang et al. tutkivat lietteiden käsittelemistä märkäpyrolyysi avulla eri lämpötiloissa. Lämpötilat olivat 120 °C, 150 °C, 180 °C ja 210 °C ja käsittely aika oli jokaisessa lämpötilassa 60 min. Tutkimuksen mukaan märkäpyrolyysi on tehokas metodi parantamaan biolietteen vedenpoistoa suhteellisen matalalla energia määrällä. Märkäpyrolyysi käsittely vaikuttaa veden sitoutumiseen biolietteessä. Märkäpyrolyysi käsittely lisää vapaan veden osuutta biolietteessä, jolloin mekaanisen vedenpoiston avulla on mahdollista saavuttaa korkeampi kuiva-ainepitoisuus. Kuvasta 21 nähdään, että vapaan veden osuus biolietteessä lisääntyy, kun HTC-käsittelyn lämpötila nostetaan (Wang et al., 2017).



Kuva 21. Veden sitoutuminen biolietteessä a) Alkuperäinen bioliete, b) 150 °C / 60 min HTC-käsitelty bioliete c) 180 °C / 60 min HTC-käsitelty bioliete d) 210 °C / 60 min HTC-käsitelty bioliete (Wang et al., 2017).

5.2.1 Prosessiparametrit

Märkäpyrolyysin prosessiparametreja ovat lämpötila, paine, käsittely aika ja vesi biomassassa suhde. Lämpötila on märkäpyrolyysin pääparametri. Lämpötilan nosto parantaa biomassassa muuntumista hiili pitoiseksi tuotteiksi. Lämpötilan nosto laskee kiinteän tuotteen saantoa, mutta nostaa netemäisen ja kaasumaisten tuotteiden saantoa. Korkeammassa lämpötilassa selluloosa ja ligniini osallistuvat hajoamisreaktioihin, kun taas matalammassa lämpötilassa vain hemiselluloosa osallistuu hajoamisreaktioihin. Korkeampi lämpötila nostaa lopputuotteen lämpöarvoa (Heidari et al., 2018).

Märkäpyrolyysi prosessin paine vaihtelee ja se riippuu lämpötilasta. Paineen nosto pienentää partikkelikokoa ja laajentaa sen jakaumaa. Tuotteen lämpöarvo nousee myös hieman paineen noustessa. Korkeampi paine nostaa tuotteen vety pitoisuutta ja laskee happi pitoisuutta pienissä määrin. Alle 30 Mpa paineessa paineen vaikutus lopputuotteen ominaisuuksiin ei ole kovinkaan merkittävä. Laboratorio mittakaavassa voidaan käyttää autogeenista painetta, jolloin paine määräytyy lämpötilan mukaan ja vesi pysy pääasiassa nestefaasissa. Teollisessa märkäpyrolyysissä korkeamman paineen käyttö nostaa investointikustannuksia, täten teollisen mittakaavan prosessi voi olla kannattavampaa toimia alle autogeenisen paineen, koska paineen noston hyödy eivät ole käytännössä kovinkaan merkittäviä (Heidari et al., 2018).

Märkäpyrolyysin käsittely ajat vaihtelevat muutamista minuuteista useisiin tunteihin. Pidempi käsittely aika lisää biomassassa muuntumista hiilipitoiseksi tuotteeksi. Myös prosessi nesteen ja kaasujen määrät lisääntyvät käsittely ajan pidetessä. Käsittely ajan vaikutus lopputuotteen lämpöarvon paranemiseen on vähäinen. Lämpötilan nostolla saavutetaan suurempi lopputuotteen lämpöarvon paraneminen. Pidempi käsittely aika lisää märkäpyrolyysi prosessin energian kulutusta (Heidari et al., 2018).

Biomassan tulee olla nesteen peittämä, jotta biomassan hiiltyminen tapahtuu tehokkaasti märkäpyrolyysissä. Neste määrän lisäämisellä on positiivisia vaikutuksia

biomassa muuntumiseksi hiilipitoiseksi tuotteeksi ja se parantaa lopputuotteen fyysisiä ominaisuuksia kuten pinta-alaa ja huokostilavuutta. Neste määrän vähentäminen voi johtaa alhaisempaan prosessin viipymisaikoihin, aikaisempaan polymerointiin ja korkeampaan hiilipitoisen lopputuotteen saantoon. Neste määrä vaikuttaa prosessin energiatalouteen. Suuremman neste määrän lämmittäminen vaatii enemmän energiaa. (Heidari et al., 2018).

5.2.2 Märkäpyrolyysin mahdolliset tuotteet

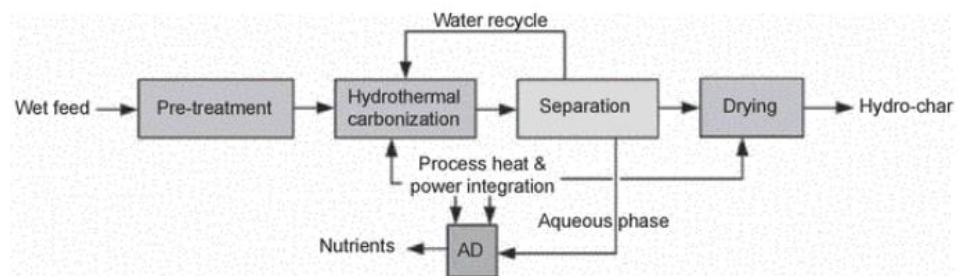
Märkäpyrolyysissä syntyvälle hiili pitoiselle tuotteelle ei ole vakiintunutta suomenkielistä nimitystä. Alatalo käytti väitöstyönsä suomenkielisessä tiivistelmässä märkäpyrolyysissä syntyvälle hiili pitoiselle tuotteelle nimitystä märkähiili. Englannin kielisissä artikkeleissa märkäpyrolysoitua biomassaa kutsutaan nimillä hydrochar, HTC coal tai bio coal. Tässä työssä märkäpyrolyysissä syntyvälle hiilipitoiselle tuotteelle käytetään nimitystä HTC-hiili.

Metsäteollisuuden lietteistä valmistettua HTC-hiiltä voidaan polttaa sellutehtaan kuorikattilassa muun poltettavan materiaalin seassa. Muita mahdollisia vaihtoehtoja on käyttää HTC-hiiltä meesauunin polttoaineena korvaamaan fossiilisia polttoaineita tai polttaa soodakattilassa mustalipeän joukossa. Molemmissa tapauksissa tulee ottaa huomioon, että HTC-hiili sisältää tuhkaa, metalleja ja epäorgaanisia aineita, jotka voivat vaikuttaa sellutehtaan kemikaalikiertoon. HTC-hiili on myös mahdollista pelletoida ja myydä ulkopuolisille polttolaitoksille tai käyttää maanparannusaineena tai lannoitteena (Häreskog, 2018). Viimevuosina on tutkittu HTC-hiilen mahdollisuuksia toimia suhteellisen edullisena adsorbointi aineena. HTC-hiili toimisi aktiivihiekin tavoin ja sen avulla voitaisiin puhdistaa epäpuhtauksia vedestä ja ilmasta (Child, 2014).

5.2.3 Teollisen mittakaavan märkäpyrolyysi prosessi

Teollisessa märkäpyrolyysissä vesipitoinen biomassa syötetään HTC-reaktoriin ja käsitellään noin 180 – 230 °C lämpötilassa. Reaktori voi olla jatkuva tai erä tyyppi-

nen. Käsittelyaika vaihtelee riippuen syötteestä. Yleensä käsittelyaika on useita tunteja. Käsittelyn jälkeen HTC-liete johdetaan mekaaniseen veden poistoon. Mekaanisen vedenpoiston jälkeen hiilipitoinen tuote voidaan kuivata ja pelletoida tai polttaa sellaisenaan muun polttoaineen joukossa. (Luque et al., 2016, s. 517-518). Kuvasssa 22 on esitetty märkäpyrolyysi prosessin periaatekuva.



Kuva 22. Märkäpyrolyysi prosessin periaatekuva (Luque et al., 2016, s. 518).

Riippuen raaka-aineesta märkäpyrolyysi prosessi voi tarvita esikäsittelyn. Esikäsitellyssä voidaan pienentää partikkelikokoa ja/tai poistaa epäpuhtauksia kuten kiviä, metallia tai muovia. Lietteille voidaan tehdä mekaaninen veden erotus, sillä syöttö raaka-aineen kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti 10 – 30 %. Prosessiveden kierrätys parantaa prosessin lämpötaloutta ja parantaa lopputuotteen saantoa. Huonona puolena prosessiveden kierrätyksessä on, että epäorgaanisten yhdisteiden pitoisuus voi kasvaa reaktorissa. Tämä voi aiheuttaa suola korroosiota reaktorissa (Luque et al., 2016, s. 509, 518, 524).

Taulukossa V on esitetty pilotti mittakaavan märkäpyrolyysi laitosten prosessiparametreja ja niiden valmistajat. Suurin osa reaktoreista ovat jatkuvatoimisia ja prosessilämpötila alue vaihtelee 180 °C ja 230 °C välillä. Käsittelyajat vaihtelevat 4 – 15 tuntiin. Vuosittaiset tuotantokapasiteetit vaihtelevat 6000 ja 60000 tonnin välillä.

