

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

LUT School of Engineering Science

Kemiantekniikka

*Jutta Liimatainen*

**BIOLIETTEEN KUIVATTAVUUDEN PARANTAMINEN UUSILLA TEKNI-  
KOILLA**

Työn tarkastajat: TkT Eeva Jernström

Prof. Satu-Pia Reinikainen

Työn ohjaajat: TkT Eeva Jernström

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT  
LUT School of Engineering Science  
Kemiantekniikka

Jutta Liimatainen

### **Biolietteen kuivattavuuden parantaminen uusilla tekniikoilla**

Diplomityö

2019

96 sivua, 36 kuvaa, 21 taulukkoa ja 3 liitettä

Työn tarkastajat: TKT Eeva Jernström  
Prof. Satu-Pia Reinikainen

Hakusanat: Bioliete, lietteenkäsittely, lasertekniikka, märkätorrefiointi  
Keywords: Biosludge, sludge treatment, laser technology, hydrothermal carbonization

Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää, kyetäänkö laserkäsittelyn avulla parantamaan biolietteen kuiva-ainepitoisuutta. Lisäksi tutkittiin suodatuksen tukiaineiden käyttöä lietteen suodatuksessa. Kirjallisuusosassa tarkasteltiin lietteenkäsittelyn nykytilaa, biolietteen ominaisuuksia ja suodatusta, lasertekniikkaa lietteiden käsittelyssä sekä uusia tekniikoita lietteenkäsittelyyn. Kokeellisessa osassa optimoitiin lasereiden parametreja biolietteen kuiva-ainepitoisuuden kohottamiseksi. Lisäksi tutkittiin lisäaineiden kykyä parantaa lasersäteen absorptiota sekä toimia suodatuksen tukiaineina. Tavoitteena oli nostaa biolietteen kuiva-ainepitoisuus yli 30 % laserkäsittelyllä.

Kokeiden perusteella löydettiin parametriyhdistelmä, jolla saatiin nostettua biolietteen kuiva-ainepitoisuutta. Mustalla pigmentillä saatiin parannettua lasersäteen absorptiota biolietteen suodatukseen. Biolietteen kuiva-ainepitoisuutta saatiin nostettua 10,3 %:sta 14,8 %:iin. Suodatusaika lyhentyi noin 40 %.

Kokeiltujen tukiaineiden avulla saatiin nopeutettua lietteen suodatusta huomattavasti niiden tehdessä kakusta huokoisemman. Tukiaineilla saatiin lyhennettyä suodatusaikaa noin 70 % verrattuna biolietteen suodatukseen ilman tukiaineita. Kakun kuiva-ainepitoisuus nousi lisätyn tukiaineen vuoksi.

Kun yhdistettiin biolietteen laserkäsittely ja tukiaineiden käyttö suodatuksessa, bioliettele saavutettiin kuiva-ainepitoisuus 22,9 %. Vastaavalla tavalla, mutta ilman laserkäsittelyä biolietteen kuiva-ainepitoisuus oli 20,0 %. Työssä käytetyllä pulssilaserilla saatiin nostettua biolietteen kuiva-ainepitoisuutta muutaman prosenttiyksikön verran. Tämä vastaa noin 15 % parannusta kuiva-ainepitoisuuteen. Kokeita voitaisiin jatkaa kokeilemalla toisen tyyppisiä lasereita biolietteen käsittelyyn.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT  
LUT School of Engineering Science  
Chemical and Process Engineering

Jutta Liimatainen

### **Improving dewaterability of biosludge by using new technologies**

Master's Thesis

2019

96 pages, 36 figures, 21 tables and 3 appendices

Examiners: D. Sc. Eeva Jernström  
Prof. Satu-Pia Reinikainen

Keywords: Biosludge, sludge treatment, laser technology, hydrothermal carbonization

The aim of this master's thesis was to study if dewaterability of biosludge could be improved using laser technology. In addition, the usage of filter aids in the filtration of sludge was studied. In the theoretical part, the properties and the filtration of biosludge and sludge treatment technologies were researched. Laser technology and new technologies in sludge treatment were also studied. In the experimental part, laser parameters were optimized to improve the dry content of biosludge. The effect of additives to enhance absorption of a laser beam to the sludge and the ability of the additives to act as filter aids were also investigated. The aim was to raise the dry content of biosludge to at least 30 % by laser treatment.

The parameter combination for improving the dry content of biosludge was found based on studies. Absorption of a laser beam to biosludge was enhanced by adding a black pigment to the sludge sample before the laser treatment. The dry content of biosludge was improved from 10,3 % to 14,8 %. The filtration time was about 40 % shorter than in the filtration of the non-laser-treated biosludge.

The filtration time was significantly shorter by adding filter aids than in the filtration of biosludge without any additives. Filter aids produced a porous filter cake which water could easily penetrate. The filtration time of the biosludge sample with a filter aid was about 70 % shorter than the filtration of biosludge without additives. The dry content of the cake was increased because of the added filter aid.

When the black pigment was added to improve absorption of the laser beam and the filter aid was added before the filtration, the dry content of biosludge was 22,9 %. The dry content of the untreated biosludge sample with the black pigment and the filter aid was 20,0 %. The dry content of biosludge was improved by a few percentage points by using the pulse laser in this thesis. That was about 15 % improvement compared to the non-laser-treated sample. In the future, the studies could be continued by using new lasers in the laser treatment of biosludge.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty osana LaserKond-nimistä TUTLI-hanketta (Tutkimuksesta uutta liiketoimintaa). Työ on toteutettu 3/2018– 3/2019 välisenä aikana LUT-yliopistolla.

Haluan kiittää kaikkia projektiin osallistuneita henkilöitä. Kiitos tiiviille projektiryhmälle, Samulille, Eevalle, Hartolle ja Annalle, siitä, että avarsitte maailmankatsomustani ja opetit minut olemaan avoin uusille ideoille. Teidän kanssanne oli mukava työskennellä! Kiitos Hartolle kokeissa avustamisesta ja diplomityön kirjoittamiseen liittyvän tuskan jakamisesta. Kiitos Eevalle diplomityön tarkastamisesta ja kommentteista, joiden avulla sain hiottua työstäni entistä paremman. Lisäksi haluan myös kiittää muuta yliopiston henkilökuntaa, jotka osallittanne autoitte projektissa ja edistitte diplomityön valmistumista.

Lopuksi haluan kiittää ystäviä ja perhettä kaikesta tuesta, jota olen saanut opiskeluiden ja diplomityön teon aikana. Kiitos äitille ja Jesselle uskomattomasta kiinnostuksesta diplomityötäni kohtaan, vaikkei teillä usein ollutkaan mitään hajua, mistä puhuin. Lopuksi haluan kiittää avopuolisoani Ollia diplomityössä avustamisessa, kaikesta tuesta, jota olen saanut, ja diplomityöhön ja töihin liittyvien ajatusten siirtämisestä muihinkin asioihin.

Lappeenrannassa 4.3.2019

Jutta Liimatainen

## SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNE- JA SYMBOLILUETTELO.....	3
KIRJALLINEN OSA .....	4
1 JOHDANTO .....	4
2 JÄTEVEDENPUHDISTUS AKTIIVILIIETEMENETELMÄLLÄ .....	6
2.1 Mikrobin aerobinen hajotus.....	8
2.2 Metsäteollisuuden jätevedenkäsittely ja sen lietteet .....	9
2.2 Kunnallinen jätevedenpuhdistamo ja sen lietteet.....	10
3 BIOLIETE .....	12
3.1 Koostumus ja eliöstö.....	12
3.2 Vedenpoisto-ominaisuudet.....	14
4 LIETTEIDEN ESIKÄSITTELY .....	17
4.1. Stabilointi .....	18
4.2. Kunnostus.....	19
4.3. Uudet tekniikat lietteiden esikäsittelyssä .....	23
4.3.1 Ultraääni.....	23
4.3.2 Elektrokuivatus .....	25
4.3.3 Kemicond-käsittely .....	27
5 LASERTEKNIikka LIETTEENKÄSITTELYSSÄ.....	28
5.1 Laserin vaikutus lietteeseen/soluihin .....	28
5.2 Laserin ominaisuudet ja prosessiparametrit .....	32
5.3 Laserparametrien vaikutus biologiseen materiaaliin.....	35
6 MEKAANINEN VEDENPOISTO.....	36
6.1 Suotonauhapuristin.....	37
6.2 Ruuvipuristin.....	38
6.3 Linko .....	39
7 BIOLIETTEEN SUODATUS JA TUKIAINEIDEN KÄYTTÖ.....	40
7.1 Biolietteen suodatus .....	40
8 TORREFIOINTI JA MÄRKÄTORREFIOINTI.....	42
9 LOPPUSIJOITUS .....	44
KOKEELLINEN OSA.....	47
10 KOKEELLISEN OSAN TARKOITUS.....	47
11 KOELAITTEISTOT JA KÄYTETYT MATERIAALIT .....	49
11.1 Laserit.....	50

11.2	Suodatuslaitteistot .....	53
11.3	Märkätorrefiointilaitteisto .....	55
11.4	Käytetyt materiaalit .....	57
11.5	Lietteen kuiva-ainepitoisuus .....	61
12	KOKEIDEN SUORITUS .....	61
12.1	Laserparametrien vaikutukset .....	62
12.2	Mustan pigmentin vaikutus lasersäteen absorptioon .....	63
12.3	Torrefioidun hiilen vaikutus lasersäteen absorptioon .....	64
12.4	Torrefioidun hiilen vaikutus lietteen suodatuksessa .....	64
12.5	Märkätorrefioitujen lietteiden vaikutus biolietteen suotautuvuuteen.....	65
13	TULOKSET JA NIIDEN KÄSITTELY .....	66
13.1	Laserparametrien vaikutukset .....	66
13.1.1	Büchner-suodatuskokeet .....	66
13.1.2	Nutsche-suodatuskokeet.....	72
13.2	Lasersäteen absorption tehostaminen.....	75
13.2.1	Musta pigmentin vaikutus lasersäteen absorptioon .....	75
13.2.2	Torrefioidun hiilen vaikutus lasersäteen absorptioon .....	77
13.3	Torrefioidun hiilen vaikutus lietteen suodatuksessa .....	79
13.4	Märkätorrefioidun lietteen vaikutus biolietteen suotautuvuuteen.....	85
14	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	87
	LÄHDELUETTELO.....	92

**LYHENNE- JA SYMBOLILUETTELO****LYHENTEET**

COD	<i>Chemical Oxygen Demand</i> , kemiallinen hapenkulutus
CHP	Combined Heat and Power, yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto
CW-laser	<i>Continuos wave -laser</i> , jatkuvatoiminen laser
EPS	<i>Extracellular polymeric substances</i> , solunulkoiset polymeerit
HTC	<i>Hydrothermal carbonization</i> , hydroterminen hiilto, märkätorrefiointi
LB-EPS	<i>Loosely bound EPS</i> , löyhästi sitoutunut EPS
PAH-yhdisteet	<i>Polycyclic Aromatic Hydrocarbons</i> , polisykliset aromaattiset hiilivedyt
TB-EPS	<i>Tightly bound EPS</i> , tiukasti sitoutunut EPS
TOC	<i>Total Organic Carbon</i> , orgaanisen hiilen kokonaismäärä

**SYMBOLIT**

KAP-%	näytteen kuiva-ainepitoisuus, %
$m_1$	kuivatun näytteen massa, g
$m_2$	märän lietteen massa, g
$m_3$	astian massa, g.

## **KIRJALLINEN OSA**

### **1 JOHDANTO**

Biologisilla jätevedenpuhdistamoilla puhdistus tapahtuu mikrobikannan, niin sanotun aktiivilietteen, avulla (Samer, 2015). Aktiivilietettä kierrätetään prosessissa, mutta syntyvää lietettä on poistettava prosessin tasapainon säilyttämiseksi. Jätevedenpuhdistamoilla muodostuu poistettavaa ylijäämälietettä eli biolietettä valtavia määriä. Esimerkiksi rakenteilla olevalle Pirkanmaan keskuspuhdistamolle arvioidaan syntyvän kuivattua biolietettä noin 15 tonnia vuorokaudessa vuonna 2025. Kokonaislietemääräksi arvioidaan keskimäärin 40 kuiva-ainetonna vuorokaudessa. (Ramboll, 2015)

Jo pelkästään EU:n sisällä syntyy vuosittain yli 10 miljoonaa kuiva-ainetonna jätevesilietettä, joiden oikeanlainen käsittely vaatii korkeita investointeja (Kangas, 2011). Pirkanmaan keskuspuhdistamon vuosittaisiksi käyttökustannuksiksi on arvioitu noin 10,9 milj.€. Tästä biolietteen käsittely, joka sisältää muun muassa polymeerisyötön, termisen kuivatuksen, tuhkan ja savukaasujen käsittelyn sekä biolietteen loppusijoituksen, muodostaa noin 3,2 milj.€/a. (Ramboll, 2015) Korkeat kustannukset ylijäämälietteen käsittelyssä voivat johtaa lietteiden turvallisen ja tehokkaan käsittelyn laiminlyöntiin (Jadhav et al., 2017).

Aktiivilieteprosessissa mikrobit hajottavat jäteveden orgaanisia yhdisteitä ja käyttävät epäorgaanisia yhdisteitä, kuten typpeä ja fosforia, ravinnokseen (Liimatainen et al., 2000). Aktiivilieteprosessin lyömättömänä etuna on sen puhdistustehokkuus. Suomessa biologisten jätevedenpuhdistamoiden käyttöönotto 90-luvulla on vähentänyt merkittävästi ravinnepestöjä vesistöihin. (Lohiniva et al., 2001)

Useiden tekijöiden vaikutuksesta biolietteen määrä on kuitenkin jatkuvasti kasvanut jätevedenpuhdistuslaitoksilla. Samaan aikaan viime vuosikymmeninä kiristynyt lainsäädäntö ja kestävä kehityksen näkökohdan korostaminen EU:n kiertotaloustavoitteiden mukaisesti ovat rajoittaneet lietteiden kaatopaikkasijoittamista ja pakottaneet puhdistamot keksimään hyötykäyttöä jätevesilietteilteille (Euroopan komissio, 2015). Toisaalta tämä on myös johtanut lietteiden käsittelyn tarkempaan huomioimiseen ja lietteiden tehokkaampaan käsittelyyn.