Taulukko V. Märkäpyrolyysi laitteiden teollisia valmistajia, prosessiparametrit ja kapasiteetti (Luque et al., 2016, s. 536)

Valmistaja	Aloitus vuosi	Reaktori	Lämpötila, °C	Paine, MPa	Käsittelyaika, h	Kapasiteetti, t/vuosi
Sun Coal	2012	Jatkuva	200	2	6-12	60000
AVA-CO ₂	2010	Erä	220-230	2,4	5-10	50000
TFC Engineering	2012	Jatkuva	200-230	2-2,5	3-4	10000
Terra Nova Energy	2010	Jatkuva	200	2-3,5	4	8000
Ingelia FL	2010	Jatkuva	180-220	1,7-2,4	4-8	6000

6 LIETTEEN ESIKÄSITTELYMENETELMIEN TEKNILLINEN JA TALOUDELLINEN TARKASTELU

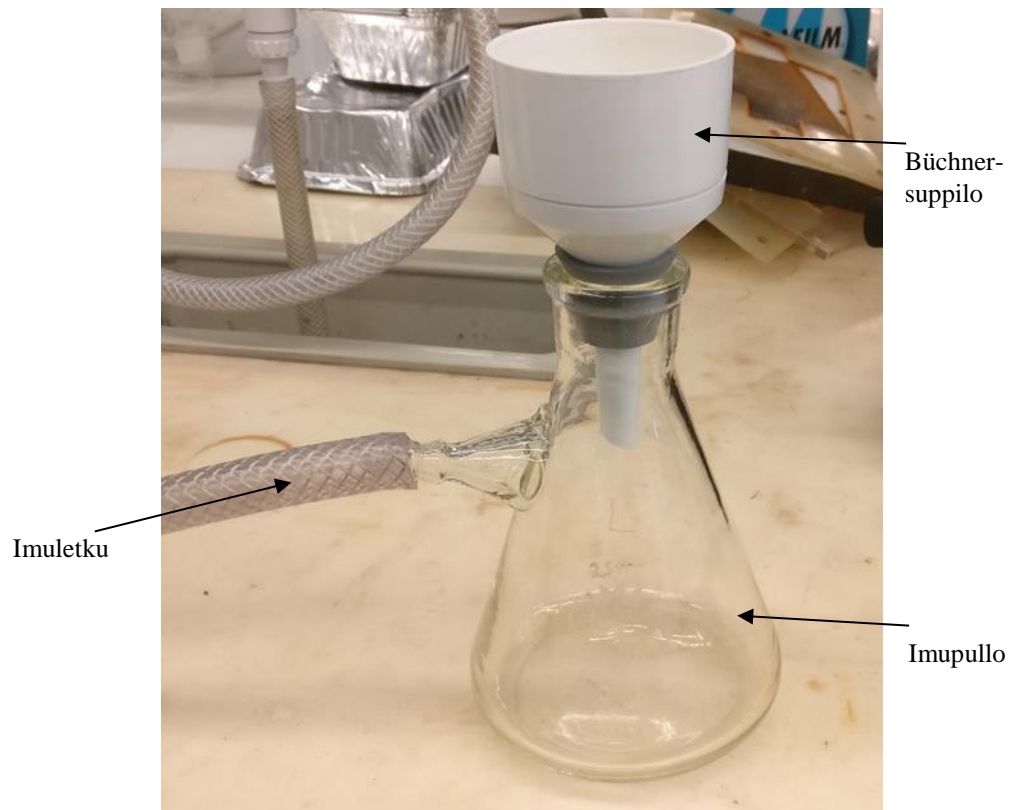
Diplomityön kokeellisessa osassa tehtiin laser- ja märkäpyrolyysikäsitely metsäteollisuuden biolietteelle. Laserkäsitelyssä tutkittiin kolmea jatkuvatehoista laseria ja yhtä pulssilaseria. Jatkuvatehoiset laserit olivat CO₂-, kuitu- ja diodilaser. Märkäpyrolyysikäsitely tehtiin laboratoriomittakaavan putkireaktorilla. Käsitelty bioliete suodatettiin ja syntyneestä lietekakusta määritettiin kuiva-ainepitoisuus. Märkäpyrolyysikäsiteltylle biolietteelle määritettiin myös ominaislämpökapasiteetti. Suodatus tulosten perusteella arvioitiin esikäsitelymenetelmien teknistä soveltuvuutta biolietteen esikäsitelyyn. Esikäsitely menetelmien taloudellinen tarkastelu suoritettiin esimerkissä, jossa metsäteollisuuden biolietteelle tehdään esikäsitely, mekaaninen suodatus ja kuivattu liete poltetaan.

Diplomityössä tutkittiin myös biohiilen toimivuutta metsäteollisuuden sekalietteen ja biolietteen suodatuksen tukiaineena. Käytetty biohiili oli torrefioitua puuta ja biolietteen märkäpyrolyysikäsitelystä saatua HTC-hiiltä. Biolietteen suotautuvuutta tutkittiin biohiilen eri partikkelikoilla ja kolmella eri annostelu määrällä. Lietekakuista määritettiin kuiva-ainepitoisuudet, sekä tarkasteltiin suodatus nopeutta.

6.1 Suodatus ja analyysimenetelmät

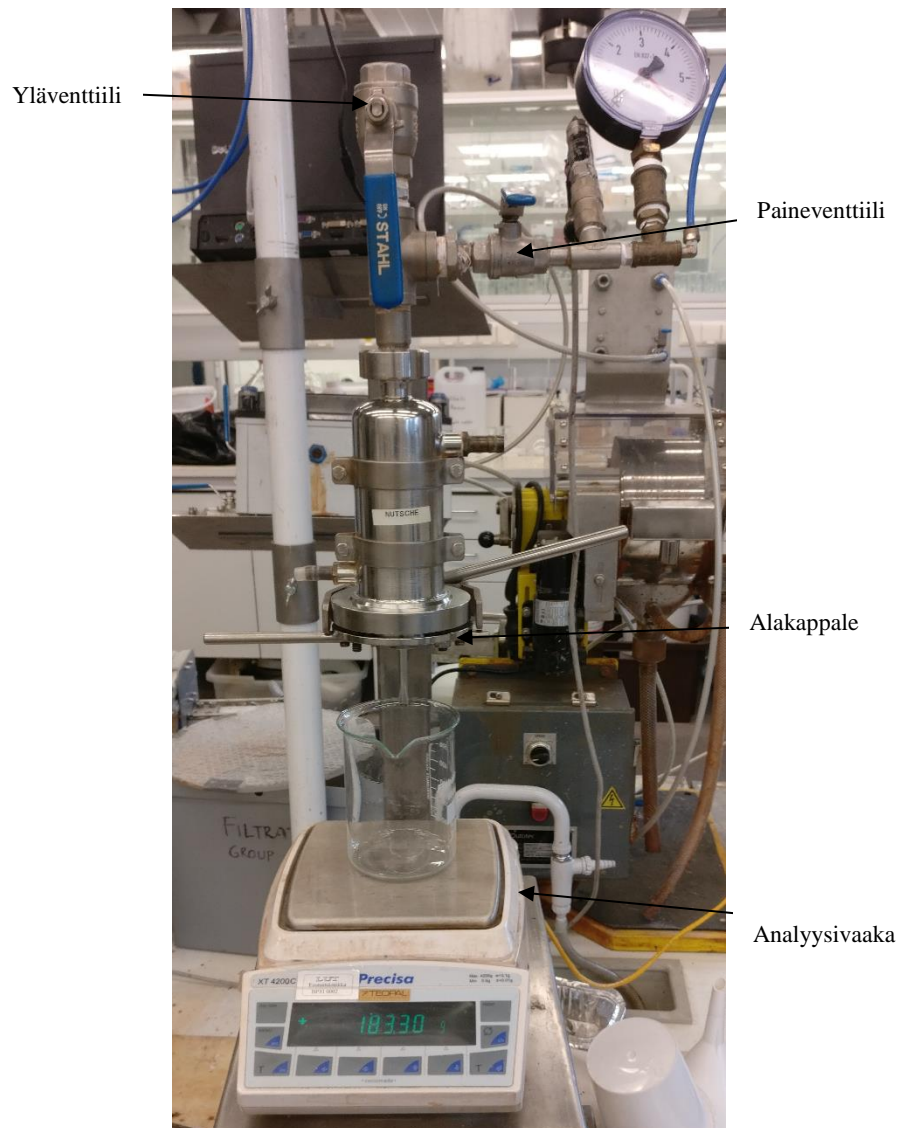
6.1.1 Suodatus

Suodatukset tehtiin LUT-yliopiston erotustekniikan laboratoriossa. Suodatuksissa käytettiin imusuodatinta ja painesuodatinta. Imusuodatin koostui Büchnersuppilosta, imupullosta, suodatinpaperista ja imuletkusta (kuva 23). Suodatinpaperina käytettiin Whatman 113. Suodatus aloitettiin punnitsemalla haluttu määrä näytettä dekanterilasiin. Suodattimeen kytkettiin imu päälle. Ennen näytteen kaatamista suppiloon suodatinpaperi kostutettiin näytteellä pipetin avulla. Kostuttamisen tarkoituksena oli varmistaa, että suodatin paperi pysyy tiiviisti imusuppilossa. Näyte kaadettiin suppiloon. Suodatus lopetettiin, kun muodostunut lietekakku alkoi haljeta.



Kuva 23. Imusuodatin laitteisto: Büchnersuppilo, imupullo ja imuletku.

Painesuodatukset tehtiin Nutsche-painesuodattimella (kuva 24). Suodatinlaitteisto koostui Nutsche-painesuodattimesta, analyysivaa'asta ja datankeruuyksiköstä. Jokaisessa painesuodatuksessa käytettiin 6 bar painetta.



Kuva 24. Nutsche-painesuodatin.

Nutsche-painesuodatus aloitettiin laittamalla tislattulla vedellä kostutettu suodatin kiekko Nutsche-painesuodattimeen alakappaleeseen. Suodattimena käytettiin Pall T1000 suodatin pahvia. Alakappale kiinnitettiin neljällä mutterilla Nutsche-painesuodattimeen ja suodatuspaine säädettiin haluttuun arvoon paineensäätöventtiilistä. Tarvittava määrä näytettä punnittiin dekanterilasiin. Näyte kaadettiin suodattimeen suppilon avulla. Suodatus aloitettiin sulkemalla yläventtiili ja avaamalla paineventtiili. Samaan aikaan käynnistettiin datankeruu tietokoneelta. Datan keruu ohjelma tallensi käytetyn paineen, suodoksen massan ja kuluneen ajan. Suodos kerättiin 600 ml dekanterilasiin. Suodatus lopetettiin, kun ”paine tuli suodatin kakun läpi”.

Suodatus lopetettiin sulkemalla paineventtiili ja avaamalla yläventtiili. Samaan aikaan lopetettiin datankeruu.

6.1.2 Analyysimenetelmät

Kuiva-ainepitoisuudet määritettiin standardin SFS 3008 mukaan. Kuiva-ainepitoisuuden määrittäminen aloitettiin punnitsemalla näyte analyysivaa'alla, jonka punnitus-tarkkuus oli $\pm 0,1$ mg. Astiana käytettiin haihdutusmaljaa. Punnituksen jälkeen näyte siirrettiin lämpökaappiin, jonka lämpötila oli 105 ± 3 °C. Seuraavana päivänä näyte siirrettiin eksikaattoriin jäähtymään, jonka jälkeen näyte punnittiin analyysivaa'alla. Kuiva-ainepitoisuus laskettiin kaavan 1 mukaan. Kuiva-ainepitoisuus määrittäminen tehtiin käsittelemättömälle biolietteelle, sekä suodatuksesta saaduille lietekakuille.

$$KAP = \frac{m_2 - m_1}{m} \quad (1)$$

KAP	kuiva-ainepitoisuus, %
m_1	astian massa, g
m_2	kuivan lietenäytteen jaastian massa, g
m	määrän lietenäytteen massa, g

Ominaislämpökapasiteetti määritettiin Parr 6400 calorimeter pommikalorimetrillä. Ominaislämpökapasiteetin määrittäminen aloitettiin kuivaamalla näyte yön yli uunissa 105 °C. Kuivauksen jälkeen näyte jauhettiin joko morttelilla tai planeettamylyllä. Jauhetusta näytteestä valmistettiin noin 1 g painoinen pelletti. Pelletti punnittiin ja poltettiin pommikalorimetrissä. Näytteen ominaislämpökapasiteetti kirjattiin ylös pommikalorimetrin näytöltä. Jokaisesta näytteestä tehtiin vähintään kaksi rinnakkaismittausta tai niin monta, että kahden näytteen välinen ero oli pienempi kuin $0,2$ MJ/kg. Näytteestä määritettiin myös analyysikosteus tehollista lämpöarvoa varten.

pH arvot mitattiin alkuperäiselle biolietteelle ja märkäpyrolyysikäsitellylle biolietteelle. pH arvot mitattiin Metrohm 744 ph meterillä.

6.2 Laserkäsittely

Laserkäsittely tehtiin LUT-yliopiston lasertekniikan laboratoriossa. Laserkäsittelyssä käytettiin metsäteollisuuden biolietettä. Käsitellyn biolietteen kuiva-ainepitoisuus oli noin 4 %. Laserkäsittely suoritettiin kolmella jatkuvatehoisella laserilla ja yhdellä pulssilaserilla. Taulukossa VI on esitetty käytetyt laserit sekä niiden käyttämät aallonpituudet.

Taulukko VI. Laserkäsittelyssä käytetyt laserit ja niiden käyttämät aallonpituudet.

Laser	Malli	Aallonpituus, nm	Säteen tyyppi
CO ₂	Bodor BCL-X	10600	Jatkuva
Diodi	Laserline LDF 400-180	940	Jatkuva
Kuitu	IPG YLS-200-SM-WC Ytterbium Fiber Laser	1070	Jatkuva
Pulssi	IPG YLPM- 1 -A4-20-20 Pulsed Ytterbium Fiber Lasers	1064	Pulssattu

Jatkuvatehoiset laserkäsittelyt suoritettiin punnitsemalla 7,5 x 10 cm ”maksalaatikofolioon” noin 70 g biolietettä. Astiassa olevan biolietteen kerrospaksuus oli noin 9 mm. Ennen laserkäsittelyn aloittamista lasersäteiden polttopiste asetettiin biolietteen pintaan. Astiassa olevaa biolietettä sädetettiin niin, että lasersäde käsitteli koko astian pinta-alan. Laserkäsittely suoritettiin eri laser tyypeillä ja laserparametreilla (taulukko VII). Laserkäsittelyn jälkeen bioliete kaadettiin säilytysastiaan odottamaan suodatusta.

Taulukko VII. Jatkuvatehoisen laserinkäsittelyparametrit.

Jatkuvatehoisen laser				
Laser/mittaus	Teho, W	Nopeus, mm/s	Polttopisteen halkaisija, mm	Tehotiheys, W/mm ²
CO ₂ 1	70	100	0,1572	3,61
CO ₂ 2	70	50	0,1572	3,61
Kuitu 1	50	350	0,0795	10,07
Kuitu 2	100	350	0,0795	20,15
Kuitu 3	200	150	0,0795	40,29
Diodi 1	180	20	2,978	25,84

Pulssilaserkäsittely suoritettiin punnitsemalla 5 x 5 cm metalliastiaan noin 15 g biolietettä. Laserkäsittely tehtiin 3 kertaa kullekin näytteelle, käsittelyjen välissä näytettä sekoitettiin. Kaksi samoilla parametreilla käsiteltyä näytettä yhdistettiin, jolloin saatiin noin 30 g näyte suodatusta varten. Astiassa olevaa biolietettä sädetettiin

niin, että lasersäde käsitteli koko astian pinta-alan. Laserkäsittely suoritettiin laserparametreilla, jotka on esitetty taulukossa VIII. Laserkäsittelyn jälkeen bioliete kaadettiin säilytys astiaan odottamaan suodatusta.

Taulukko VIII. Pulssilaserin laserkäsittelyparametrit.

Näyte	Pulssipituus, ns	Skannausnopeus, mm/s	Frekvenssi, kHz	Overlap, %	Polttopiste, mm	Teho, W	Viivaväli, mm
Pulssipituus							
1	200	1400	105	75	0	20	0,03
2	50	1400	105	75	0	20	0,03
3	4	1400	105	75	0	20	0,03
Overlap							
1	4	1400	210	98	0	20	0,03
2	4	1400	105	75	0	20	0,03
3	4	1400	35	0	0	20	0,03
Polttopiste							
1	4	1400	210	75	0	20	0,03
2	4	1400	105	75	-1	20	0,03
3	4	1400	35	75	-2	20	0,03
Skannausnopeus							
1	4	2800	210	75	0	20	0,03
2	4	1400	105	75	0	20	0,03
3	4	700	53	75	0	20	0,03
4	4	350	26	75	0	20	0,03
Viivaväli							
1	4	1400	105	75	0	20	0,01
2	4	1400	105	75	0	20	0,03
3	4	1400	105	75	0	20	0,05

6.2.1 Tulokset

Jatkuvatehoisten laserien suodatukset tehtiin imusuodattimella. Suodatus tulokset on esitetty taulukossa IX. Taulukossa esitetään suodatuksessa käytetyn biolietteen massa, muodostuneen suodoksen massa, suodatukseen kulunut aika ja lietekakun kuiva-ainepitoisuus (KAP).

Taulukko IX. Jatkuvatehoisen laserin suodatustulokset.

Laser/mittaus	Liete, g	Suodos, g	Suodatus aika, min	KAP, %
CO ₂ 1	68,3	44,3	n. 19	10,0
CO ₂ 2	70,0	47,6	n. 15	10,8
Kuitu 1	68,5	44,8	n. 14	10,5
Kuitu 2	70,0	45,8	n. 15	10,3
Kuitu 3	63,0	37,7	n. 12	9,8
Diodi 1	63,6	41,0	n. 14	10,3
Referenssi	68,5	45,6	n. 14	10,6

Tulosten perusteella yksikään jatkuvatehoinen laser ei paranna biolietteen kuiva-ainepitoisuutta merkittävästi verrattuna referenssi näytteeseen. Ainoastaan CO₂ 2-

mittaus, jossa käytettiin laserin tehona 70 W ja nopeutena 70 mm/s paransi hieman biolietteen kuiva-ainepitoisuutta, mutta 0,2 % parannusta ei voida pitää merkittävänä. Loput mittaukset jäivät referenssi näytteen kuiva-aineistoisuudesta. Tulosten perusteella voidaan todeta, että jatkuvatehoinen laserkäsittely mekaanisen suodatuksen esikäsittelynä ei paranna biolietteen kuiva-ainepitoisuutta.

Taulukon IX tulosten perusteella jatkuvatehoinen laserkäsittely ei nopeuta biolietteen suodatusta. Kuitu 3 mittauksen suodatus aika oli n. 12 min, joka oli noin 2 min nopeampi kuin referenssi näytteellä. Nopeampi suodatusaika selitty osaltaan pienemmästä suodatus määrästä.

Pulssilaserin suodatukset tehtiin imusuodattimella. Suodatus tulokset on esitetty taulukossa X. Taulukossa X esitetään suodatuksessa käytetyn biolietteen massa, muodostuneen suodoksen massa, suodatukseen kulunut aika ja lietekakun kuiva-ainepitoisuus (KAP).

Taulukko X. Pulssilaserin suodatustulokset.

Näyte	Liete, g	Suodos, g	Suodatus aika, s	KAP, %
Pulssipituus				
1	19,6	11,8	281	10,7
2	19,1	11,2	278	10,4
3	19,8	12,9	350	11,6
Overlap				
1	19,6	12,5	350	11,0
2	19,8	12,9	350	11,6
3	19,9	12,5	287	10,4
Polttopiste				
1	19,8	12,9	350	11,6
2	19,9	12,5	273	10,7
3	19,5	12,4	323	11,0
Skannausnopeus				
1	19,5	12,7	360	11,5
2	19,8	12,9	350	11,6
3	19,6	11,9	346	10,6
4	19,4	11,5	332	10,3
Viivaväli				
1	19,1	10,1	262	10,0
2	19,3	11,1	283	10,6
3	19,5	11	285	10,5
Referenssi	20,2	13,2	323	10,8

Tulosten perusteella pulssilaser parantaa parhaimmillaan 0,8 % biolietteen kuiva-ainepitoisuutta. Eri laserparametrien välillä ei ole merkitsevää vaikutusta biolietteen kuiva-ainepitoisuuteen. Tulosten perusteella voidaan todeta, että pulssilaserkäsittely mekaanisen suodatuksen esikäsittelyä ei paranna biolietteen kuiva-ainepitoisuutta.

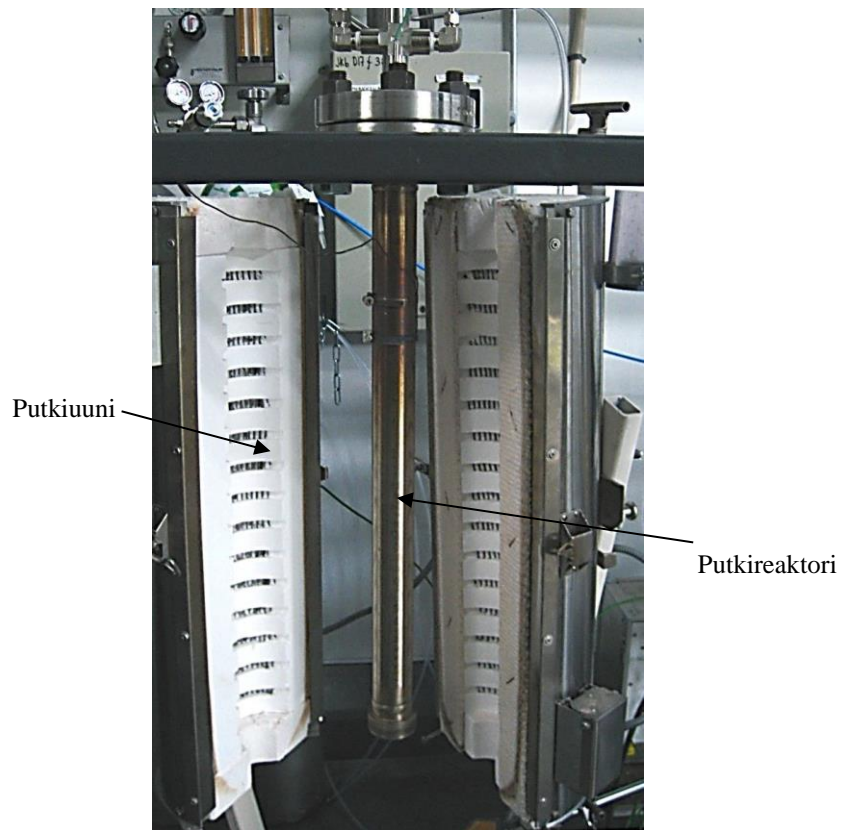
6.2.2 Taloudellinen tarkastelu

Diplomityön yhtenä tavoitteena oli arvioida laserkäsittelyn kustannustehokkuutta biolietteen esikäsittely menetelmänä. Huonoista tuloksista johtuen työn aikana ei kyetty määrittämään minkälainen laser soveltuu biolietteen esikäsittelyyn. Sopivan laserin löytäminen biolietteen esikäsittelyyn vaatii jatkotutkimuksia.