Kuitenkin lietemäärien kasvu ja erityisesti vaikeasti kuivattavan biolietteen osuuden kasvaminen kokonaislietemäärästä ajavat lietteidenkäsittelylaitokset ahdinkoon niiden yrittäessä noudattaa yhä kiristyviä säädöksiä.

Bioliete, joka koostuu mikrobimassasta, sisältää paljon bakteerisolujen sisään sitoutunutta vettä, jota ei voida poistaa mekaanisella kuivatuksella, kuten teollisuudessa käytettävillä suotonauhapuristimilla, lingoilla ja ruuvipuristimilla. Lietteen tilavuutta on kuitenkin pystyttävä pienentämään, jotta kuljetus- ja jatkokäsittelykustannukset voidaan minimoida. Tämän vuoksi biolietteen esikäsittely veden erottamiseksi on välttämätöntä. (Mowla et al., 2013) Lietettä flokkaavien polymeerien käyttö on yleisin tapa tehostaa vedenpoistoa. Kuitenkin kemikaalien kasvavan hinnan lisäksi on alettu kiinnittää huomiota niiden haitallisiin ympäristövaikutuksiin. Tämän takia uusia, vaihtoehtoisia menetelmiä tarvitaan lietteiden tehokkaaseen esikäsittelyyn ja niiden kuivattavuuden parantamiseen. (Kootenaei et al., 2015)

Lasertekniikka tarjoaa tarkan ja korkeaintensiteettisen työkalun usealla eri teollisuuden alalla. Lasertekniikkaa voidaan soveltaa aina metallien laserleikkauksesta lääketieteellisiin sovelluksiin. Lasersäteen kykyä hajottaa ja muokata solujen pintakerrosta, solukalvoa, on tutkittu useissa lääketieteen ja biotekniikan sovelluksissa. Tutkimuksissa on havaittu solujen tuhoutuvan lasersäteen polttopisteen läheisyydestä (Hellman et al., 2008; Rau et al., 2006).

Lietteenkäsittelyssä lasertekniikkaa hyödynnettäisiin hajottamaan ja heikentämään biolietteen bakteerien soluseiniä, jolloin lietteen sisältämä sitoutunut vesi saataisiin vapautettua. Vapautunut vesi voidaan poistaa mekaanisessa kuivatuksessa. Lietteenkäsittelyssä ei ole vielä olemassa lasertekniikkaa hyödyntäviä sovelluksia, mutta teoreettinen perusta sovellukselle on havaittu tutkimuksissa.

Lasertekniikan avulla tehostetulla lietteiden vedenpoistolla on havaittavissa useita hyötyjä lietteenkäsittelyssä. Metsäteollisuudessa, jossa lietteenpolto on yleisin menetelmä hävittää liete, kohonneella kuiva-ainepitoisuudella mahdollistettaisiin energiatehokkaampi prosessi. Tällä hetkellä lietteen kuiva-ainepitoisuuden ollessa alhainen ei poltosta ole juurikaan saatu taloudellista hyötyä (Liimatainen, et al., 2000). Tehokas lietteiden esikäsittely lasertekniikalla vähentäisi kemikaalikunnostuksen tarvetta ja siten ympäristöön kohdistuvaa rasiitusta sekä kemikaalien vaikutuksia lietteen jatkokäsittelyssä.

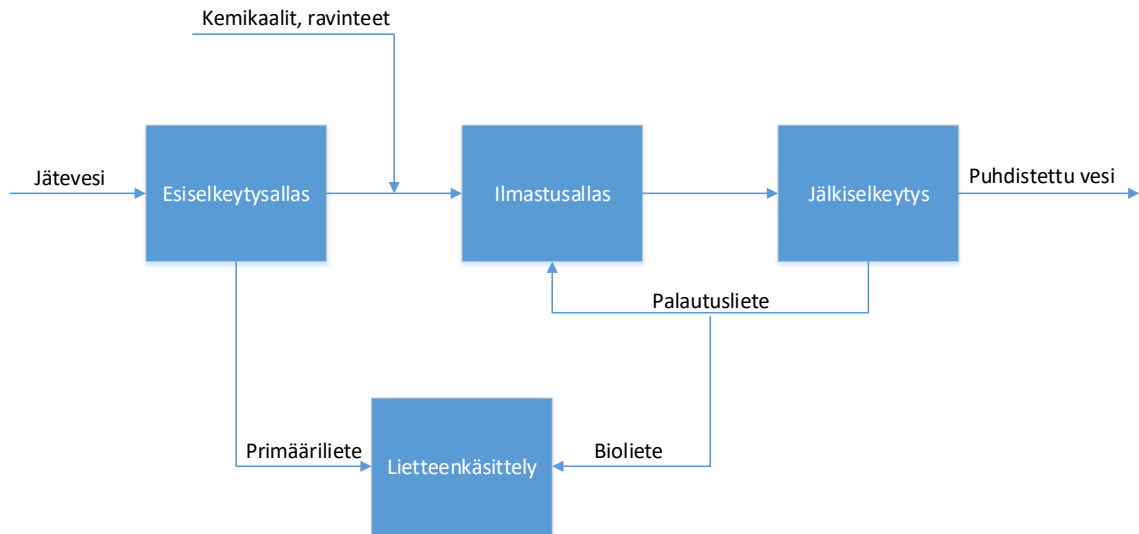
Biolietteen suodatus on haasteellista sen bakteerisolujen kokoonpuristuvuuden takia (Jadhav et al., 2017). Sen vuoksi teollisuudessa biolietteen mekaaninen kuivatus tapahtuu aina sen ollessa sekoittuneena kuitulietteeeseen. Flokkaavien kemikaalien lisäksi biolietteen suodatusta voidaan parantaa tukiaineiden, kuten kuoren ja sahanpurun avulla, jotka tekevät liete-kakusta jäykkärakenteisemman ja huokoisemman. Tämä nopeuttaa veden poistumista kakun läpi. (Mowla et al., 2013) Tukiaineiden käytön kannalta olisi edullista, mikäli niitä kyettäisiin tuottamaan tehtaan omista jäte- tai sivuvirroista. Tämän vuoksi työssä käsitellään lyhyesti myös torrefiointia ja märkätorrefiointia, joiden avulla voitaisiin tuottaa hiilipitoisia tukiaineita edistämään lietteiden suodatusta.

Tämän diplomityön oleellisin tarkoitus on kartoittaa laserkäsittelyn vaikutusta lietteen vedenpoiston parantamiseksi. Lisäksi selvitetään lietteiden suotautuvuuden parantamista hiilipitoisilla tukiaineilla. Työn kirjallisuusosa on rajattu tarkastelemaan metsäteollisuuden ja kunnallisia jätevedenpuhdistamoita. Työssä sivutaan jonkin verran lasertekniikan ja suodatuksen tukiaineiden käytön taloudellisuutta, mutta varsinaiset kustannuslaskennat ovat rajattu tämän työn ulkopuolelle.

Kirjallisessa osassa syvennyttään teoriaan, jolla lasertekniikka hajottaa soluja. Sitä pohjustetaan tarkastelemalla jätevedenpuhdistuksen aktiivilietemenetelmää, lietteenkäsittelyä sekä biolietteen ominaisuuksia ja sen suodatusta. Alustukseksi kokeelliselle osuudelle tutustutaan lyhyesti lasertekniikkaan ja laserin prosessiparametreihin. Kokeellisessa osiossa etsitään sopivia prosessiparametreja biolietteen laserkäsittelyyn. Lisäksi tutkitaan lasersäteen absorption tehostamista biolietteeeseen lisäaineiden avulla sekä lietteiden suotautuvuuden parantamista tukiaineiden avulla.

## **2 JÄTEVEDENPUHDISTUS AKTIIVILIETEMENETELMÄLLÄ**

Aktiivilieteprosessissa mekaanisesti selkeytetty jätevesi puhdistetaan niin sanotussa sekundaarisessa puhdistuksessa biologisesti mikrobikannan avulla (Samer, 2015). Esiselkeytyksessä jätevedestä poistetaan helposti laskeutuva raskaampi kiintoaine, ja biologisella käsitte-lyllä puhdistetaan pienimolekyyliset yhdisteet. (Liimatainen, et al., 2000) Aktiivilietementelmän periaate on esiteyty Kuvassa 1.



Kuva 1 Periaatekuva jätevedenkäsittelystä aktiivilietemenetelmällä.

Puhdistamolle tuleva jätevesi johdetaan esiselkeytysaltaaseen, jossa raskas kiintoaine laskeutuu altaan pohjalle. Esiselkeyttimestä laskeutunut kiintoaine eli primääriliete poistetaan altaan pohjalta 0,5–3 % kuiva-ainepitoisuudessa lietteenkäsittelyyn. (Liimatainen et al., 2000) Esiselkeytyksen jälkeen jäteveden virtausta ja sen laatua tasataan (Gray, 2010). Metsäteollisuudessa käytetään erillisiä tasausaltaita. Kunnallisessa jätevedenpuhdistuksessa jätevesi tasataan usein esiselkeytyksen aikana, mutta tasausaltaita voidaan käyttää veden virtauksen vaihteluiden vähentämiseksi (Laitinen et al., 2014). Ennen biologista käsittelyä jäteveden lämpötila, pH, happi- ja ravinnepitoisuus sovitetaan mikrobin kasvulle optimaaliseksi (Dahl, 2008).

Esikäsitellyn jälkeen jätevesi sekoitetaan bakteereja ja mikro-organismeja sisältävään flokkirakenteiseen aktiivilietteeseen ilmastusaltaassa, johon johdetaan pohjasta ilmaa (Dahl, 2008). Aktiivilietteen mikro-organismit puhdistavat jätevettä hajottamalla orgaanista ainesta ja käyttämällä jäteveden epäorgaanista ainesta ravinnokseen (Liimatainen et al., 2000). Ilmastuksen lisäksi altaassa toimii jatkuva sekoitus, joka lisää jäteveden ja aktiivilietteen välistä kontaktia (Metcalf & Eddy, 2003).

Ilmastusaltaasta suspensio siirretään jälkiselkeyttimeen, jossa liete erottuu puhdistetusta jätevedestä laskeutumalla altaan pohjalle (Dahl, 2008). Suurin osa lietteestä palautetaan takaisin ilmastukseen. Osa palautuslietteestä poistetaan ylijäämälietteenä eli biolietteenä ja

johdetaan lietteenkäsittelyyn. (Liimatainen et al., 2000) Poistettavan biolietteen määrä on tärkeä operoitava prosessiparametri, joka määrittää prosessin toimivuuden (Dahl, 2008). Puhdistettu vesi poistetaan vesistöön tai jälkipuhdistukseen (Liimatainen, et al., 2000).

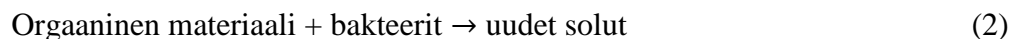
## 2.1 Mikrobiein aerobinen hajotus

Aktiivilietteen mikro-organismit puhdistavat jätevettä aerobisissa oloissa hapettamalla jäteveden orgaanisia yhdisteitä energiaksi omaan käyttöönsä (Samer, 2015). Aktiivilietekäsittelyn tarkoituksina on sekä poistaa orgaanista materiaalia mahdollisimman tehokkaasti lyhyessä ajassa että tuottaa biologisia flokkeja, joilla on hyvät laskeutumisominaisuudet. Nämä tavoitteet eivät kulje kuitenkaan käsi kädessä, sillä hyvin laskeutuva liete ei poista orgaanista ainesta tehokkaasti ja päinvastoin. Siksi aktiivilieteprosessi on usein kompromissi lietteen laskeutumisen ja orgaanisen materiaalin poiston välillä. (Wang et al., 2009)

Mikro-organismit hajottavat orgaanista materiaalia energiaksi Yhtälön 1 mukaan (Wang et al, 2009):



Orgaanisen materiaalin hajottamista hiilidioksidiksi, epäorgaanisiksi yhdisteiksi, kuten nitraateiksi, fosfaateiksi ja sulfaateiksi, ja energiaksi kutsutaan biologiseksi hapettamiseksi. Prosessissa syntyvät epäorgaaniset yhdisteet poistuvat jäteveden mukana. Bakteerit voivat käyttää orgaanisen materiaalin myös uusien bakteerisolujen tuottamiseksi Yhtälön 2 mukaan:



Uuden biomassan tuottamista kutsutaan biosynteesiksi. (Samer, 2015) Aktiivilietteestä, joka palautetaan takaisin ilmastukseen, poistetaan muodostunut uutta biomassaa vastaava määrä (Liimatainen et al., 2000). Noin 60–70 %:a orgaanisesta aineesta käytetään uusien solujen muodostumiseen ja 30–40 %:a hyödynnetään energian tuotannossa (Dahl, 2008).

Olosuhteissa, jotka suosivat biologista hapettamista, biomassan määrä vähenee bakteerien hävittäessä orgaanista ainesta. Tämä vähentää myös lietteenkäsittelykustannuksia, mutta

lisää ilmastuksen tarvetta. Olosuhteissa, jotka suosivat biosynteesiä, lietteenkäsittelykustannukset nousevat prosessissa muodostuneen lietteen myötä. (Gray, 2010)

## 2.2 Metsäteollisuuden jätevedenkäsittely ja sen lietteet

Suomessa metsäteollisuuden jätevedenpuhdistukseen käytetään usein biologista jätevedenpuhdistusta, jonka käyttöönotto on merkittävin syy metsäteollisuuden ravinnepäästöjen vähenemiselle vesistöihin (Liimatainen, et al., 2000). Jätevesienpuhdistamolla syntyvä liete on kuitenkin suurin jätevirta sellu- ja paperiteollisuudessa, ja sen hävittäminen on haasteellista teollisuudelle (Bajpai, 2012).