Laserkäsittelyn kustannukset muodostuvat laserlaitteiston hankinta hinnasta ja energian kulutuksesta sekä mahdollisesta uudesta suodatuslaitteiston hankinta hinnasta. Laser esikäsittelyn oletetut hyödyt tulevat biolietteen kuiva-ainepitoisuuden noususta. Kuivemman biolietteen polttaminen tuottaa enemmän lämpö/sähköä. Koska suodatus tulosten perusteella laserkäsittely ei paranna biolietteen kuiva-ainepitoisuutta voidaan tehdä johtopäätös, että laserkäsittely ei ole kannattava biolietteen esikäsittelymenetelmä.

6.3 Märkäpyrolyysikäsittely

Biolietteen märkäpyrolyysikäsittely (HTC-käsittely) suoritettiin LUT-yliopiston energiatekniikan laboratoriossa. HTC-käsittely tehtiin HTC-laitteistolla kuva 25, joka sisältää putkireaktorin, 3,5 kW putkiuunin ja datankeruulaitteiston.



Kuva 25. HTC-laitteisto: putkireaktori ja putkiuuni.

HTC-käsittely aloitettiin valmistelemalla HTC-laitteisto. Ensimmäiseksi suljettiin putkireaktorin pohjakorkki. Sen jälkeen reaktoriin kaadettiin näyte ja laitettiin kansi paikoilleen. Kansi kiristettiin neljällä pultilla. Putkiuuni asetettiin putkireaktorin ympärille ja reaktorin yläosa peitettiin palonkestävällä ”villalla”. HTC-käsittely aloitettiin laittamalla datan keruulaitteisto päälle ja kytkemällä putkiuunin päälle. Lämpötila asetettiin alussa 100 °C, jonka jälkeen lämpötilaa nostettiin 20 °C kerrallaan, kunnes saavutettiin haluttu käsittelylämpötila. Lämmityksen aika seurattiin reaktorin paineen nousua ja mahdollisia vuotoja. Kun lämpötila oli saavutettu jätettiin HTC-laitteisto päälle käsittelyajan ajaksi. Käsittelyajan jälkeen putkiuuni laitettiin pois päältä ja avattiin. HTC-laitteisto jätettiin jäähtymään yön yli. Seuraavana aamuna näyte poistettiin putkireaktorista avaamalla pohjakorkki. Näyte varastoitettiin salpussiin odottamaan suodatusta.

Taulukossa XI on esitetty HTC-käsittelyssä käytetyt prosessiparametrit. Taulukossa esitetään biolietteen kuiva-ainepitoisuus ennen käsittelyä, käsitellyn bioliet-

teen massa, käsittely lämpötila, paine ja aika. Käytetty bioliete oli metsäteollisuuden biolietettä. Näytte 6 suodatettiin kertaalleen ennen HTC-käsittelyä, jolloin sen kuiva-ainepitoisuus oli noin 10 %. Näytteet 4 ja 5 ovat rinnakkaisnäytteitä.

Taulukko XI. HTC-käsittelyn prosessiparametrit.

Näyte	Biolietteen KAP, %	Biolietteen massa, g	Lämpötila, °C	Paine, Mpa	Käsittelyaika, h
1	4,0	800	180	2,1	3
2	4,0	800	200	2,4	3
3	4,0	800	240	3,2	6
4	4,4	600	200	1,7	4
5	4,4	500	200	1,5	4
6	9,7	360	200	1,5	4

6.3.1 Tulokset

Taulukossa XII on esitetty HTC-käsittelyn tulokset. Taulukossa esitetään suodatetun lietteen massa, suodatus aika, suodoksen pH, lietekakun kuiva-ainepitoisuus (KAP) ja näytteen kalorimetrinen lämpöarvo. Näytteet 1 – 3 suodatettiin imusuodatuksella ja näytteet 4 – 6 ja referenssi näyte suodatettiin Nutsche-painesuodattimella. Painesuodatuksella suodatetut HTC-käsittelyt näytteet jaettiin kahteen tai kolmeen osaan, koska Nutsche-painesuodattimen maksimi suodatustilavuus on noin 3 dl.

Taulukko XII. HTC-käsittelyn tulokset.

Näyte	Liete, g	Suodatus aika, min	pH	KAP, %	Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg	Huom.
1	750	n. 14	6,4	14,9	23,27	
2	800	n. 33	6,5	16,5	23,94	
3	611	n. 8	5,6	28,5	24,64	
4	190	n. 4	6,4	19,0	23,72	HTC-liete suodatettu kolmessa osassa
5	189	n. 3	6,2	20,5	23,73	HTC-liete suodatettu kahdessa osassa
6	141	n. 3	6,3	23,6	23,39	HTC-liete suodatettu kahdessa osassa
Referenssi	98	n. 57	7,3	12,0	21,52	

Tulosten perusteella HTC-käsittely nostaa biolietteen kuiva-ainepitoisuutta verrattuna referenssi näytteeseen. Suurin lietekakun kuiva-ainepitoisuus mitattiin näytteelle 3, jonka kuiva-ainepitoisuus oli 28,5 %. Loppujen näytteiden 6 kuiva-ainepitoisuudet vaihtelivat 14,9 ja 23,6 % välillä, referenssin kuiva-ainepitoisuuden ollessa 12,0 %. Tulosten mukaan käsittely lämpötila vaikuttaa eniten biolietteen kuiva-ainepitoisuuteen. Myös korkeammalla biolietteen kuiva-ainepitoisuudella ennen HTC-käsittelyä vaikuttaisi olevan positiivinen vaikutus kuiva-ainepitoisuuteen.

Tulosten perusteella HTC-käsittely lyhentää huomattavasti biolietteen suodatus aikaa. Referenssi näytteellä noin 100 g suodattamiseen meni noin tunti, kun HTC-käsitellyllä näytteellä 4 ja 5 meni noin 3 – 4 min 190 g näytteen suodattamiseen. Suodatusajan lyhenemiseen vaikuttaa vapaan veden osuuden lisääntyminen biolietteessä. Silmämääräisesti tarkasteltuna HTC-käsitelty bioliete oli jakautunut kahteen eri faasiin, kiinteään ja nestemäiseen. Kiinteä faasi oli hiilimäistä, jolloin suodatus paranee verrattuna alkuperäiseen biolietteeseen.

Tulosten perusteella HTC-käsittely nostaa biolietteen lämpöarvoa. Suurin lämpöarvon nousu oli näytteellä 3 jota käsiteltiin 240 °C:ssa kuusi tuntia. Ero referenssiin oli 3,12 MJ/kg. muiden näytteiden lämpöarvo vaihteli välillä 23,27 – 23,94 MJ/kg. Referenssi näytteen lämpöarvo oli 21,52 MJ/kg.

HTC-käsittely laskee biolietteen pH arvoa keskimäärin noin yhdellä yksiköllä. Matalin pH arvo mitattiin näytteestä 3, jolloin pH oli 5,6. Lopuilla käsittelyillä näytteillä pH vaihteli 6,2 ja 6,5 välillä, referenssi näytteen pH ollessa 7,3.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että HTC-käsittely nostaa biolietteen kuivaainepitoisuutta ja parantaa suodatettavuutta sekä nostaa lämpöarvoa. Parhaimmat tulokset saavutettiin käsittelemällä biolietettä 240 °C:ssa kuusi tuntia. Tuloksista voidaan nähdä, että lämpötilalla on suurin vaikutus saavutettuihin arvoihin. Biolietteen HTC-käsittely vaikuttaa lupaavalta esikäsitelymenetelmältä ennen mekaanista vedenpoistoa.

6.3.2 Taloudellinen tarkastelu

Biolietteen märkäpyrolyysikäsitelyn alustava taloudellinen arviointi suoritettiin esimerkissä, jossa pohjoismaisen metsäteollisuus-integraatin biolietteelle tehdään märkäpyrolyysikäsitely. Esimerkissä HTC-liete poltetaan integraatin kuorikattilassa kuoren seassa. Integraatti koostuu sellu- ja paperitehtaasta, jonka vuosituotanto on 1 400 000 ADt. Märkäpyrolyysikäsitelyn taloudellinen tarkastelu tehtiin yhteistyössä LUT yliopiston energiatekniikan kanssa.

Esimerkin märkäpyrolyysilaitteisto koostuu HTC-reaktorista ja mekaanisesta kuivaimesta. Taulukossa XIII on esitetty esimerkki märkäpyrolyysikäsitteilyn prosessiparametrit. Ennen märkäpyrolyysikäsitteilyä bioliete on kuivattu mekaanisesti. Märkäpyrolyysin käsitteilylämpötila on 200 °C ja käsitteilyaika 3 tuntia. Märkäpyrolyysikäsitteilyn saannoksi on oletettu 75 %. HTC-lietteen kuiva-ainepitoisuudeksi on oletettu 35 % mekaanisen kuivauksen jälkeen.

Taulukko XIII. Biolietteen märkäpyrolyysikäsitteilyn prosessiparametrit.

Märkäpyrolyysin prosessiparametrit	
Biolietteen syöttö KAP, %	8
HTC-lämpötila, °C	200
HTC-käsitteilyaika, h	3
HTC-saanto, %	75
HTC-lietteen KAP mekaanisen kuivauksen jälkeen, %	35

Esimerkki märkäpyrolyysilaitteiston vuosittainen kapasiteetti on noin 15000 tds. Arvioitu investointi kustannus on noin 15 000 000 €. Vuosittaiseksi käyttö- ja kunnossapitokustannukseksi on oletettu 5 % investointi kustannuksesta eli 750 000 € vuodessa. Biolietteen märkäpyrolyysikäsitteily lisää kuorikattilan höyryntuotantoa 81 000 t/v ja sähköntuotantoa 22 000 MWh/v. Märkäpyrolyysilaitteiston taloudelliseksi käyttöikäksi on arvioitu 20 vuotta. Taulukossa XIV on esitetty biolietteen märkäpyrolyysikäsitteily esimerkin perusoletukset.

Taulukko XIV. Biolietteen märkäpyrolyysikäsitteilyn perusoletukset.

Märkäpyrolyysikäsitteilyn oletukset	
Investointi kustannus, €	15 000 000
Käyttö- ja kunnossapitokustannus, €/v	750 000
Kapasiteetti tds/v	15 000
Höyryntuotannon lisäys t/v	81 000
Sähköntuotannon lisäys MWh/v	22 000
Taloudellinen käyttöikä, v	20

Biolietteen märkäpyrolyysikäsitteilyn alustavaa kannattavuutta arvioitiin korottomalla takaisinmaksuajanmenetelmällä. Märkäpyrolyysikäsitteilyn tuotot on arvioitu ylijäämä sähkön myynnin perusteella. Sähkön hintana käytettiin 30 – 50 €/MWh, joka on ollut viimevuosien tyypillinen vaihteluväli sähkön hinnalle (nordpool,

2019). Taulukossa XV on tarkasteltu märkäpyrolyysikäsitteilyn alustavaa kannattavuutta eri sähkön hinnoilla.

Taulukko XV. Märkäpyrolyysikäsitteilyn kannattavuus tulokset.

Sähkön hinta, €/MWh	Sähkön myynti, €/v	Käyttö- ja kunnossapitokustannus, €/v	Nettotuotto, €/v	Takaisinmaksuaika, v
30	660000	750000	-90000	Ei kannattava
35	770000	750000	20000	Yli 20 v → ei kannattava
40	880000	750000	130000	Yli 20 v → ei kannattava
45	990000	750000	240000	Yli 20 v → ei kannattava
50	1100000	750000	350000	Yli 20 v → ei kannattava

Sähkön hinnan ollessa 30 €/MWh sähkön myynnin tuotot eivät riitä kattamaan märkäpyrolyysikäsitteilyn käyttö- ja kunnossapitokustannuksia. Sähkön hinnan ollessa yli 35 €/MWh sähkön myynnin tuotot kattavat märkäpyrolyysikäsitteilyn käyttö- ja kunnossapitokustannukset. Takaisinmaksuaikoja tarkasteltaessa kaikki maksuajat venyvät yli 20 vuoden. Alustavien kannattavuuslaskelmien perusteella voidaan todeta, että biolietteen märkäpyrolyysikäsitteily ei ole kannattavaa.

6.4 Biohiili suodatuksen tukiaineena

Biohiilen toimivuutta suodatuksen tukiaineena tutkittiin metsäteollisuuden sekalietteellä ja biolietteellä. Käytetty biohiili oli torrefioitua puuta ja biolietteen märkäpyrolyysikäsitteilystä saatua HTC-hiiltä. Sekalietteen suotautumista tutkittiin biohiilen eri partikkelikoilla ja annostelumäärillä. Biohiilen partikkelikoot olivat PSD<38 µm, 63<PSD<100 µm ja PSD>100 µm. Biohiilen annostelumäärän olivat 2 g / 150 g lietettä, 4 g / 150 g lietettä ja 6 g / 150 g lietettä. Annostelumäärän tutkimuksessa käytetty partikkelikoko oli PSD>100 µm.

Biolietteen suotautumista tutkittiin kahdella eri HTC-hiilellä ja yhdellä biohiilellä. HTC-hiilet olivat HTC-hiili 240°C/6h ja HTC-hiili 200°C/3h. Biohiili oli PSD>100 µm. Annostelumäärän vaikutusta biolietteet suotautumiseen tutkittiin annostelumäärillä: 2 g / 150 g lietettä, 4 g / 150 g lietettä ja 6 g / 150 g lietettä. Annostelumäärän tutkimuksessa käytetty partikkelikoko oli 63<PSD<100 µm.

Suodatukset tehtiin Nutsche-painesuodattimella. Kaikissa suodatuksissa käytettiin 6 bar painetta. Sekaliete valmistettiin sekoittamalla metsäteollisuuden kuitulietettä

ja biolietettä suhteessa 50/50. Biohiili lisättiin lietteen joukkoon punnituksen yhteydessä.

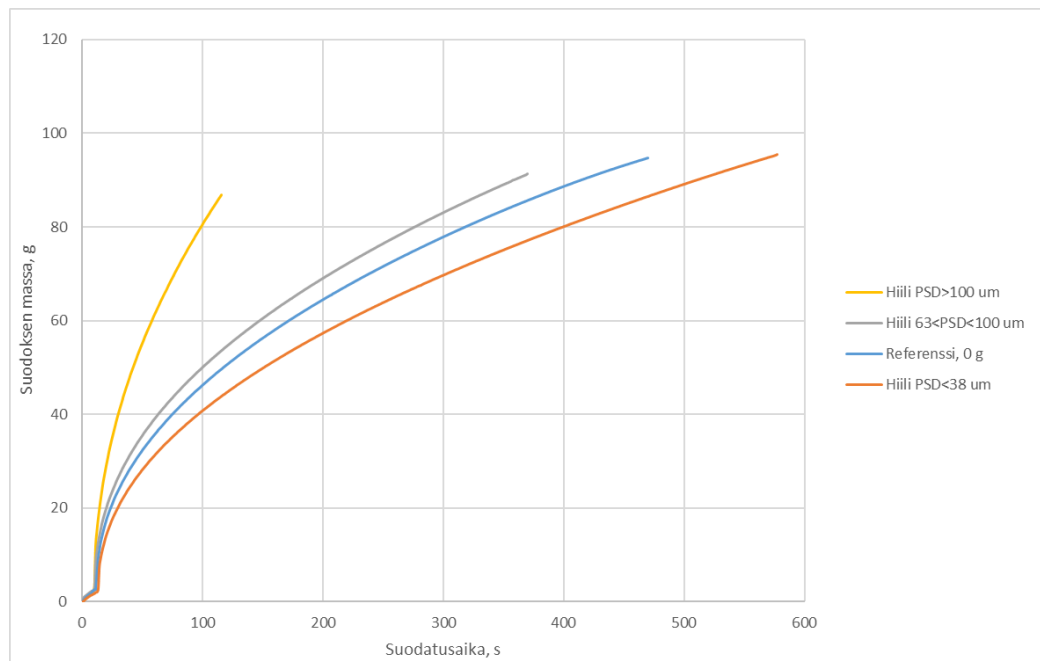
6.4.1 Tulokset

Taulukossa XVI on esitetty sekalietteen suodatus tulokset eri biohiilen partikkelikoilla. Biohiilen annostelumääränä käytettiin 4 g joka vastaa noin sekalietteen sisältämän kuiva-aineen määrää. Taulukossa XVI esitetään eri biohiilen partikkelikoot, biohiilen annostelumäärät, suodatuksessa käytetyt liete määrät, suodoksen määrät, suodatusajat, lietekakun kuiva-ainepitoisuudet ja lietekakkujen laskennalliset kuiva-ainepitoisuudet ilma biohiilen lisäystä.

Taulukko XVI. Sekalietteen suodatus tulokset eri biohiilen partikkelijakaumilla.

Mittaus	Biohiilen lisäys, g	Kuituliete, g	Bioliete, g	Liete yht., g	Suodos, g	Aika	KAP, %	KAP ilman hiiltä, %
PSD > 100 µm	4	76,36	76,46	152,82	87	2 min	15,0	8,6
63 < PSD < 100 µm	4	76,75	76,66	153,41	91	6 min 10 s	14,8	8,3
PSD < 38 µm	4	76,34	76,11	152,45	95	9 min 40 s	15,9	8,8
Referenssi	0	75,69	75,88	151,58	96	8 min 10 s	11,0	11,0

Kuvassa 26 on esitetty sekalietteen suodatus käyrät eri biohiilen partikkelijakaumilla, sekä referenssi suodatuskäyrä.



Kuva 26. Sekalietteen suodatuskäyrät eri biohiilen partikkelijakaumilla.

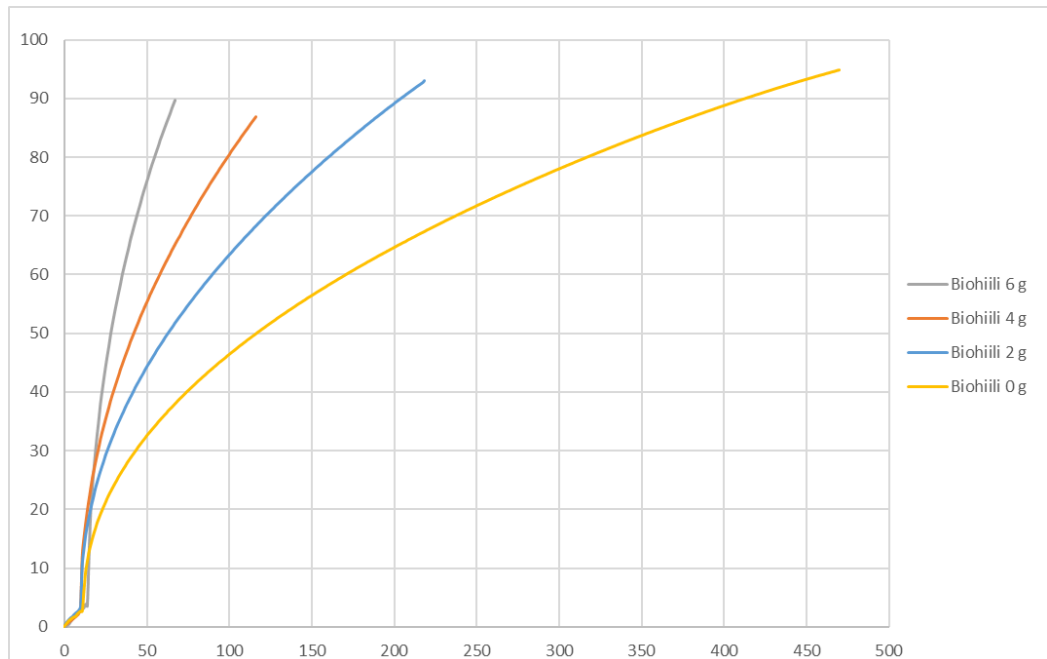
Kuvasta 26 ja taulukosta XVI voidaan nähdä, että biohiilet $63 < PSD < 100 \mu\text{m}$ ja $PSD > 100 \mu\text{m}$ nopeuttavat sekalietteen suodattamista varattuna referenssi suodatukseen. Etenkin partikkeli koolla $PSD > 100$ suodatusaika lyhenne nelin kertaaisesti referenssiin verrattuna. Biohiili $PSD < 38 \mu\text{m}$ pidensi sekalietteen suodatusaikaa. Biohiilen lisäys nostaa lietekakkujen kuiva-ainepitoisuutta, mutta kuiva-ainepitoisuus laskettu ilma biohiili lisäystä laskee lietekakkujen kuiva-ainepitoisuutta verrattuna referenssi arvoon. Tästä voidaan päätellä, että biohiilen käyttö ei vähennä sekalietteeseen sitoutuneen veden määrää.