Metsäteollisuuden jätevedet sisältävät luonnollisesti puun kuituja, muita puusta pilkkoutuneita osia sekä prosessissa käytettyjä kemikaaleja ja apuaineita. Paperiteollisuuden jätevesissä esiintyy näiden lisäksi myös päällystyskemikaaleja ja täyteaineita. (Dahl, 2008) Suurin osa sellutehtaiden jätevesistä tulee sellunvalkaisusta, jossa jätevesien hyödyntäminen on haasteellista valkaisukemikaalien suolojen ( $K^+$  ja  $Cl^-$ ) vuoksi (Liimatainen, et al., 2000). Metsäteollisuuden lietteiden koostumus riippuu useista tekijöistä, muun muassa raaka-aineesta, valmistusprosessista, lopputuotteesta ja vedenkäsittelytekniikasta (Bajpai, 2012).

Ennen ilmastusta metsäteollisuuden jätevesi neutraloidaan kalkilla ( $Ca_2CO_3$ ) tai rikkihapolla ( $H_2SO_4$ ) pH-arvoon 6–8 ja tarvittaessa siihen voidaan lisätä pieniä määriä vaahdonestoaineita (Liimatainen et al., 2000). Mikrobien toiminnan takaamiseksi muuten vähäravinteiseen jätevetteen on lisättävä fosforia ja typpeä (Dahl, 2008). Jossain laitoksissa jäteveden sisältämää kiintoainetta flokataan kemiallisesti. Kemikaaleina käytetään muun muassa ferri- ja ferrosuoloja ja alumiinisuoloja. (Liimatainen et al., 2000)

Metsäteollisuuden lietteitä ovat primaariliete ja bioliete sekä jossain tapauksissa kemiallinen liete ja kuorimoliete. Metsäteollisuuden primaariliete sisältää helposti laskeutuvia kuituja, ja sitä kutsutaankin toisinaan kuitulietteeksi (Liimatainen et al., 2000). Metsäteollisuuden primaariliete voidaan tavallisesti helposti kuivata ja käsitellä sen sisältäessä paljon kuituja ja vähän tuhkaa (Bajpai, 2012). Verrattuna yhdykuntien jätevesilietteeseen metsäteollisuuden bioliete sisältää enemmän puupohjaisia aineita, kuten ligniiniä, hiilihydraatteja ja selluloosaa, ja tuhkaa. Metsäteollisuuden bioliete sisältää vähemmän ravinteita, raskasmetalleja ja

rasvoja. (Lohiniva et al., 2001) Joskus metsäteollisuudessa kuivataan primaari- ja biolieteteisistaan erillään. Syinä voi olla esimerkiksi, biolietteen hävittäminen maanparannusaineeksi, primaarilietteen kierrättäminen prosessiin tai siitä sivutuotteiden valmistaminen (Bajpai, 2012).

## **2.2 Kunnallinen jätevedenpuhdistamo ja sen lietteet**

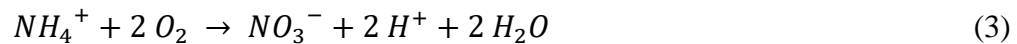
Kunnallisten jätevedenpuhdistamoiden jätevedet koostuvat kotitalouksien ja teollisuuden jätevesistä, hule- ja vuotovesistä sekä prosessin sisäisistä vesistä, kuten mädätyksen ja lietteen kuivatuksen rejektivesistä, ja prosessilaitteiden pesuvesistä (Laitinen et al., 2014). Kunnallisen puhdistamon jäteveden koostumus vaihtelee merkittävästi riippuen muutoksista veden kulutuksessa ja jäteveteen laskettujen aineiden määrästä (Henze et al., 2002). Yhdyskuntien jätevesien puhdistuksessa tärkeintä on poistaa kiinteä jäte, orgaaninen aines ja ravinteet, jolloin usein saadaan myös poistettua jäteveden sisältämät bakteerit ja taudinaiheuttajat (Säylä, 2015).

Esimerkiksi Lappeenrannan Toikansuon jätevedenpuhdistamolla puhdistetaan vuorokaudessa keskimäärin 16 000 m<sup>3</sup> jätevettä, josta teollisuuden jätevedet muodostavat noin 10 % yhdyskuntajätevesistä. Jätevedenpuhdistamon viemäriverkostoon kuuluu muun muassa leipomo, makeistehdas ja jätteenkäsittelylaitos. Keskimäärin suurimmat jätevesivirtaamat ovat keväällä lumien sulatessa. Vuonna 2016 suurin viikkovirtaama oli huhtikuussa, jolloin jätevesivirtaama oli noin 155 000 m<sup>3</sup>, kun taas pienin viikkovirtaama oli tammikuussa, jolloin jätevesivirtaama oli noin 86 000 m<sup>3</sup>. Jätevedenpuhdistamolle tulevia vesistöille haitallisia aineita olivat vuonna 2016 muun muassa kadmiun (0,00011mg/L), lyijy (0,0014 mg/L), nikkeli (0,0047 mg/L) ja sinkki (0,12 mg/L). (Saimaan vesi- ja ympäristötutkimus Oy, 2017)

Johtuen kunnallisen jäteveden ominaisuuksista jätevesi on esikäsiteltävä ennen esiselkeytystä. Jätevedestä poistetaan mekaanisesti välppien avulla karkea kiintoaine, jotta ne eivät häiritse ja kuluta myöhemmän puhdistusprosessin laitteita. Välppäyksen jälkeen jätevedestä erotetaan hiekka ja muu raskas aines. (Laitinen et al., 2014)

Kunnallinen jätevesi sisältää metsäteollisuuden jätevettä runsaammin typpeä ja fosforia, jolloin ravinteidenpoiston merkitys yhdyskuntien jätevesienpuhdistuksessa kasvaa. Fosfori ja typpi aiheuttavat vesistöissä rehevöitymistä ja levien kasvua. (Säylä, 2015) Yhdyskuntapuhdistamolietteet sisältävät typpeä keskimäärin 27 – 37 g ja fosforia 16–28 g lietteen kuiva-ainekiloa kohti (Lohiniva et al., 2001). Metsäteollisuuden lietteet sisältävät typpeä 15–47 g/kg ja fosforia 3–8 g lietteen kuiva-ainekiloa kohti. Metsäteollisuudessa lietteiden typpi- ja fosforipitoisuudet vaihtelevat sen mukaan, tuottaako tehdas sellua vai paperia ja minkä laatuista sellusta tai paperista on kyse. (Liimatainen et al., 2000)

Typen biologista poistoa jätevedestä kutsutaan nitrifikaatioksi, jossa nitrifikaatiobakteerit muuttavat jäteveden sisältämät ammoniumionit ( $\text{NH}_4^+$ ) nitraateiksi ( $\text{NO}_3^-$ ) Reaktioyhtälön 3 mukaisesti (Henze et al., 2002):



Erityisesti ammoniummuotoinen typpi heikentää vesistöjen happitilannetta. Mikäli vesien rehevöitymisestä ei ole uhkaa, voidaan kokonaistypenpoiston sijaan keskittyä vain ammoniummuotoisen typen poistoon. (Säylä, 2015) Nitraatti-ionit voidaan poistaa jätevedestä denitrifikaatiolla, jossa lietteen anaerobiset denitrifikaatiobakteerit muuttavat nitraatin typpikaasuksi. (Henze et al., 2002) Typpikaasu poistuu prosessista ilmakehään. Jätevedessä oleva fosfori poistetaan saostamalla se kemiallisesti rauta- ja alumiinipohjaisilla kemikaaleilla. Saostuskemikaalia lisätään tavallisesti joko biologisen käsittelyn yhteydessä tai joko ennen tai jälkeen käsittelyn. (Säylä, 2015) Biologinen käsittelyvaihe tarvitsee omat lohkonsa aerobiselle nitrifikaatiolle, anaerobiselle denitrifikaatiolle ja mahdolliselle fosforinpoistolle (Laitinen et al., 2014).

Yhdyskuntien jätevedet kuljettavat vesistöihin kiintoainetta, mikrobeja ja ravinteita huolimatta tehokkaasta jätevedenpuhdistuksesta. Lisäksi jätevesi sisältää ympäristölle ja ihmisille haitallisia ja vaarallisia aineita, jotka ovat lähtöisin kotitalouksista, teollisuudesta, maataloudesta ja jätteenkäsittelystä. Päästöjen lähteinä ovat esimerkiksi lääkeaineet, siivouskemikaalit, muovit, kosmetiikka, hygieniatuotteet, lannoitteet ja torjunta-aineet. Haitallisten aineiden määrä ja niiden vaikutuksia vesistöihin ja ihmisiin ei täysin tiedetä. Niiden luonteesta riippuen ne poistuvat jätevedenpuhdistusprosessista haihtumalla, kiinnittymällä lietteeseen tai

poistamalla puhdistetun veden mukana. (Laitinen et al., 2014) Kiinnitettäessä entistä enemmän huomiota vesistöjen tilaan ravinteiden ja orgaanisten aineiden poiston lisäksi tulevaisuudessa tullaan kasvavasti huomioimaan mikrobien ja vaarallisten aineiden poisto jätevesistä. Tekniikoita, joilla voitaisiin parantaa jätevesien hygienisointia, ovat kemialliset menetelmät tai fysikaaliset menetelmät, esimerkiksi UV-valo tai kalvosuodatus. (Säylä, 2015)

Kunnallisilla puhdistamoilla syntyvä liete koostuu esikäsitellyn välpejätteestä ja hiekasta, esiselkeytyksen primaarilietteestä ja jälkiselkeytyksen biolietteestä (Laitinen et al., 2014). Puhdistamolietteet sisältävät jätevedestä lietteisiin sitoutuneita ravinteita, hivenaiheita, taudinaiheuttajia ja haitallisia yhdisteitä (National Research Council, 1996). Pöyryn tekemän selvityksen mukaan 75 % kunnallisista jätevedenpuhdistamoista käsittelee vain laitoksen omia lietteitä. Kunnalliset jätevedenpuhdistamot voivat käsitellä myös esimerkiksi pienten puhdistamoiden ja teollisuuden lietteitä sekä biojätettä. (Pöyry Environment Oy, 2007)

### **3 BIOLIETE**

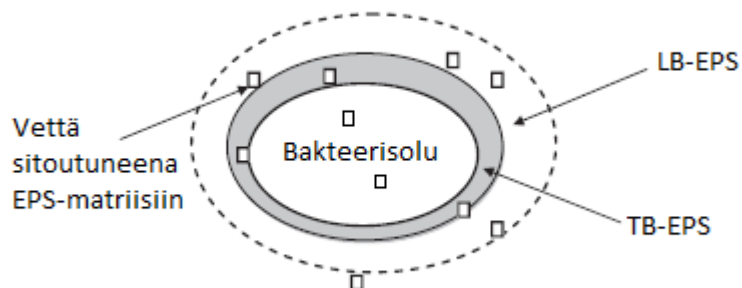
Bioliete sisältää jopa 98 % vettä, joka on erilaisilla tavoilla sitoutunut lieteflokkeihin. Biolietettä on vaikea kuivattaa johtuen sen sisältämisestä kolloidisista ja polymeerisistä materiaaleista, jotka sitovat vesimolekyylit tiukasti mikrobien muodostamiin flokkeihin. (Mowla et al., 2013) Jotta pystyttäisiin löytämään ratkaisu biolietteen kuivattavuuden parantamiselle, on ymmärrettävä, mistä bioliete koostuu.

#### **3.1 Koostumus ja eliöstö**

Bioliete eli puhdistamoiden sekundaariliete sisältää biologisia flokkeja, jossa useiden miljoonien bakteerien muodostamat rykelmät ovat kiinnittyneet toisiinsa inerteillä orgaanisilla ja epäorgaanisilla aineilla. Flokkien koko biolietteessä vaihtelee aina yksittäisen bakteerin halkaisijasta (0,5 µm) flokin halkaisijaan 1 mm. Bakteereja toisiinsa sitovia yhdisteitä kutsutaan EPS-materiaaleiksi (*Extracellular polymeric substances*, solunulkoiset polymeerit). Nämä yhdisteet koostuvat pääosin polysakkarideista, aminopolysakkarideista ja proteiineista, ja ne voivat muodostaa jopa 10 % flokkien kuiva-aineesta. (Gray, 2010) EPS-yhdisteet voivat absorboida paljon vettä sisäänsä, mutta ne ovat kuitenkin veteen liukenemattomia.



EPS-matriisiin voidaan ajatella muodostuvan kahdesta kerroksesta bakteerisolujen pinnalla, tiukasti sitoutuneesta EPS-kerroksesta (TB-EPS) ja löyhästi sitoutuneesta kerroksesta (LB-EPS). LB-EPS-kerros on uloimmaisimpana, eikä sillä ole tarkkarajaista rajapintaa. (Mowla et al., 2013) Kuvassa 2 on esitetty solun pinnalla oleva EPS-matriisi ja siihen sitoutunut vesi.



Kuva 2 Bakterisolun pinnalle kiinnittynyt kaksikerroksinen EPS-matriisi, johon on sitoutunut vettä (muokattu lähteestä Mowla et al., 2013).

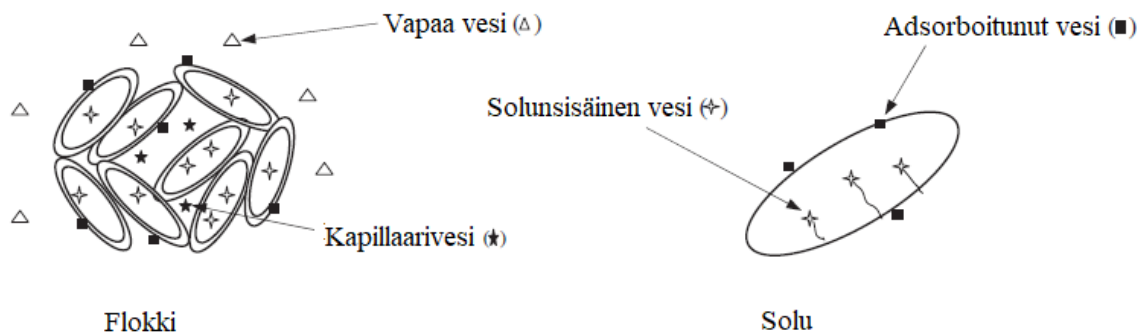
Bioliete koostuu useista erilaisista mikro-organismeista, mm. bakteereista, sienistä, alkueläimistä ja madoista (Wang et al., 2009). Mikro-organismien laaja kirjo auttaa aktiivilietettä sietämään erilaisia häiriöitä ja jopa myrkyllisiä yhdisteitä (Dahl, 2008). Tärkeimmät aktiivilietteen mikro-organismit ja niiden vaikutukset aktiivilieteprosessiin on esitetty Taulukossa I.

Taulukko I Aktiivilietteen tärkeimmät mikro-organismit ja niiden ominaisuudet.

Mikro-organismi	Ominaisuudet	Lähde
Bakteerit	Aktiiviliete sisältää useita bakteerilajeja, jotka hapettavat liuennetta orgaanisia aineita ja muodostavat ammoniakkia ja flokkeja.	Wang et al, 2009; Henze et al, 2002
Sienet ja rihmamaiset bakteerit	Muodostavat tukirangan flokkirakenteelle. Heikentävät lietteen laskeutumisominaisuuksia	Mowla et al, 2013; Wang et al, 2009
Alkueläimet	Syövät bakteereja ja sieniä sekä kuluttavat orgaanisia aineita. Alkueläimillä on tärkeä tehtävä lietteen laskeutumisessa.	Henze et al., 2002
Kehittyneemmät alkueläimet	Monisoluisia rataseläimiä ja sukkulamatoja, jotka syövät pienempiä alkueläimiä ja bakteereja.	Wang et al., 2009

### 3.2 Vedenpoisto-ominaisuudet

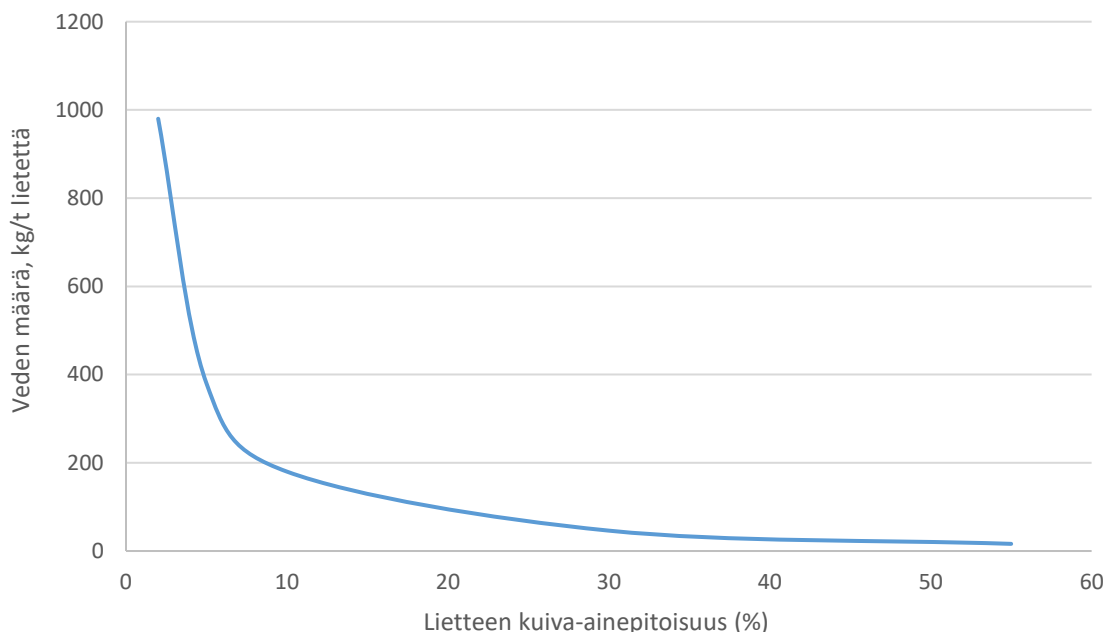
Bioliete ei ole vain yksinkertainen kiintoaineen ja nesteen muodostama seos, jossa partikkelit olisivat veden ympäröiminä, vaan myös biolietteen partikkelit sisältävät vettä (Sharma & Sanghi, 2013). Biolietteen sisältämä vesi voidaan jakaa neljään muotoon: vapaaseen veteen, kapillaariveteen, adsorboituneeseen veteen ja solunsisäiseen veteen (Vesilind & Hsu, 1997; Mowla et al., 2013; Liimatainen et al., 2000). Kuvassa 3 on esitetty veden sitoutuminen biolietteen flokkirakenteeseen sekä yksittäiseen bakteerisoluuun.



Kuva 3 Erilaisten vesimuotojen jakautuminen biolieteflokkiin ja yksittäiseen bakteerisoluuun (muokattu lähteestä Mowla et al., 2013).

Vapaa vesi, joka ei ole sitoutunut lieteflokkeihin, voidaan helposti poistaa laskeuttamalla painovoiman avulla (Lohiniva et al., 2001). Kapillaarivesi esiintyy flokkien välisissä raoissa ja halkeamissa. Se voidaan vapauttaa hajottamalla flokkirakenne tai tuhoamalla soluja (Vesilind & Hsu, 1997). Pieni osa kapillaarivedestä voidaan poistaa mekaanisella kuivatuksella, esimerkiksi sentrifugoinnilla tai vakuumisuodatuksella. Fysikaalisilla voimilla solun pintaan on sitoutunut adsorboitunutta vettä, jota ei pystytä poistamaan mekaanisesti. (Mowla et al., 2013) Solunsisäinen vesi on lietepartikkeleiden sisällä olevaa kemiallisilla voimilla sitoutunutta vettä, jonka poistaminen nykyisillä lietteenkuivatusmenetelmillä on haastavaa (Mowla et al., 2013; Lohiniva et al., 2001). Solunsisäistä vettä voidaan kuitenkin poistaa solukalvon tuhoavalla tekniikalla, jolloin solun sisällä oleva vesi saadaan vapautettua (Liimatainen et al., 2000). Tämä saavutetaan esimerkiksi lietteen termisellä käsittelyllä (Lohiniva et al., 2001).

Biolietteen vesi voidaan jakaa vapaaseen ja sitoutuneeseen veteen, joka koostuu kapillaarivedestä, adsorboituneesta vedestä ja solunsisäisestä vedestä. Bioliete sisältää runsaasti sitoutunutta vettä, ja sen poistaminen vaatii paljon energiaa. (Mowla et al., 2013). Vapaa vesi voidaan poistaa laskeuttamalla ja mekaanisesti puristamalla, jolloin saavutetaan noin 20 %:n kuiva-ainepitoisuus. Biolietettä ei saada mekaanisesti kuivattua tätä kuivemmaksi, ja vedenpoistoon vaadittava energiamäärä nousee huomattavasti (Liimatainen et al., 2000; Mowla et al., 2013). Kuvassa 4 on esitetty lietteen vesimäärä kuiva-ainepitoisuuden funktiona. Kuvasta 4 havaitaan, kuinka paljon vettä on poistettava kutakin kuiva-aineprosenttia kohti.



Kuva 4 Biolietteen vesimäärä kuiva-ainepitoisuuden funktiona (muokattu lähteestä Liimatainen et al., 2000).

Biolietteen kykyyn sitoa vettä vaikuttaa useat tekijät, joista tärkeimpiä ovat partikkelikokojakauma ja biolietteen koostumus. Partikkelikokojakauma vaikuttaa kiintoainepartikkelien laskeutuvuuteen sekä kiintoainekakun huokoisuuteen ja läpäisevyyteen. (Mowla et al., 2013) Biolietteen flokkikokoon muun muassa prosessin pH, viipymääjat, sekoitukset, kemikaaliannostukset ja lämpötilat, minkä vuoksi eri tehtaiden välillä ja tehtaan sisällä esiintyy vaihtelevia biolietteen kuivattavuuteen. (Liimatainen et al., 2000)

EPS-rakenne ja sitoutunut vesi ovat tärkeimmät tekijät, jotka vaikuttavat vedenpoistoon biolietteestä. Flokkeja sitovan EPS-rakenteen vaurioittaminen esimerkiksi kemiallisesti, ultraäänellä ja lämpökäsittelyllä parantaa biolietteen kuivattamista. Biolietteen suotautuvuus paranee EPS-pitoisuuden kasvaessa tiettyyn pitoisuuteen saakka, sillä EPS-materiaali sitoo soluja tiukemmin yhteen ja flokkaa niitä. Tietyn EPS-pitoisuuden jälkeen suotautuvuus heikkenee, sillä EPS-matriisi alkaa sitoa vettä sisäänsä. (Mowla et al., 2013)

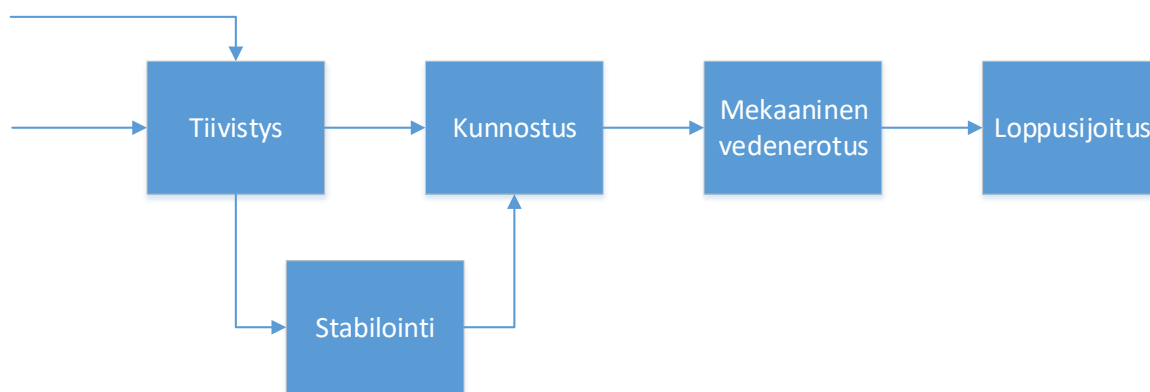
Biolietteen kiintoaine on hyvin kokoonpuristuvaa ja muodostaa pysyvän suspension veden kanssa, minkä vuoksi sitä on vaikea erottaa vedestä. Kuitulietteellä sen sijaan on parempi

suotautuvuus, sillä sen sisältämät pitkät kuidut tuovat suodatinkakkuun rakennetta ja kokoon puristamattomuutta. (Mowla et al., 2013)

#### **4 LIETTEIDEN ESİKÄSITTELY**

Lietteen käsittelymenetelmät ja loppusijoitus riippuvat pitkälti niiden koostumuksista ja kuiva-ainepitoisuuksista. Kunnallisen jätevedenpuhdistamon primääriliete sisältää maanparannukseen kelpaavia ravinteita, mutta toisaalta usein myös raskasmetalleja, jotka rajoittavat sen käyttömahdollisuuksia. (Lohiniva et al., 2001) Sekä metsäteollisuudessa että yhdyskuntalietteiden käsittelyssä lietteet käsitellään usein sekalietteenä biolietteen vaikean kuivattavuuden vuoksi. Kun prosessissa raakaveden käyttöä vähennetään, ongelmana usein on primäärilietteen määrän vähentyminen biolietteen määrän pysyessä ennallaan. (Liimatainen et al., 2000) Tällöin sekalietteen kuiva-ainepitoisuus laskee ja kuivattavuusominaisuudet heikkenevät, mikä taas huonontaa lietteen hyötykäyttömahdollisuuksia. (Bajpai, 2012; Liimatainen et al., 2000) Vuonna 2016 voimaantullut valtioneuvoston asetus biohajoavan ja orgaanisen jätteen sijoituksesta kaatopaikoille estää sekalietteen kaatopaikkasijoittamisen (Ympäristöministeriö, 2017). Näiden tekijöiden summa aiheuttaa lietteenkäsittelylaitoksille paineita löytää kannattava vaihtoehto lietteiden tehokkaaseen käsittelyyn (Liimatainen et al., 2000).

Kuvassa 5 on esitetty lietteenkäsittelyn prosessikaavio. Tässä luvussa käsitellään lietteen esikäsittelymenetelmiä eli tiivistystä, stabilointia ja kunnostusta. Luvussa perehdytään myös uusiin, sitoutunutta vettä vapauttaviin esikäsittelytekniikoihin. Luvussa 6 syvennytään lietteen mekaaniseen vedenerotukseen ja luvussa 8 sen loppusijoitusmahdollisuuksiin.



Kuva 5 Lietteenkäsittelyn prosessikaavio (muokattu lähteestä Lohiniva et al., 2001).

Jos lietteiden kuiva-ainepitoisuus on alhaisempi kuin 4–5 %, ne voidaan tiivistää, jotta lietteen tilavuus pienenee jatkokäsittelyjä varten ja sen kuiva-ainepitoisuus kohoaisi (Bajpai, 2012). Primaari- ja sekundaarilietteet voidaan käsitellä joko erillään tai samassa tiivistimessä (Liimatainen et al., 2000). Tavallisimmin käytetään gravitaatiotiivistimiä, joilla saavutetaan 2,5–10 % kuiva-ainepitoisuus riippuen lietetyypistä. Tiivistyksen jälkeen lietteet joko stabiloidaan eli niiden biologinen toiminta lopetetaan tai ne kuljetetaan suoraan kunnostettaviksi, jossa niiden vedenpoisto-ominaisuuksia parannetaan. Kunnostuksen jälkeen lietteet voidaan mekaanisesti kuivata ja kuivattu liete loppusijoittaa. (Lohiniva et al., 2001)

#### 4.1. Stabilointi

Ennen kunnostusvaihetta liete voidaan stabiloida. Sen tarkoituksena on lopettaa lietteen biologinen toiminta ja parantaa kuivattavuutta muuttamalla biolietteen rakennetta. Stabilointia käytetään erityisesti yhdyskuntalietteiden käsittelyssä, mutta toisinaan myös metsäteollisuudessa. (Dahl, 2008) Lietteen stabilointimenetelmiä ovat kalkkistabilointi, anaerobinen mädätys ja terminen kuivatus, jota käsitellään tarkemmin lietteiden kunnostuksen yhteydessä (Gray, 2010). Stabiloinnin jälkeen lietteen kuiva-ainepitoisuus on yleensä noin 20 % (Lohiniva et al., 2001).