Taulukossa XVII on esitetty sekalietteen suodatus tulokset eri biohiilen annostelumäärillä. Suodatuksessa käytetyn biohiilen partikkelikokojakauma oli $PSD > 100 \mu\text{m}$. Biohiilen annostelumääränä käytettiin 2 g, 4 g ja 6g, joka vastasivat noin 50 %, 100 % ja 150 % sekalietteen kuiva-aineen määrästä. Taulukossa XVII esitetään biohiilen annostelumäärät, suodatuksessa käytetyt liete määrät, suodoksen määrät, suodatusajat, lietekakun kuiva-ainepitoisuudet ja lietekakkujen laskennalliset kuiva-ainepitoisuudet ilma biohiilen lisäystä.

Taulukko XVII. Sekalietteen suodatus tulokset biohiilen annostelumäärillä: 0 g, 2 g, 4 g ja 6 g. Suodatuksessa käytetyn biohiilen partikkelikokojakauma oli $PSD > 100 \mu\text{m}$.

Mittaus	Biohiilen lisäys, g	Kuituliete, g	Bioliete, g	Liete yht., g	Suodos, g	Aika	KAP, %	KAP ilman hiiltä, %
Biohiili 6 g	6	76,14	76,12	152,26	90	1 min 10 s	19,3	9,0
Biohiili 4 g	4	76,34	76,11	152,45	87	2 min	15,0	8,6
Biohiili 2 g	2	76,11	76,06	152,17	93	3 min 40 s	13,4	9,7
Referenssi	0	75,69	75,88	151,58	96	7 min 50 s	11,0	11,0

Kuvassa 27 on esitetty sekalietteen suodatuskäyrät biohiilen annostelumäärillä: 0 g, 2 g, 4 g ja 6 g.



Kuva 27. Sekalietteen suodatuskäyrät biohiilen annostelumäärillä: 0 g, 2 g, 4 g ja 6 g. Suodatuksessa käytetyn biohiilen partikkelikojakauma oli PSD>100 µm.

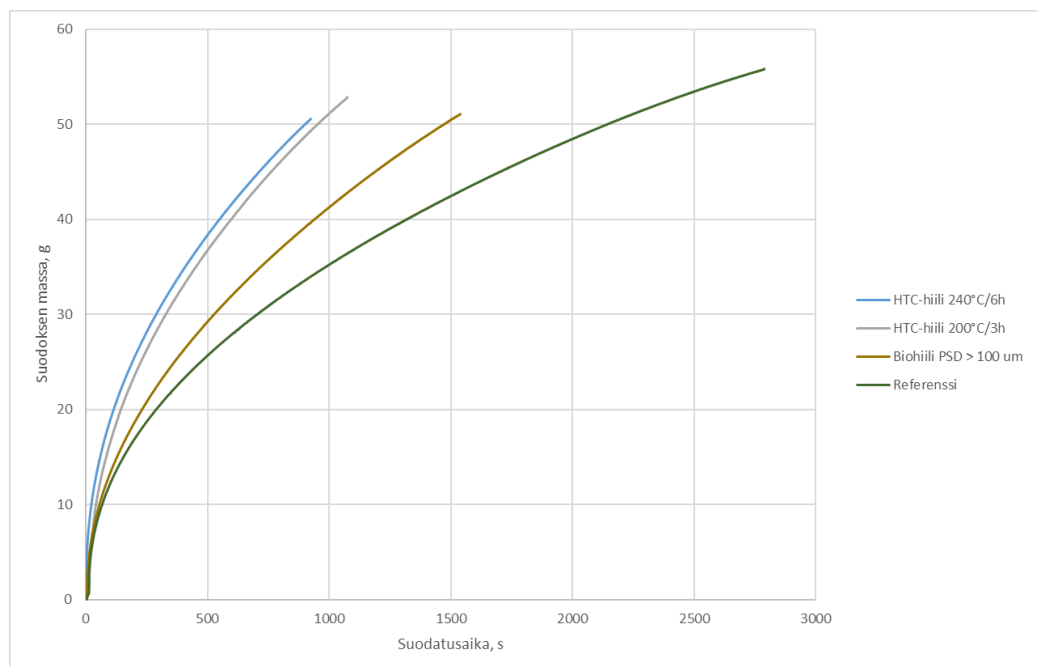
Kuvasta 27 ja taulukosta XVII voidaan nähdä, että biohiilen annostelumäärän lisääminen nopeuttavat huomattavasti sekalietteen suodattamista varattuna referenssi suodatukseen. 6 g:n annostelumäärällä suodatusaika lyhenne noin seitsemän kertaisesti referenssiin verrattuna. 2 g:n annostelumäärällä suodatusaika lyhenne vielä noin kaksin kertaisesti referenssiin verrattuna. Lietekakun kuiva-ainepitoisuus on sitä korkeampi mitä isompi on biohiilen annostelumäärä. Laskettuna ilma biohiili lisäystä lietekakkujen kuiva-ainepitoisuus ei parane verrattuna referenssi arvoon.

Taulukossa XVIII on esitetty biolietteen suodatus tulokset kahdella eri HTC-hiilellä ja yhdellä biohiilellä. HTC-hiilet olivat HTC-hiili 240°C/6h ja HTC-hiili 200°C/3h. Biohiili oli PSD>100 µm. Taulukossa XVIII esitetään eri biohiilet, biohiilen annostelumäärät, suodatuksessa käytetyt biolietteen määrät, suodoksen määrät, suodatusajat, lietekakun kuiva-ainepitoisuudet ja lietekakkujen laskennalliset kuiva-ainepitoisuudet ilma biohiilen lisäystä.

Taulukko XVIII. Biolietteen suodatus tulokset kahdella eri HTC-hiilellä ja biohiilellä.

Mittaus	hiilen lisäys, g	Bioliete, g	Suodos, g	Aika, min	KAP, %	KAP ilman hiiltä, %
HTC-hiili 240°C/6h	2,24	98,2	51,8	n. 17	14,6	9,6
HTC-hiili 200°C/3h	2,24	98,7	53,8	n. 21	15,0	10,0
Torrefioitu hiili PSD> 100 µm	2,24	98,7	52,1	n. 26	14,6	9,7
Referenssi	0	98,5	58,2	n. 57	12,0	12,0

Kuvassa 28 on esitetty biolietteen suodatus käyrät HTC-hiilellä 240°C/6h, HTC-hiilellä 200°C/3h ja biohiilellä PSD>100 µm, sekä referenssi suodatuskäyrä.



Kuva 28. Biolietteen suodatuskäyrät HTC-hiilellä 240°C/6h, HTC-hiilellä 200°C/3h ja biohiilellä PSD>100 µm, sekä referenssi suodatuskäyrä.

Biolietteen suodatuskokeiden tulokset noudattelevat samaa linjaa mitä sekaliete kokeiden tulokset. Bio-/HTC-hiili nopeuttaa suodatusta mutta ei paranna lietekakun kuiva-ainepitoisuutta, kun laskennallisesti poistetaan hiilen osuus kuiva-ainepitoisuudesta. Suodatus nopeuden lyheneminen on noin kolminkertainen HTC-hiilellä ja kaksinkertainen biohiilellä verrattuna referenssi suodatukseen.

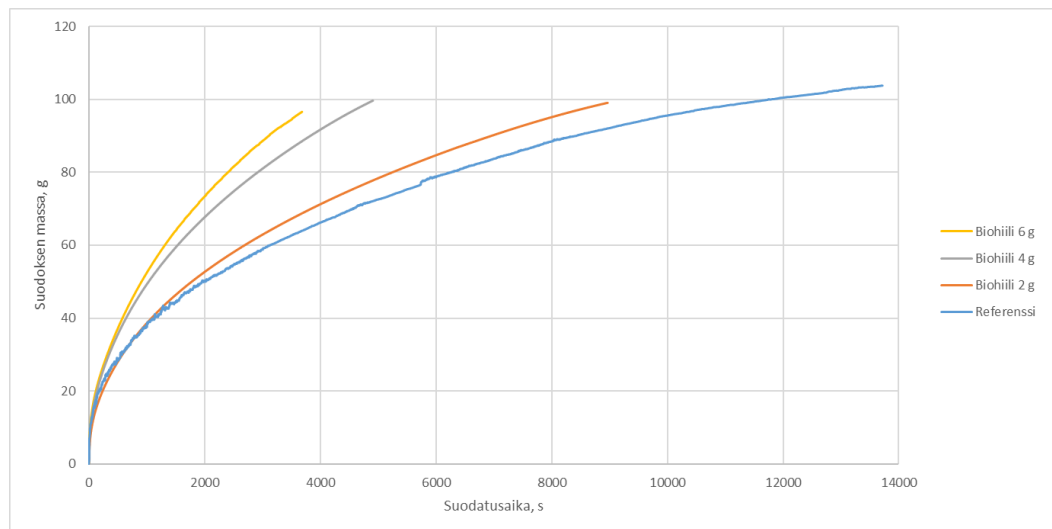
Taulukossa XIX on esitetty biolietteen suodatus tulokset eri biohiilen annostelumäärillä. Suodatuksessa käytetyn biohiilen partikkelikokojakauma oli $63 < PSD < 100 \mu\text{m}$. Biohiilen annostelumääränä käytettiin 2 g, 4 g ja 6g, joka vastasivat noin 50 %, 100 % ja 150 % biolietteen kuiva-aineen määrästä. Taulukossa XIX esitetään biohiilen annostelumäärät, suodatuksessa käytetyn biolietteen määrät, suodoksen

määrät, suodatusajat, lietekakun kuiva-ainepitoisuudet ja lietekakkujen laskennalliset kuiva-ainepitoisuudet ilma biohiilen lisäystä.

Taulukko XIX. Biolietteen suodatus tulokset biohiilen annostelumäärillä: 0 g, 2 g, 4 g ja 6 g. Suodatuksessa käytetyn biohiilen partikkelikokojakauma oli $63 < \text{PSD} < 100 \mu\text{m}$.