Kalkkistabiloinnissa lietteeseen lisätään sammutettua kalkkia, joka nostaa lietteen emäksisyyden yli pH-arvon 11 tappaen lietteessä olevat patogeenit. Kalkittu liete on kuivatusomi-

naisuuksiltaan parempaa kuin käsittelemätön liete, ja se sopii hyvin maanparannukseen. Menetelmän haittoina ovat kuitenkin lietemäärän lisääntyminen kalkkilisäyksen vuoksi ja korkeat kemikaalikustannukset. Kalkkistabilointi on käytössä yleensä pienillä jätevedenpuhdistamoilla. (Lohiniva et al., 2001)

Anaerobinen mädätys on yleisimmin käytössä oleva stabilointimenetelmä (Gray, 2010). Siinä metaanibakteerit hajottavat lietteen orgaanisen aineksen metaaniksi ja hiilidioksidiksi hapettomassa tilassa jättäen jäljelle hydrolyysijäännöksen eli mädätetyn lietteen (Lohiniva et al., 2001). Muodostunutta biokaasua voidaan hyödyntää sähkön ja lämmöntuotannossa, polttoaineena tai maakaasuverkoissa. Yksinkertaisin tapa on polttaa biokaasu kaasukattilassa ja kerätä muodostanut lämpö talteen. Muodostuneelle lämmölle ei kuitenkaan usein ole pysyvää tarvetta, jolloin suuri osa energiasta voi jäädä hyödyntämättä. Yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa (CHP, *Combined Heat and Power*) sähköä tuotetaan generaattorien avulla ja lisäksi muodostuneista savukaasuista ja jäähdytysvedestä kerätään talteen lämpöä. Kaasuturbiineita hyödynnetään usein suuren mittakaavan energiantuotannossa. Jalostettaessa biokaasua polttoaineeksi hiilidioksidi ja epäpuhtaudet poistetaan, jolloin sen metaanipitoisuus ja lämpöarvo nousevat. (Kangas et al., 2011)

Viipymäaika suurissa mädättämöissä on 10–15 päivää, kun pienemmissä se voi olla 20 päivää. Suomessa toimivat mädättämöt ovat joko mesofiilisiä tai termofiilisiä. Mesofiilisessä mädätyksessä prosessilämpötila on noin 37 °C ja termofiilisessä mädätyksessä lämpötila on korkeampi, noin 55 °C. Suurin osa Suomen mädättämöistä ovat mesofiilisiä, jotka eivät ole niin herkkiä lämpötilan muutoksille eivätkä tarvitse yhtä paljon lämmitystä kuin termofiiliset prosessit. Mädätyksessä lietteen määrä pienenee, kun noin 40 % orgaanisesta aineesta muodostaa kaasua, mutta samalla sen lämpöarvo laskee lietteen kuiva-aineen vähentyessä. (Lohiniva et al., 2001)

#### **4.2. Kunnostus**

Lietteen vedenpoistoa voidaan parantaa kolmella tavalla. Yksi tapa on sitoa lietteen kiintoainepartikkeleita suuremmiksi kokonaisuuksiksi eli flokata niitä, jolloin kiintoaineen laskeutuvuus paranee. Toinen tapa on muuttaa lietteen flokkirakennetta siten, että saavutetaan suoda-

tettavassa kakussa jäykkä ja kokoon puristamaton rakenne, jolloin vesi voidaan helposti poistaa lietteestä suodattamalla. Kolmantena tapana on hajottaa lietteen flokkirakennetta, jolloin flokkeihin sitoutunut vesi siirtyy vapaaksi vedeksi. (Bajpai, 2012; Mowla et al., 2013) Lietteiden kunnostus ei itsessään vähennä veden määrää lietteessä, vaan sen tehtävänä on helpottaa veden poistamista lietteestä ja parantaa sen suotautuvuutta mekaanisessa kuivatuksessa (Bajpai, 2012). Yleisimmin käytössä olevat kunnostusmenetelmät ovat lämpökäsittely ja kunnostuskemikaalien käyttö. Suomessa yhdyskuntien ja metsäteollisuuden puhdistamolietteiden kunnostuksessa käytetään kemiallista käsittelyä, eikä lämpökäsittelyä juurikaan käytetä. (Lohiniva et al., 2001) Terminen kuivatus on kuitenkin ympäri maailmaa käytetty tekniikka (Mowla et al., 2013).

Terminen kuivatuksen tarkoituksena on hajottaa bakteerien soluseinät, jotta solujen sisäinen vesi saadaan vapautettua solujen sisältä ja siirrettyä kapillaarivedeksi. Lämmön avulla vesi saadaan haihdutettua. Lämpökäsittelyssä lämpötila vaihtelee 60–250 °C välillä. Koska terminen kuivaus kuluttaa paljon energiaa, usein se yhdistetään polttoon, jolloin lietteen lämpöarvo voidaan käyttää hyväksi. (Lohiniva et al., 2001) Käsittelyaika ja -lämpötila vaikuttavat soluseinien hajotusasteeseen (Mowla et al., 2013).

Terminen kuivatus on tehokas tapa kuivata lietettä aina haluttuun kuiva-ainepitoisuuteen saakka 50–90 % väliltä. Jotta päästäisiin mahdollisimman korkeisiin kuiva-ainepitoisuuksiin, terminen käsittely toteutetaan usein mekaanisen vedenpoiston jälkeen. Korkeimmissa kuiva-ainepitoisuuksissa liete on myös hygienisoitua, jolloin se ei ole enää biologisesti aktiivista. Terminen kuivatuksen haittana on korkea energiakulutus, joka nousee kuiva-ainepitoisuuden kohotessa. Tämä voidaan havaita myös Kuvasta 4, jossa lietteen vesipitoisuuden laskiessa vaadittava energiamäärä nousee. Terminen kuivatus lisäksi vaatii korkeat pääomakustannukset. (Lohiniva et al., 2001)

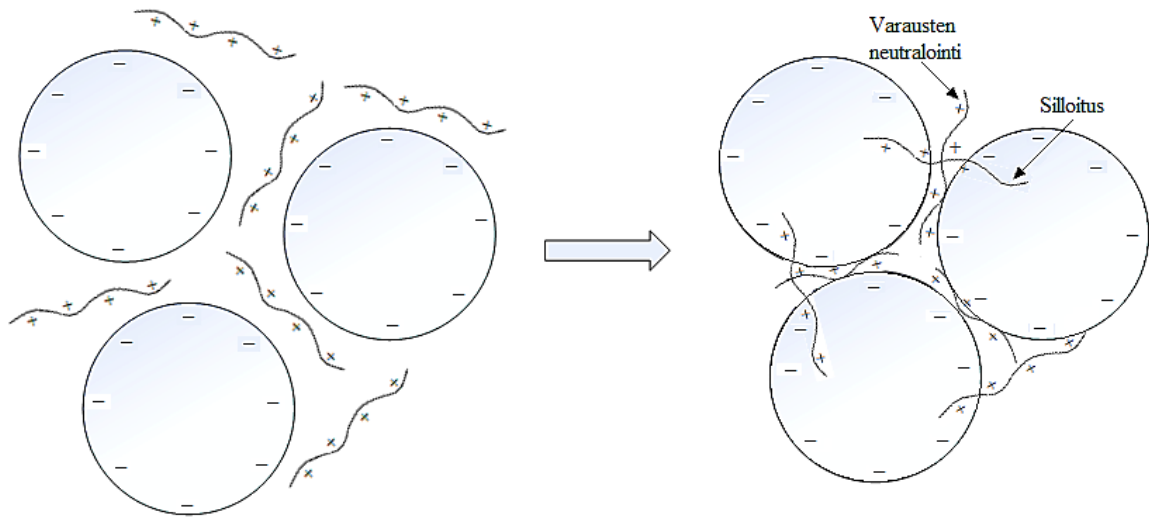
Kunnostuskemikaalien tarkoituksena on sitoa lietepartikkeleita suuremmiksi aggregaateiksi ja siten vähentää suodatuksen vastusta ja parantaa vedenerotusta. (Liimatainen et al, 2000; Bajpai, 2012) Kemiallisen kunnostuksen avulla voidaan myös tasata lietteen laatua ja vaihtelua kuiva-ainepitoisuuksissa (Lohiniva et al., 2001). Kemikaalit sekoitetaan lietteeseen flokkulointiastiassa, ja annetaan niiden vaikuttaa muutama minuutti ennen mekaanista



kuivausta (Dahl, 2008). Kemikaalien syöttökohta täytyy olla hyvin suunniteltu, ja optimaalinen syöttöpiste riippuu käytettävästä kemikaalista. Syöttökohdassa on oltava hyvä sekoitus, mutta suuria leikkaavia voimia on vältettävä, jotta muodostuneet flokit eivät hajoaisi. (Wang et al., 2007)

Flokkauskemikaalit voivat olla orgaanisia polymeerejä tai epäorgaanisia lisäaineita (Mowla et al., 2013). Orgaaniset polymeerit ovat lietteenkäsittelyssä laajasti käytettyjä. Ne voidaan jakaa kolmeen luokkaan: ei-ionisiin polymeereihin, anionisiin polyelektrolyytteihin ja kationisiin polyelektrolyytteihin. (Wang et al., 2007)

Flokkauskemikaalit ovat vastakkain varautuneita kuin lietepartikkelit, minkä vuoksi ne neutraloivat lietepartikkelien varauksen ja sitovat ne yhteen. (Mowla et al., 2013) Biologisen jätevedenpuhdistamon lietepartikkelien pintavaraus eli zeta-potentiaali on usein negatiivinen, jolloin partikkelien sähköinen hylkiminen estää niitä aggregoitumasta. Kemikaalien lisäys eliminoi lietepartikkelien välisen sähköisen hylkimisen saaden ne flokkautumaan, kuten Kuvassa 6 on esitetty. (Tuán, 2011) Useimpien lietepartikkelien negatiivisen varauksen takia kationiset polyelektrolyytit ovat käytetyimpiä lietteenkäsittelyssä. Kemikaalit myös ”silloittavat” lietepartikkeleita yhteen, jolloin ne sietävät paremmin mekaanisen kuivatuksen aiheuttamaa räsitusta. (Wang et al., 2007) Kemikaalien aiheuttama silloitus on myös esitetty Kuvassa 6.



Kuva 6 Lietepartikkeleita flokkaavat kationiset polymeerit toimivat kahdella tavalla: neutraloimalla liete­partikkeli­en negatiivisia pintavara­uksia saaden ne flok­kautumaan sekä silloittamalla liete­partikkeleita yhteen.

Polyelektrolyytit mahdollistavat lietteiden puhtaamman käsittelyn ja vähentävät operointi- ja kunnossapito-ongelmia (Wang et al., 2007). Niiden annostus kuitenkin kasvaa biolietteen osuuden kasvaessa sekalietteestä. Tämä lisää kemikaalien aiheuttamia ongelmia on lietteen poltossa ja ympäristöön aiheutuissa päästöissä (Lohiniva et al., 2001). Polyelektrolyytit eivät vaikuta lietteen polttoarvoon, vaan jäävät tuhkaan lisäten sen määrää ja vähentäen tuhkan loppukäyttömahdollisuuksia (Liimatainen et al., 2000). Kuitenkin kemiallinen kunnostus parantaa lietteiden vedenpoistoa huomattavasti, jonka vuoksi sitä käytetään. (Lohiniva et al., 2001) Orgaaniset polymeerit eivät nosta lietteen kuiva-ainepitoisuutta, mutta ne nopeuttavat lietteiden vedenpoistoa. Epäorgaanisilla kemikaaleilla, kuten rautasuoloilla ja kalkilla, voidaan nostaa lietteen kuiva-ainepitoisuutta 20 %:sta 30 %:iin. (Metcalf & Eddy, 2003)

Kemikaalikunnostuksen tarve riippuu lietteen ja mekaanisen kuivatuksen tyypeistä (Metcalf & Eddy, 2003). Taulukossa II on esitetty eri lietetyypeille ja kuivatusmenetelmille polymeerien syöttömäärät. Taulukosta havaitaan, että kuivattavan lietteen sisältäessä runsaasti biolietettä, polymeerien tarve kuivatuksessa kasvaa.

Taulukko II Polymeerien syöttömäärät eri lietetyypeille ja kuivatusmenetelmille (Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL R.Y, 2004).

Lietetyyppi	kg polymeeriä/ t lietteen kuiva-ainetta		
	Imusuodatus	Suotonauhapuristin	Sentrifugi (linko)
Primaariliete	1–5	1–4	0,5–2,5
Bioliete	7,5–15	4–10	5–8
Sekaliete (Primaari- ja bioliete)	5–10	2–8	2–5

### 4.3. Uudet tekniikat lietteiden esikäsittelyssä

Kuten edellä todettiin, biolietteen vedenpoisto perinteisillä vedenpoistomenetelmillä on hankalaa. Tämän vuoksi on kehitetty uusia menetelmiä, joilla parannetaan biolietteen vedenpoistokykyä mekaanisessa kuivauksessa, saavutetaan korkeampi loppukuiva-ainepitoisuus ja nopeutetaan vedenpoistoprosessia. (Sharma & Sanghi, 2013) Yleisesti ottaen tekniikoiden tarkoituksena on tuhota biolietteen EPS-materiaalia tai bakteerisolua ympäröivä soluseinä ja –kalvo, jolloin lieteflokkeihin sitoutunut vesi pääsee vapautumaan (Mowla et al., 2013). Tavallisesti solun pintaa hajottavia tekniikoita käytetään bioteknologiassa, jotta pystyttäisiin muokkaamaan soluelimiä ja solun sisältämää geneettistä tietoa, mutta tässä työssä tarkastellaan vain tekniikoita, jotka voisivat mahdollistaa biolietteen solunsisäisen veden vapauttamisen. (Islam et al., 2017) Menetelmästä käytetään englanninkielistä nimeä *cell lysis*, joka tarkoittaa solun hajottamista tai tuhoamista. Käsiteltäviä tekniikoita ovat ultraääni, sähkökäsittely ja kemiallinen käsittely, joista kaikilla on olemassa kaupallisia sovelluksia lietteenkäsittelyssä (ULTRAWAVES GmbH, 2018 a; Tuán, 2011; Thunberg, 2010).

#### 4.3.1 Ultraääni

Ultraäänellä tarkoitetaan ääniaaltoja tai akustista energiaa, jonka taajuus on yli 20 kHz. Ultraäänien tarkoituksena on pienentää lietteen partikkelikokojakaamaa, mikä havaitaan lietteen määrän vähentymisenä ja entsyymien vapautumisena. (Zhang & Jin, 2015)

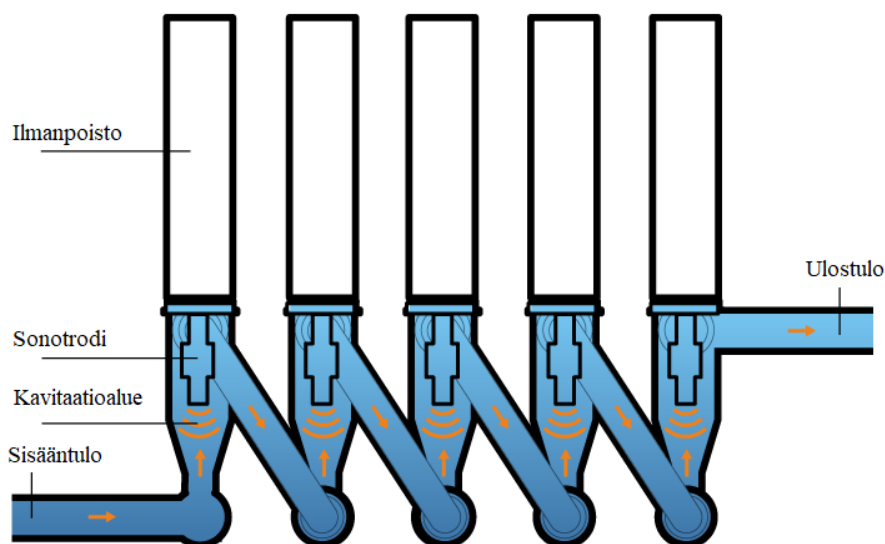
Ultraäänien käyttö lietteenkäsittelyssä perustuu sen aiheuttamaan kavitaatiovaikutukseen. Ultraääniaaltojen liike vedessä aiheuttaa toistuvan syklin, jossa molekyylien välinen etäisyys vuorottain pienenee ja vuorottain kasvaa. Sopivassa paineessa molekyylien välinen etäisyys ylittää kriittisen etäisyyden, mikä aiheuttaa kavitaatiokuplien syntymisen. Kuplat kasvavat ja

absorboivat energiaa, kunnes ne räjähtävät. (Kootenaei et al., 2015) Räjähdyksestä muodostuva shokkiaalto vapauttaa paljon mekaanista energiaa, joka hajottaa solujen seinämät (Islam et al., 2017). Sen seurauksena flokkien koko ja partikkelikokojakauma pienenevät (Kootenaei et al., 2015). Ultraäänikäsitteily edistää erityisesti mädätysprosessia, sillä lietteen partikkelikoon pienentyminen antaa lisää tilaa mädätyksessä toimiville bakteereille nopeuttamalla prosessia ja tehostaen biokaasun muodostumista. (Zhang & Jin, 2015).

Ultraäänikäsitteily voi hajottaa osan lieteflokeista hyvin pieniksi partikkeleiksi, mikä voi häiritä tulevaa prosessia, kuten lietteen suodatusta. Lisäksi ultraäänikäsitteilyssä muodostuu paljon lämpöä, joka pitää jollain tavalla vapauttaa prosessista. (Zhang & Jin, 2015)

Feng et al., (2009) tutkivat biolietteen vedenpoiston tehostamista ultraäänikäsitteilyllä. He havaitsivat, että energiamäärä 800 kJ/kg kiintoainetta paransi eniten lietteen vedenpoistoa, kun suuremmilla energiamäärillä lietteen vedenpoisto heikkeni. Yhdistettäessä ultraääni polyelektrolyyttikäsitteilyyn lietteen vedenpoisto ei selkeästi parantunut verrattuna pelkkään kemikaalikunnostukseen. (Feng et al., 2009) Tämä viittaa siihen, että ultraäänikäsitteilyn vaikutus lietteeseen suhteutettuna kemikaalikunnostukseen on vähäinen. Myös VTT on tutkinut kansainvälisessä tutkimushankkeessaan ultraäänikäsitteilyä vaikutusta biolietteeseen. Tutkimuksen mukaan esikäsitteilymenetelmänä ultraäänellä ennen suotonauhapuristinta voidaan vähentää kymmeniä prosentteja märän lietteen massasta ja kasvattaa kuiva-ainepitoisuutta noin 2 %:a. Kuitenkin taloudellisista ja teknisistä syistä vain osa lietevirrasta kannattaisi käsitellä teollisesti ultraäänellä. (Kyllönen et al., 2007)

Saksalainen ULTRAWAVES GmbH kehittää ja markkinoi lietteenkäsitteilyyn ultraäänilaitetta, jossa useat peräkkäiset oskillaattoriyksiköt käsittelevät putkessa liikkuvaa lietettä. Lietteiden virtaus putkistossa noin 2 m<sup>3</sup>/h riippuen sen kuiva-ainepitoisuudesta. (ULTRAWAVES GmbH, 2018 b) Kuvassa 7 on esitetty mallikuva laitteistosta.



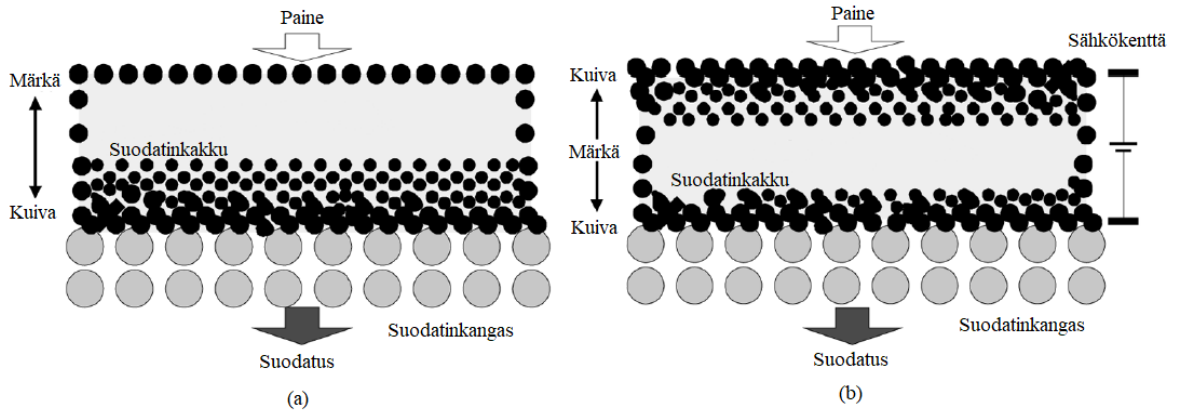
Kuva 7 Mallikuva ULTRAWAVES GmbH –yrityksen kehittämästä ultraäänilaitteesta lietteenkäsittelyyn (ULTRAWAVES GmbH, 2018 b).

Ultraäänilaitteiston tarkoituksena on putkiston alkupäässä rikkoa flokit ja myöhemmässä vaiheessa hajottaa bakteerisolut. Bakteerisolujen hajotessa niiden entsyymit vapautuvat solujen sisältä, mikä edistää lietteen biologista hajotusta esimerkiksi mädätysprosessissa. Ultraäänitekniikkaa voidaan hyödyntää useassa vaiheessa biologista vedenpuhdistusprosessia, esimerkiksi tiivistyksen jälkeen. (ULTRAWAVES GmbH, 2018 a)

#### 4.3.2 Elektrokuivatus

Lietteiden elektrokuivatus on prosessi, jossa sähkövirta läpäisee lietteen aiheuttaen elektroosmoosi-ilmiön. Se tehostaa vedenpoistoa lietteestä ja parantaa suodatinkakun kuiva-ainepitoisuutta. Elektro-osmoosi on ilmiö, jossa sähkövirta vaikuttaa lietepartikkelien pinnan sähköiseen kaksoiskerrokseen saaden aikaan elektro-osmoottisen virtauksen. Sillä tarkoitetaan nesteen virtausta huokoisen lietepartikkelin läpi katodin tai anodin suuntaan riippuen partikkelin zeta-potentiaalista. Biolietteellä elektro-osmoottinen virtaus tapahtuu katodilta anodille. (Tuán, 2011)

Elektrokuivatus yhdistettynä mekaaniseen vedenpoistoon, kuten suotonauhapuristimeen, parantaa lietteiden vedenpoistoa (Lee et al., 2007). Kuvassa 8 on esitetty kakun muodostus mekaanisessa vedenpoistossa ja elektrokuivatuksessa.



Kuva 8 Suodatinkakun muodostuminen (a) mekaanisessa vedenpoistossa, (b) elektrokuivatuksessa (Lee et al., 2007).

Kuvassa 8a on esitetty mekaanisen vedenpoiston vaikutus suodatinkakun muodostumiseen. Siinä kiintoaine painautuu suodatinkankaalle mekaanisen voiman, kuten paineen tai alipaineen, vaikutuksesta ja muodostaa suodatinkakun. Kakun muodostuminen suodatinkankaan päälle voi aiheuttaa kankaan tukkeutumista, mikä heikentää vedenpoistoa ja kakun kuivautusta. Kuvassa 8b on esitetty lietepartikkelien liikkuminen kakunmuodostuksen aikana elektrokuivatuksessa. Kiintoainepartikkelit jakautuvat kahteen osaan. Osa partikkeleista painautuu suodatinkankaalle paineen vaikutuksesta, ja osa liikkuu negatiivisen pintavarausvaikutuksesta kohti sähkökentän anodia, jona suotonauhapuristimen yläviira toimii. Ilmiötä kutsutaan elektroforeesiksi. Se vähentää suodatinkankaan tukkeutumista, mikä parantaa vedenpoistoa lietteestä. (Lee et al., 2007)

Elektrokuivatuksen avulla lietteen kuiva-ainepitoisuutta voidaan kasvattaa kuiva-ainepitoisuudesta 20 % pitoisuuteen 45 %. Sähkökentän voimakkuuden ja kuivatusajan kasvaessa kiintoainekakun kuiva-ainepitoisuus kasvaa. Tämä taas nostaa energiankulutusta ja elektrokuivatuksen käyttökustannuksia. Elektrokuivatus kuluttaa energiaa 370–450 kWh/t kuiva-

ainetta kohti. Tämä on kuitenkin vain kymmenesosa nykyisin aiheutuvista lietteenkäsittelykustannuksista, minkä vuoksi elektrokuivatus voisi olla myös taloudellisesti kannattavaa. (Lee et al., 2007)

Elektrokuivatuksessa suuri ongelma on anodin korroosio. Arvometallit eivät ole syöpyvää materiaalia, mutta ne ovat kalliita ja siksi käytettävissä ainoastaan laboratoriomittakaavassa. Grafiitti on edullista, mutta se ei kestä mekaanista rasitusta. Anodin materiaaliksi voi sopia esimerkiksi titaanilla päällystetty metallioksidiseos. (Tuán, 2011)

### 4.3.3 Kemicond-käsittely

Kemicond-käsittely on lietteen kemiallinen esikäsittelymenetelmä, jossa mädätetyn lietteen EPS-rakennetta hajotetaan alentamalla sen pH:ta rikkihapolla ja vetyperoksidilla. Mädätetyssä lietteessä olevat rauta(II)yhdisteet, jotka ovat peräisin fosfaatin kemiallisesta saostuksesta, lisäävät lietteen EPS-matriisia. Kemicond-prosessissa rauta(II)yhdisteet muutetaan rauta(III)yhdisteiksi, jolloin lietteen suodatus parantuu. (Thunberg, 2010)

Mädätettyyn lietteeseen lisätään rikkihappoa alentamaan pH arvoon 4. Happokäsittelyn jälkeen lisätään vetyperoksidi, joka aiheuttaa rauta(II)-ionien hapettumisen rauta(III)ioneiksi. Tällöin liuenneet fosfaatti-ionit saostuvat. Vetyperoksidi hajoaa nopeasti hydroksyyiliradiikaaleiksi, kun rauta(II)ioneja on liuoksessa. (Thunberg, 2010) Tämä hajottaa entisestään lietteen EPS-rakennetta, jolloin flokkien sisältämää vettä vapautuu. Hapan liete neutraloidaan natriumhydroksidilla, minkä jälkeen lietettä kunnostetaan polymeerillä vedenpoiston tehostamiseksi. (Pöyry Environment Oy, 2007)

Kemicond-käsittely tehokkuus riippuu paljon käytetystä vedenpoistomenetelmästä. Käppälän jätevedenpuhdistamolla Ruotsissa on käytössä täysimittainen Kemicond-prosessi. Siellä suotonauhapuristin on korvattu Kemicond-käsittelyllä ja hydraulisella painepuristimella, jolla Thunberg on todennut olevan paras suodatuskyky. Lietekakun kuiva-ainepitoisuutta saadaan nostettua 19 %:sta 42 %:in, jolloin lietteen määrä vähenee noin 50 %:a. Kemicond-prosessissa käytetään useita kemikaaleja, joiden käyttöturvallisuudesta ja kierrätyksestä on huolehdittava. Kemicond-käsittely ei kokonaan poista kemikaalikunnostuksen tuomia ongel-

mia, vaikkakin sen avulla voidaan vähentää polymeerien käyttöä. Kemicond-prosessin haittoina ovat kemikaalikustannukset, happamuuden aiheuttamat ongelmat laitteistossa sekä vähäinen käytännön kokemus teollisessa mittakaavassa.