Mittaus	Biohiilen lisäys, g	Bioliete, g	Suodos, g	Aika, min	KAP, %	KAP ilman hiiltä, %
Biohiili 6 g	6	154,10	96,60	n. 61	17,4	6,9
Biohiili 4 g	4	157,87	99,60	n. 82	15,3	8,0
Biohiili 2 g	2	151,04	99,10	n. 149	13,0	9,0
Referenssi	0	147,80	103,80	n. 228	12,2	12,2

Kuvassa 29 on esitetty biolietteen suodatuskäyrät biohiilen annostelumäärillä: 0 g, 2 g, 4 g ja 6 g.



Kuva 29. Biolietteen suodatuskäyrät biohiilen annostelumäärillä: 0 g, 2 g, 4 g ja 6 g. Suodatuksessa käytetyn biohiilen partikkelikokojakauma oli $63 < \text{PSD} < 100 \mu\text{m}$.

Tulosten perustella biohiilen lisäys nopeuttaa biolietteen suodattamista. Lisäysmäärät 4 g ja 6 g nopeutta selvästi biolietteen suodattamista varattuna referenssiin. 2 g lisäys nopeuttaa myös biolietteen suodattamista, mutta suodatusaika on noin puolet pidempi kuin 4 g ja 6 g annostelumäärillä. Biohiilen lisäys parantaa lietekakun kokonaiskuiva-ainepitoisuutta. Mutta laskettu kuiva-ainepitoisuus ilma biohiilen lisäystä kuiva-ainepitoisuus on huonompi kuin referenssin kuiva-ainepitoisuus. Kuiva-ainepitoisuus heikkene biohiilen annostelumäärän noustessa.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että biohiilen käyttö suodatus apuaineena nopeutta suodattamista. Biohiilen käyttö ei poista enempää vettä lietteestä kuin suodatus ilman biohiiltä. Lietekakun heikko laskennallinen kuiva-ainepitoisuus ilman biohiiltä johtuu todennäköisesti siitä, että lietekakkuun muodostuu ”heikkoja” kohtia, josta Nutsche-painesuodattimen paine pääsee ”läpi”, jolloin lietekakkuun jää kosteutta joka heikentää lietekakun kuiva-ainepitoisuutta.

7 POHDINTAA

Tulosten perusteella laserkäsittely ei paranna biolietteen kuiva-ainepitoisuutta. Kaikki tutkitut jatkuvatehoiset laserit muodostivat plasmaa biolietteen pinnalle käsittelyn aikana. Plasman muodostus indikoi lasersäteen ja käsiteltävän materiaalin välisestä vuorovaikutuksesta. Laserkäsittelyn aikana lasersäde höyrysti vettä biolietteen pinnalta. Kun biolietettä käsiteltiin kuitulaserin suurimmalla tehosiheydellä, muodostui biolietteen pinnalle ohut ”kiinteä lautta”. Samalla käsittely kerralla biolieteasti lämpeni voimakkaasti. Tästä voidaan päätellä, että lasersäde tuo paljon lämpöä käsiteltävään biolietteeeseen, mutta lämpö kuluu suurimmaksi osaksi veden höyrystämiseen ja lämmittämiseen.

Muiden jatkuvatehoisten laserkäsittelyjen aikana biolietteen pinnan väri muuttui tumman ruskeasta vaalean ruskeaksi. Väriin muutos ei ylettynyt pintakerosta syvemmälle. Muita näkyviä muutoksia biolietteessä ei havaittu laserkäsittelyn jälkeen. Tästä voidaan päätellä, että laserkäsittely vaikutti vain biolietteen pintakeroksen jolloin osa tilavuudesta jää käsittelemättä.

Pulssilaser muodosti plasmaa biolietteen pinnalle kaikilla muilla parametreilla, paitsi kun lasersäteen polttopiste oli asetettu pinna alapuolelle. Kirjallisuuden perustella plasman muodostus indikoi, että solujen hajotusta tapahtuu. Myös pulssilaserkäsittelyn aikana tapahtui veden höyrystymistä biolietteen pinnalta ja biolietteen pinnan väri muuttui tumman ruskeasta vaalean ruskeaksi. Väriin muutos ei ylettynyt pintakerosta syvemmälle. Tästä voidaan päätellä, että laserpulssit vaikuttivat vain biolietteen pintakeroksen jolloin osa tilavuudesta jää käsittelemättä.

Biolietteen laserkäsittelyn jatkotutkimuksissa voitaisiin kokeilla tehokkaampaa pulssilaseria, joka kykenee tuottamaan alle 4 ns pulsseja sekä kokeilla lasereita jotka tuottavat eri aallonpituuksia kuin tutkitut laserit. Myös koejärjestelyä tulee muuttaa siten, että biolietteen koko tilavuus tulee käsiteltyä.

Biolietteen märkäpyrolyysikäsitely vaikuttaa suodatustulosten perusteella potentiaaliselta esikäsitely menetelmältä. Paras saavutettu kuiva-ainepitoisuus oli 28,5 %. Käsitelylämpötila vaikuttaa paljon HTC-lietteen kuiva-ainepitoisuuteen. Paras tulos saavutettiin 240 °C:ssa. Märkäpyrolyysikäsitelyn jälkeen oli havaittavissa, että biolietteen sisältämä kiintoaine oli erottunut lietematriisista omaksi faasiksi. Kuiva-ainepitoisuuksia olisi todennäköisesti mahdollista saada paremmaksi kokeilemalla eri tyyppistä suodatus laitteistoa. Käytetyissä suodatuslaitteistoissa ei ollut mahdollista tehdä mekaanista loppupuristusta. Mekaaninen loppupuristus todennäköisesti nostaisi kuiva-ainepitoisuutta.

Märkäpyrolyysikäsitelyn haasteena on sen kannattavuus. Alustavien kannattavuus laskemien perusteella märkäpyrolyysikäsitely ei ole kannattavaa tämän hetken sähkön hinnalla. Jos sähkön hinta olisi 70 €/MWh takaisinmaksuaika olisi noin 19 vuotta ja 80 €/MWh sähkön hinnalla takaisinmaksuaika olisi noin 15 vuotta. Jos sähkön hinta nousee tulevaisuudessa yli 70 €/MWh, biolietteen märkäpyrolyysikäsitely vaikuttaisi olevan myös taloudellisesta näkökulmasta mielenkiintoinen biolietteenesikäsitelymenetelmä.

Bioliete sisältää paljon vettä, jonka lämmittäminen noin 200 °C vaatii paljon energiaa. Vähentämällä märkäpyrolyysikäsitelyn energian kulutusta on mahdollista pienentää käyttökustannuksia. Märkäpyrolyysiprosessin energia tehokkuutta on todennäköisesti mahdollista parantaa kierrättämällä prosessivettä ja käyttämällä hukkalämpö hyödyksi sekä nostamalla syötteen kuiva-ainepitoisuutta.

Diplomityössä tutkittiin myös biohiilen toimivuutta suodatuksen tukiaineena. Suodatukset tehtiin metsäteollisuuden sekalietteellä ja biolietteellä. Käytetty biohiili oli torrefioitua puuta ja biolietteen märkäpyrolyysikäsitelystä saatua HTC-hiiltä. Tulosten perusteella biohiilen käyttö suodatuksen tukiaineena nopeuttaa suodattamista

molemmilla lietteillä, kun biohiilen partikkelikoko on isompi kuin 63 μm . Pienempi partikkelikoko ei ilmeisesti kykene tukemaan lietekakkuu tarpeeksi, jotta veden poisto nopeutuisi. 63 μm isommalla partikkelikoolla biohiili tekee lietekakun huokoisemmaksi, jolloin vedellä on enemmän tilaa poistua ja suodatus nopeutuu. Nopeampi suodatusnopeus mahdollistaa suodatuslaitteiston suuremman kapasiteetin. Biohiilen käyttö suodatuksen tukiaineena todennäköisesti lisää suodatuslaitteiston kapasiteettia, jolloin vanhan suodatuslaitteiston kapasiteetti lisääntyy tai vastaavasti uusi suodatuslaite voi olla pienempi. Biohiiltä pitää annostella suhteellisen korkeita määriä, jotta suotautumien nopeutuu. Ongelmaksi biohiilen käytössä voi tulla lietemäärien liiallinen lisääntyminen.

8 YHTEENVETO

Diplomityössä tutkittiin kahta biolietteen esikäsittelemenetelmää ja biohiilen toimivuutta seka- ja biolietteen suodatuksen tukiaineena. Esikäsittelemenetelmiä olivat laserkäsitteily ja märkäpyrolyysi. Esikäsittelemenetelmien tavoitteena oli muokata biolietteen vedenpoisto-ominaisuuksia siten, että vedenpoisto tehostuu mekaanisessa vedenpoistossa.

Diplomityön tavoitteena oli arvioida ovatko valitut biolietteenesikäsittelemenetelmät teknisesti ja taloudellisesti toteuttamiskelpoisia. Teknistä puolta arvioitiin suodatus tulosten perusteella eli nostaaako esikäsitteily biolietteen kuiva-ainepitoisuutta verrattu referenssiin. Taloudellisesta puolta arvioitiin esimerkki laskelmien avulla. Biohiilen toimivuutta seka- ja biolietteen suodatuksen tukiaineena arvioitiin suodatus tulosten perusteella.

Paras kuiva-ainepitoisuus mitattiin pulssilaserille. Pulssilaser paransi biolietteen kuiva-ainepitoisuutta 0,8 % verrattuna referenssiin. Tulosta ei voi pitää merkittävänä. Suodatus tulosten perusteella voidaan todeta, että laserkäsitteily ei paranna biolietteen kuiva-ainepitoisuutta mekaanisen suodatuksen jälkeen.

Huonoista suodatus tuloksista johtuen työn aikana ei kyetty määrittämään minkälainen laser soveltuu biolietteenesikäsitteilyyn. Sopivan laserin löytäminen biolietteen esikäsitteily vaatii jatkotutkimuksia. Suodatus tulosten perusteella laserkäsitteily ei

paranna biolietteen kuiva-ainepitoisuutta voidaan tehdä johtopäätös, että laserkäsitely ei ole kannattava biolietteenesikäsitelymenetelmä.

Biolietteen laserkäsitelyn jatkotutkimuksissa voitaisiin kokeilla tehokkaampaa pulssilaseria, joka kykenee tuottamaan alle 4 ns pulsseja sekä kokeilla lasereita jotka tuottavat eri aallonpituuksia kuin tutkitut laserit. Myös koejärjestelyä tulee muuttaa siten, että biolietteen koko tilavuus tulee käsiteltyä.

Suodatus tulosten perusteella märkäpyrolyysikäsitely parantaa biolietteen kuiva-ainepitoisuutta. Käsitellyn biolietteen kuiva-ainepitoisuus vaihteli 14,9 prosentista 28,5 prosenttiin. Referenssi näytteen kuiva-ainepitoisuus oli 12,0 %. Paras kuiva-ainepitoisuus saavutettiin, kun biolietettä käsiteltiin kuusi tuntia 240 °C:ssa. Märkäpyrolyysikäsitely nostaa biolietteen lämpöarvoa. Käsiteltyjen näytteiden lämpöarvo vaihteli välillä 23,27 – 23,94 MJ/kg. Referenssi näytteen lämpöarvo oli 21,52. Märkäpyrolyysikäsitelty bioliete suodattuu huomattavasti nopeammin kuin käsittelemätön bioliete. Tulosten perusteella märkäpyrolyysikäsitely vaikuttaa lupaavalta biolietteenesikäsitelymenetelmältä ennen mekaanista vedenpoistoa.

Kuiva-ainepitoisuuksia olisi todennäköisesti mahdollista saada paremmaksi kokeilemalla eri tyyppistä suodatus laitteistoa. Käytetyissä suodatuslaitteistoissa ei ollut mahdollista tehdä mekaanista loppupuristusta. Mekaaninen loppupuristus todennäköisesti nostaisi kuiva-ainepitoisuutta.

Alustavien kannattavuuslaskelmien perusteella voidaan todeta, että biolietteen märkäpyrolyysikäsitely ei ole kannattavaa. Sähkön hinnan ollessa 30 €/MWh sähkön myynnin tuotot eivät riitä kattamaan märkäpyrolyysikäsitelyn käyttö- ja kunnossapitokustannuksia. Sähkön hinnan ollessa 35 – 50 €/MWh sähkön myynnin tuotot kattavat märkäpyrolyysikäsitelyn käyttö- ja kunnossapitokustannukset. Takaisinmaksuaikojä tarkasteltaessa kaikki maksuajat venyvät yli 20 vuoden, kun sähkön hinta on 35 – 50 €/MWh. Jos sähkön hinta olisi 70 €/MWh takaisinmaksuaika olisi noin 19 vuotta ja 80 €/MWh sähkön hinnalla takaisinmaksuaika olisi noin 15 vuotta.

Jos sähkön hinta nousee tulevaisuudessa yli 70 €/MWh, biolietteen märkäpyrolyysikäsitteily vaikuttaisi olevan myös taloudellisesta näkökulmasta mielenkiintoinen biolietteenesikäsitteilymenetelmä.

Biohiilet partikkelikoot $63 < PSD < 100 \mu\text{m}$ ja $PSD > 100 \mu\text{m}$ nopeuttavat sekalietteen suodattamista varattuna referenssi suodatukseen. Partikkeli koolla $PSD > 100$ suodatusaika lyhenne nelin kertaisesti referenssiin verrattuna. Biohiilen partikkelikoko $PSD < 38 \mu\text{m}$ pidensi sekalietteen suodatusaikaa referenssiin verrattuna. Biohiilen lisäys nostaa lietekakkujen kuiva-ainepitoisuutta, mutta kuiva-ainepitoisuus laskettu ilma biohiili lisäystä laskee lietekakkujen kuiva-ainepitoisuutta verrattuna referenssi arvoon

Sekalietteellä biohiilen annostelumäärän lisääminen nopeuttavat huomattavasti sekalietteen suodattamista varattuna referenssi suodatukseen. 6 g:n annostelumäärällä suodatusaika lyhenne noin seitsemän kertaisesti referenssiin verrattuna. 2 g:n annostelumäärällä suodatusaika lyhenne vielä noin kaksin kertaisesti referenssiin verrattuna. Lietekakun kuiva-ainepitoisuus on sitä korkeampi mitä isompi on annostelumäärä. Laskettuna ilma biohiili lisäystä lietekakkujen kuiva-ainepitoisuus ei parane verrattuna referenssi arvoon.

Biolietteen suodatuksessa bio-/HTC-hiili nopeuttavat suodatusta mutta eivät paranna lietekakun kuiva-ainepitoisuutta, kun laskennallisesti poistetaan hiilen osuus kuiva-ainepitoisuus tuloksista referenssiin verrattuna. Suodatus nopeuden lyheneminen on noin kolminkertainen HTC-hiilellä ja kaksinkertainen biohiilellä verrattuna referenssi suodatukseen.

Suodatus tulosten perustella biohiilen annostelumäärän lisäys nopeuttaa biolietteen suodattamista. Lisäysmäärät 4 g ja 6 g nopeuttavat selvästi biolietteen suodattamista varattuna referenssiin. 2 g:n lisäys nopeuttaa myös biolietteen suodattamista, mutta suodatusaika on noin puolet pidempi kuin 4 g ja 6 g annostelumäärillä. Biohiilen lisäys parantaa lietekakun kokonaiskuiva-ainepitoisuutta. Mutta laskettu kuiva-ainepitoisuus ilma biohiilen lisäystä on huonompi kuin referenssin kuiva-ainepitoisuus. Kuiva-ainepitoisuus heikkene biohiilen annostelumäärän noustessa.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että biohiilen käyttö suodatus apuaineena nopeutta suodattamista. Biohiilen käyttö ei poista enempää vettä lietteestä kuin suodatus ilman biohiiltä. Lietekakun heikko laskennallinen kuiva-ainepitoisuus ilman biohiiltä johtuu todennäköisesti siitä, että lietekakkuun muodostuu ”heikkoja” kohtia, josta Nutsche-painesuodattimen paine pääsee ”läpi”, jolloin lietekakkuun jää kosteutta joka heikentää lietekakun kuiva-ainepitoisuutta.

Nopeampi suodatusnopeus mahdollistaa suodatuslaitteiston suuremman kapasiteetin. Biohiilen käyttö suodatuksen tukiaineena todennäköisesti lisää suodatuslaitteiston kapasiteettia, jolloin vanhan suodatuslaitteiston kapasiteetti lisääntyy tai vastaavasti uusi suodatuslaite voi olla pienempi. Biohiiltä pitää annostella suhteellisen korkeita määriä, jotta suotautumien nopeutuu. Ongelmaksi biohiilen käytössä voi tulla lietemäärien liiallinen lisääntyminen.

LÄHDELUETTELO

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

Alatalo, S. 2016, Hydrothermal carbonization in the synthesis of sustainable porous carbon materials, Väitöskirja, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta.

Brown, R.B. & Audet, J. 2008, Current techniques for single-cell lysis, Journal of the Royal Society, Interface, vol. 5 Suppl 2, no. 2, pp. S131.

Bäuerle, D. 2011, Laser processing and chemistry, Fourth edition edn, Springer, Heidelberg.

Child, M. 2014, Industrial-Scale hydrothermal carbonization of waste sludge materials for fuel production, Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta.

He, C., Giannis, A. & Wang, J. 2013, Conversion of sewage sludge to clean solid fuel using hydrothermal carbonization: Hydrochar fuel characteristics and combustion behavior, Applied Energy, vol. 111, pp. 257-266.

Heidari, M., Dutta, A., Acharya, B. & Mahmud, S. 2018, A review of the current knowledge and challenges of hydrothermal carbonization for biomass conversion, Journal of the Energy Institute.

Huopana, T., Raatikainen, O., Kolehmainen, M., Janhunen, M. & Antikainen, E. 2014. Palveluliiketoimintaa metsäteollisuuden lietteistä - METLI loppuraportti.

Häreskog, L. 2018, Integration of hydrothermal processes on a forest-based biorefinery site, Diplomityö, Umeå University, Umeå.

Karttunen, E. 2004, Vesihuolto. 2, Suomen rakennusinsinöörien liitto, Helsinki.

Kellens, K., Rodrigues, G.C., Dewulf, W. & Duflou, J.R. 2014, Energy and Resource Efficiency of Laser Cutting Processes, *Physics Procedia*, vol. 56, pp. 854-864.

Kujanpää, V., Salminen, A. & Vihinen, J. 2005, *Lasertyöstö*, Teknologiainfo Teknova, Helsinki.

Lackner, M. 2008, *Lasers in chemistry. Volume 2, Influencing Matter*, Wiley-VCH, Weinheim.

Liimatainen, P., Liimatainen, P., Soukka, R., Marttila, E. & Hammo, S. 2000, *Met-säteollisuuden jätevedenpuhdistamon lietteiden vaihtoehtoiset käsittelymenetelmät*, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Lappeenranta.

Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukyky –selvitys, 2007, Sitra, Helsinki.

Lohiniva, E., Mäkinen, T. & Sipilä, K. 2001, *Lietteiden käsittely: uudet ja käytössä olevat tekniikat*, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo.

Luque, R., Luque, R., Lin, C.S.K., Wilson, K. & Clark, J.H. 2016, *Handbook of biofuels production : processes and technologies*, Second edition edn, Woodhead Publishing, Duxford, UK.

Mowla, D., Tran, H.N. & Allen, D.G. 2013, A review of the properties of biosludge and its relevance to enhanced dewatering processes, *Biomass and Bioenergy*, vol. 58, pp. 365-378.

Nordpool, <https://www.nordpoolgroup.com>, 19.6.2019

Ojanen, P. 2001, *Sellu- ja paperitehtaiden lietteiden käsittely ja hyötykäyttö sekä niitä rajoittavat tekijät*, Kaakkois-Suomen ympäristökeskus.

Rau, K.R., Guerra, A., Vogel, A. & Venugopalan, V. 2004, Investigation of laser-induced cell lysis using time-resolved imaging, *Applied Physics Letters*, vol. 84, no. 15, pp. 2940-2942.

SFS 3008. 1990. Veden, lietteen ja sedimentin kuiva-aineen ja hehkutusjäännöksen määrittäminen. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

Suomen Vesilaitosyhdistys ry, 2016, Teknis-taloudellinen tarkastelu jätevesien käsittelyn tehostamisesta Suomessa, Vesilaitosyhdistyksen moniste sarja nro 42, Suomen Vesilaitosyhdistys ry, Helsinki.

Säylä, J. & Vilpas, R. 2012, Yhdyskuntien jätevesien puhdistus 2010, Suomen ympäristökeskus.

Tchobanoglous, G., Burton, F.L. & Stensel, H.D. 2003, Wastewater engineering: treatment and reuse, 4. ed. edn, McGraw-Hill, Boston.

Vilppanen, M & Toivikko, S. 2017. Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus, Vesilaitos yhdistyksen moniste sarja nro 46, Suomen Vesilaitosyhdistys ry, Helsinki.

Wang, L., Li, A. & Chang, Y. 2017, Relationship between enhanced dewaterability and structural properties of hydrothermal sludge after hydrothermal treatment of excess sludge, Water Research, vol. 112, pp. 72-82.