## **5 LASERTEKNIikka LIETTEENKÄSITTELYSSÄ**

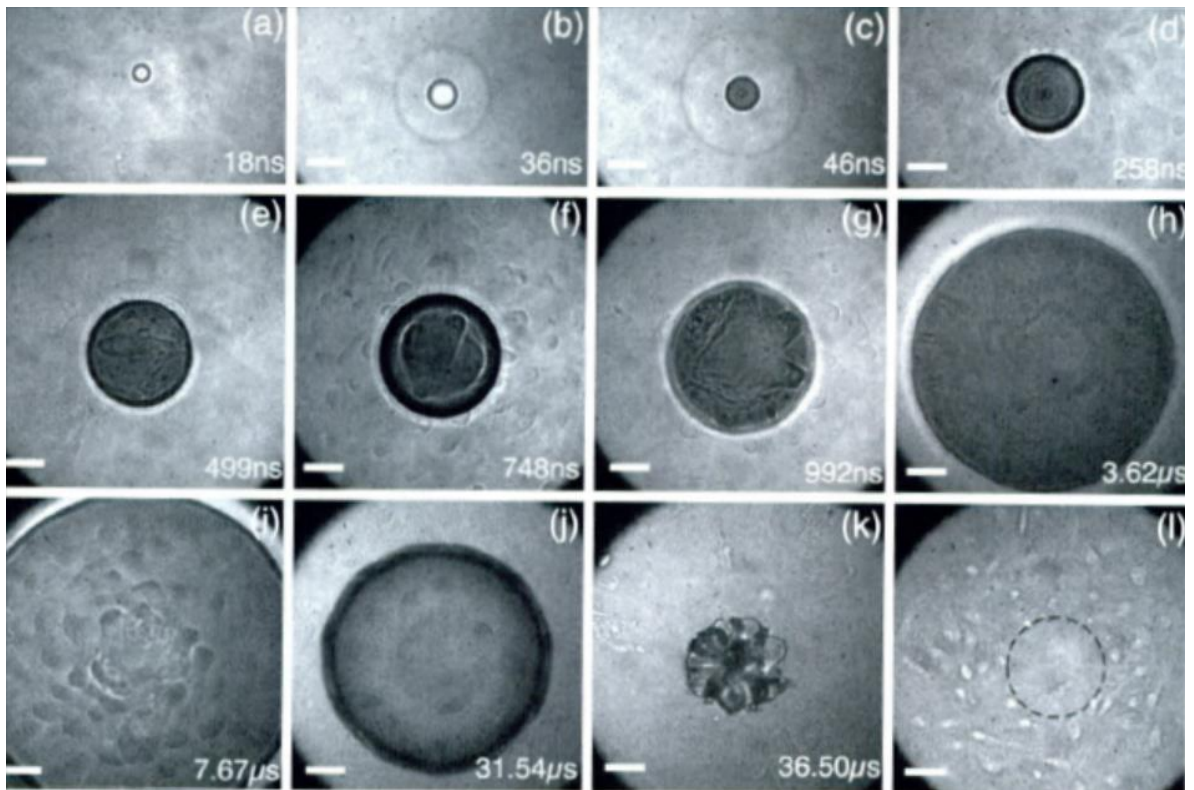
Lasersäde tarjoaa tarkan ja korkeaintensiteettisen työkalun materiaalien prosessointiin (Hellman et al., 2008). Lasertekniikan perinteisiä käyttökohteita ovat teollisuudessa metallien laserleikkaus, lääketiede ja tiedonsiirto. Lasersädettä on myös hyödynnetty biologian sovelluksissa. Lasertekniikan ala on kehittynyt kymmenissä vuosissa huomattavaa tahtia, ja tämä yhdistettynä laserin uniikkeihin ominaisuuksiin, se tarjoaa ihanteellisen hyödyn biologisiin sovelluksiin. (Lackner, 2008) Lasertekniikkaa ei ole aiemmin sovellettu lietteenkäsittelyssä, ja tässä luvussa esitelläänkin laserin hypoteettisia vaikutuksia biolietteeseen biotekniikassa tehtyjen tutkimusten pohjalta.

### **5.1 Laserin vaikutus lietteeseen/soluihin**

Lasersäteen vaikutusta petrimaljaan kiinnitettyyn solukerrokseen on tutkittu pienessä laboriomittakaavassa. Muun muassa Rau et al. ovat tutkimuksissaan selvittäneet, millä tavalla lasersäde vaikuttaa soluihin. Kun pulssitettu lasersäde kohdistetaan riittävän suurella energialla pieneen pisteeseen, muodostuu plasmaa johtuen materiaalin nopeasta lämpenemisestä. Sitä seuraa shokkiaallon eteneminen, kavitaatiokuplan muodostuminen, sen laajeneminen ja luhistuminen. Solujen sijaitessa lähellä lasersäteen polttopistettä kavitaatiokuplan laajentuminen aiheuttaa solujen tuhoutumisen.

Kuvassa 9 on esitetty laserpulssin aiheuttama solujen tuhoutuminen. Kuvasarja on kuvattu aikaerotteisella fluorometrialla, jossa laserpulssia analysoitiin solujen emittoimalla valolla ajan funktiona.



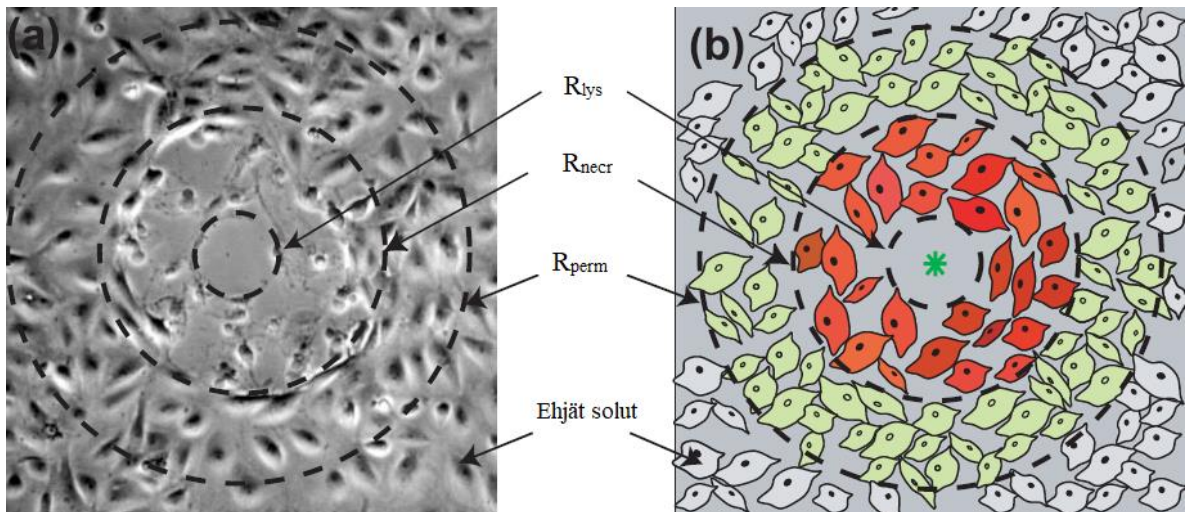


Kuva 9 Kuvasarja laserpulssin aiheuttamasta solujen tuhoutumisesta aikaerotteisella spektroskopiolla kuvattuna. Sarjasta nähdään kuvissa a–c plasman muodostuminen ja shokkiaallon leviäminen, kuvissa c–i kavitaatiokuplan syntyminen ja laajentuminen, kuvissa j–k kuplan luhistuminen ja sen tuhoutuminen, ja kuvassa i laserpulssin aikaansaama alue, jossa solut ovat pyyhkiytyneet pois. Kuvissa on esitetty kulunut aika laserpulssin osumisesta näytteeseen. Mittapalkki = 50  $\mu\text{m}$ . (Rau et al., 2006)

Kuvassa 9a nähdään plasman laajentumisen aiheuttama shokkiaallon syntyminen ja kuvissa 9a–c sen eteneminen. Vaikka shokkiaallon aikaansaama paine on huomattava, se ei kuitenkaan aiheuta näkyvää solujen hajoamista. Plasman laajentuminen johtaa kavitaationkuplan muodostumiseen noin 25 ns kuluttua laserpulssin osumisesta näytteeseen. Kuvista 9c–i nähdään kavitaatiokuplan laajentuminen, joka aiheuttaa solujen tuhoutumisen kuplan seinämän saavuttaessa ne. Kuplan saavuttaessa maksimikokonsa se luhistuu melko nopeasti 1–2  $\mu\text{s}$  kuluessa, kuten nähdään Kuvasta 9j. Kuvassa 9k on esitetty kavitaatiokuplan tuhoutuminen. Kuplan tuhoutuminen aiheuttaa nestevirtauksen, joka runtelee solut kuplan ympäriltä. Kup-

lan luhistuminen ei leviä solujen tuhoutumisalueelle, mutta se puhdistaa alueen kaikista solujäänteistä (Kuva 8l). Laserpulssin aiheuttaman prosessin tuloksena on soluista puhdas alue lasersäteen polttopisteen ympäriltä. (Rau et al., 2006)

Hellman et al. tutkivat pulssitetun nanosekuntilaserin säteen vaikutusalueutta rottakengurun munuaisepiteelistä muodostetulla solukerroksella. Kokeissaan he käyttivät Nd:YAG-laseria (neodyymikidelaser) aallonpituusalueella 532 nm ja 6 ns pulssipituutta. Pulssien energioina käytettiin 8, 16, 24 ja 40  $\mu\text{J}$ . Aikaisempien kokeiden perusteella havaittiin pulssienergian 8  $\mu\text{J}$  toimivan kynnyksenergianä plasmanmuodostumiselle, joten valitut energiat vastaavat 1-kertaisesti–5-kertaisesti plasmanmuodostuksen kynnyksenergiaa. Tutkimuksista havaittiin, että lasersäteilyn aiheuttamat vauriot voidaan tunnistaa kolmella sädettä ympäröivällä alueella. Soluvaurioalueet on esitetty Kuvassa 10.



Kuva 10

Pulssilasersäteen aiheuttamat soluvaurioalueet (a) faasikontrastimikroskoopilla kuvattuna ja (b) kaavakuvalla esitettynä. Solut  $R_{lys}$ -säteen sisällä ovat kuolleita ja peseytyneet pois pesun aikana.  $R_{necr}$ -alueella solut ovat nekroottisia ja mikroskoopilla näkyvissä.  $R_{perm}$ -alueella solujen solukalvo on läpäisevä ja alueen ulkopuolella solut ovat ehjiä eivätkä ole vaurioituneet lasersäteestä. (Hellman et al., 2008)

Kuvan 10 keskellä havaitaan soluton  $R_{lys}$ -alue, joka osoittaa laserkäsitellyssä kuolleet solut, jotka ovat peseytyneet pois pesuvaiheessa, joka on suoritettu ennen solujen analysointia. Alueen ympärillä on säteen  $R_{necr}$  rajoittama alue, jossa on kiinni pysyneitä, mutta nekroottisia eli

kuolleita soluja. Kolmas alue on  $R_{\text{perm}}$ -säteen rajaama alue, jossa solujen solukalvot ovat läpäiseviä eli niiden solukalvot ovat vaurioituneita. Tämän alueen ulkopuolella solut ovat ehjiä, eivätkä niiden solukalvot ole läpäiseviä. Alueiden kokoon vaikuttaa suoraan pulssienergian voimakkuus. Kynnysenergialla 8  $\mu\text{J}$  läpäisevien solujen säteen ( $R_{\text{perm}}$ ) pituus on noin 100  $\mu\text{m}$  kun taas pulssienergialla 40  $\mu\text{J}$  vastaavan säteen pituus on noin 250  $\mu\text{m}$ . (Hellman et al., 2008) Vaurioituneiden solujen alue on pienempi kuin kuplan maksimikoko, sillä loppuvaiheessa kuplan laajentumista sen seinien aiheuttama leikkausvoima ei ole riittävän suuri hajottamaan soluja (Rau et al., 2006).

McMillan et al. tutkivat leväsolujen hajottamista laserilla. Tutkimuksissaan he käyttivät pulssitettua Nd:YVO<sub>4</sub>-laseria 1064 nm aallonpituudella, 10 W teholla ja 20 kHz taajuudella. Näytteenä toimi 30  $\mu\text{L}$ :n näyte leväsoluja, joita laserkäsiteltiin 60 sekunnin ajan käyden 10 kertaa läpi sama alue. Tutkimuksissa laserilla saatiin tuhottua peräti 96,5 % leväsoluista. Arvioitaessa kuitenkin tekniikan soveltuvuutta teollisuuteen sen havaittiin tuolloin olevan vain pienen mittakaavan sovellus, sillä laserkäsitely kulutti liikaa energiaa. (McMillan et al., 2013)

Edellä esitetyt biotekniikan sovellukset poikkeavat lietteenkäsittelyyn suuntautuvasta sovelluksesta. Lääketieteen ja biotekniikan sovelluksissa tavoitteena on usein tuhota solua paikallisesti ja välttää ympäröivään kudokseen kohdistuvaa vahinkoa. Lietteenkäsittelysovelluksissa soluihin aiheutuvan vaurion halutaan sen sijaan kohdistuvan mahdollisimman laajalle alueelle. Juuri sen vuoksi edellä esitetyissä tutkimuksissa käytettävien lasereiden tehot ovat hyvin pieniä. Lietteenkäsittelyssä käytettävät laserit olisivat teollisuuden mittakaavan lasereita, jolloin myös saavutettavat tehot olisivat paljon suurempia.

Laserin solujen tuhoamismekanismi vaikuttaisi olevan rinnastettavissa ultraäänen toimintaan tuhota soluja, sillä molemmissa tekniikoissa kavitaatiokupla aiheuttaa solujen tuhoutumisen. Voidaan myös olettaa, että biolietettä käsiteltäessä laserin vaikutukset olisivat rinnastettavissa ultraäänen vaikutuksiin. Tällöin laserkäsitely pienentäisi biolietteen flokkirakennetta, ja käsittelyä jatkettaessa sen avulla saataisiin tuhottua myös yksittäisiä bakteerisoluja. Bakteerisolujen hajotessa niiden sitoma vesi vapautuisi, jolloin se ja flokkien sitoma vesi voitaisiin poistaa kuivatuksen yhteydessä ja näin nostaa lietteen kuiva-ainepitoisuutta. Mahdollista

olisi myös, että bakteerien sisältämät entsyymit jäisivät toimintakykyisinä lietteeseen, jolloin esimerkiksi lietteen mädätysprosessia voitaisiin parantaa.

## 5.2 Laserin ominaisuudet ja prosessiparametrit

Laservalolla on useita hyviä ominaisuuksia erilaisiin sovelluskohteisiin verrattuna perinteiseen valonlähteeseen. Lasersäde on koherenttia eli laservalon aalloilla on sama taajuus, ja ne etenevät samassa vaiheessa. Laservalon aallot voivat edetä koherentisti useita metrejä, kun taas hehkulampun valon aallot pystyvät etenemään koherentisti vain muutamia mikrometrejä. Laservalo on myös monokromaattista eli se sisältää ainoastaan yhtä aallonpituutta. Lasersäde on korkealaatuinen ja korkeaenerginen, ja se kyetään kohdistamaan hyvin pieneen pisteeseen. (Lackner, 2008)

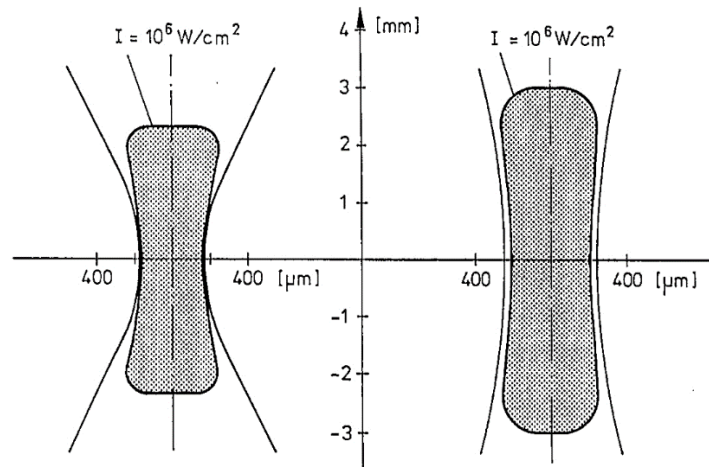
Lasertyypit voidaan jakaa sädetyypin mukaisesti CW-lasereihin (*continuous wave* –laser, jatkuvatoiminen laser) ja pulssilasereihin. Jatkuvatoimisessa laserissa lasersäde on tasaisella teholla koko työstön ajan päällä, kun taas pulssilaserissa säde tuodaan lyhyinä, korkeatehoisina pulsseina materiaaliin. (Kujanpää, et al., 2005)

Laserin tärkeimmät säädettävät prosessiparametrit ovat teho, työstönopeus, polttopisteen halkaisija, polttovälin pituus, polttopisteen sijainti ja hatch. Näiden lisäksi pulssilaserissa voidaan säätää pulssin pituutta, taajuutta ja pulssien peräkkäistä päällekkäisyyttä.

Syvyys, jolla lasersäde tunkeutuu materiaaliin, riippuu käytettävästä tehosta, työstönopeudesta ja työstettävästä materiaalista. Työstönopeuden kasvaessa lasersäteen tunkeutuvuus materiaaliin pienenee, kun käytettävä teho pysyy vakiona. Kullekin materiaalille löytyy omat yhdistelmät työstönopeuden ja tehon välille, joilla saadaan aikaan haluttu työstön syvyys. (Kujanpää et al., 2005) Pulssilaserissa pulssien taajuus, polttopisteen halkaisija ja peräkkäisten pulssien päällekkäisyys määrittävät työstönopeuden.

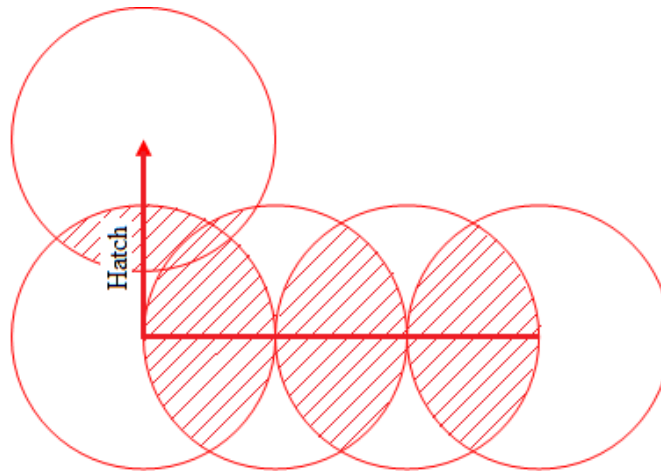
Laserista tulevan raakasäteen kokoa fokusoidaan pienemmäksi, jotta materiaalia voitaisiin työstää tarkemmin ja säteen tehotiheys eli säteen teho pinta-alaa kohti kasvaisi polttopisteessä. Polttopisteen halkaisija yhdessä tehon kanssa määrittää lasersäteen intensiteetin polttopisteessä ja sen, kuinka syvälle lasersäteen vaikutus tunkeutuu. Polttopisteen kokoa rajoit-

tavat useat säteen ominaisuudet sekä laseroptiikka. Kun laserin polttoväli eli fokuoivan linsin keskipisteen ja polttopisteen välinen etäisyys kasvaa, fokuoipiste pitenee. Tällöin säteen alue, jolla on korkea intensiteetti, laajenee. Fokuoipisteen pitenemisestä on hyötyä etenkin käsiteltäessä suuria kerrospaksuuksia. Fokuoipisteen pidentyessä polttopiste halkaisija kasvaa ja tehosiheys heikkenee. (Kujanpää et al., 2005) Kuvassa 11 on esitetty, kuinka polttovälin pidentäminen vaikuttaa säteen muotoon.



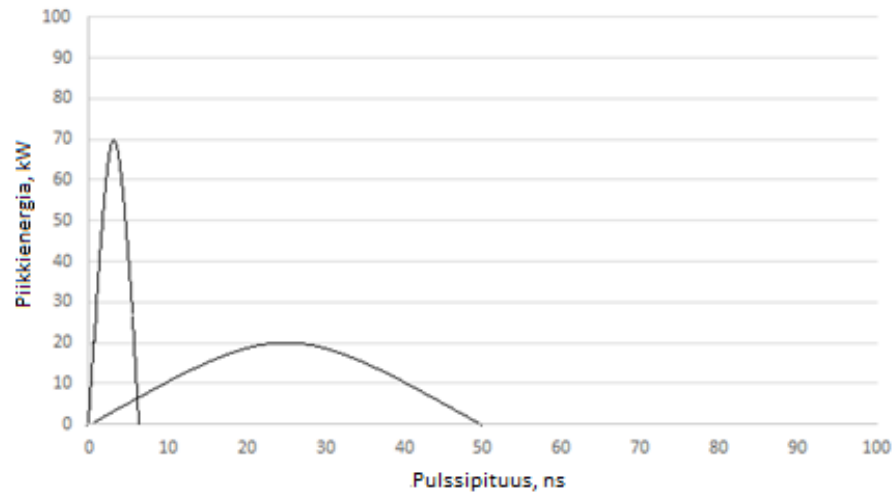
Kuva 11 Polttovälin vaikutus lasersäteeseen. Vasemmanpuoleisessa kuvassa polttoväli on lyhyt, jolloin polttopisteen halkaisija on puolet pienempi verrattuna oikeanpuoleiseen kuvaan, jossa polttoväli on pitkä. Harmaa alue kuvaa säteen korkeaintensiteettistä aluetta. Pitkällä polttovälillä korkeaintensiteettinen alue on pinta-alaltaan suurempi, jolloin sillä pystytään työstämään tehokkaasti laajempaa aluetta kuin pienellä polttovälillä. (Kujanpää et al., 2005)

Polttopisteen sijainnilla tarkoitetaan polttopisteen etäisyyttä työstettävästä pinnasta. Polttopisteen sijainnin ollessa 0 mm polttopiste on materiaalin pinnassa. Sen ollessa materiaalin yläpuolella merkinä käytetään plusmerkkiä, ja polttopisteen sijaitessa materiaalin sisällä merkinä käytetään miinusmerkkiä. (Kujanpää et al., 2005) Hatchilla tarkoitetaan työstöjälkien pystysuuntaista etäisyyttä toisistaan. Hatchia on selvennetty Kuvassa 12, jossa ympyrät kuvaavat laserpulsseja. Kuvassa on viivoitettuna alueet, joissa pulssit menevät päällekkäin. Peräkkäisten pulssien päällekkäisyys eli overlap on kuvassa 50 %. Overlapilla 0 % pulssit olisivat vierekkäin eivätkä ne menisi lainkaan päällekkäin.



Kuva 12 Prosessiparametri hatch eli lasersäteen muodostamien työstöjälkien välinen etäisyys toisistaan. Ympyrät kuvaavat pulsseja ja paksulla nuolella kuvataan lasersäteen etenemistä. Alueet, joissa pulssit menevät päällekkäin, ovat viivoitettuna.

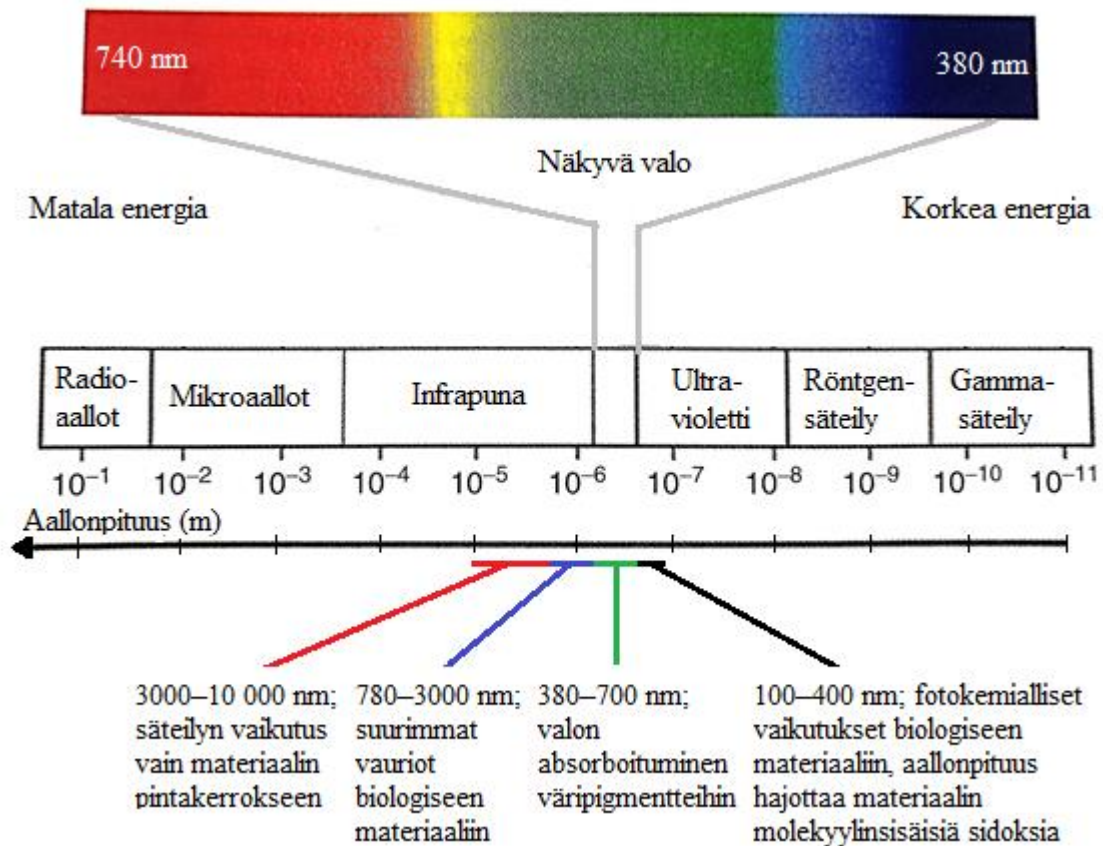
Pulssilasereissa pulssin pituus määrittää, millaisessa muodossa energia tuodaan materiaaliin. Pulssipituuden ollessa lyhyt saavutetaan piikki, jolla on suuri teho eli sillä on suuri piikkienergia, mutta usein matalampi pulssienergia. Suuri piikkienergia mahdollistaa säteen suuren tehotiheyden ja sen tunkeutumisen materiaalin sisälle. Usein kuitenkin materiaalin työstäminen suurella piikkienergialla on hitaampaa kuin pitkällä pulssipituudella. Pitkällä pulssin pituudella saadaan aikaan suuri pulssienergia, jolloin pulssi myös vaikuttaa pidemmän aikaa materiaaliin. Kuvassa 13 havainnollistetaan piikki- ja pulssienergian välistä yhteyttä kahdella eri pulssipituudella. Pulssin tuottama piikkienergia voidaan lukea suoraan y-akselilta ja sen tuottama pulssienergia voidaan laskea integroimalla pulssin käyrän ja x-akselin väliin jäävä pinta-ala.



Kuva 13 Piikki- ja pulssienergian välinen yhteys. Pulssienergia voidaan laskea integroimalla pulssin muodostaman käyrän ja x-akselin väliin jäävä pinta-ala.

### 5.3 Laserparametrien vaikutus biologiseen materiaaliin

Lasersäteilyn vaikutus biologiseen materiaaliin riippuu materiaaliin kohdistuvasta laserin tehosta, aallonpituudesta, vaikutusajasta sekä polttopisteen halkaisijasta. Optisen säteilyn aallonpituuden vaikutus biologiseen materiaaliin voidaan jakaa neljään kategoriaan, jotka ovat esitetty Kuvassa 14. Kuvassa 14 optisen säteilyn aallonpituusalueet ovat myös rinnastettuna sähkömagneettisen säteilyn aallonpituusalueisiin. Aallonpituusalue, jolla saadaan eniten aiheutettua vauriota biologiseen materiaaliin, on 780–3000 nm. (Lackner, 2008) Sen vuoksi tämä aallonpituusalue on optimaalisin biolietteen laserkäsittelyyn.



Kuva 14 Valon aallonpituuden vaikutus biologiseen materiaaliin (muokattu lähteestä Lackner, 2008).

## 6 MEKAANINEN VEDENPOISTO

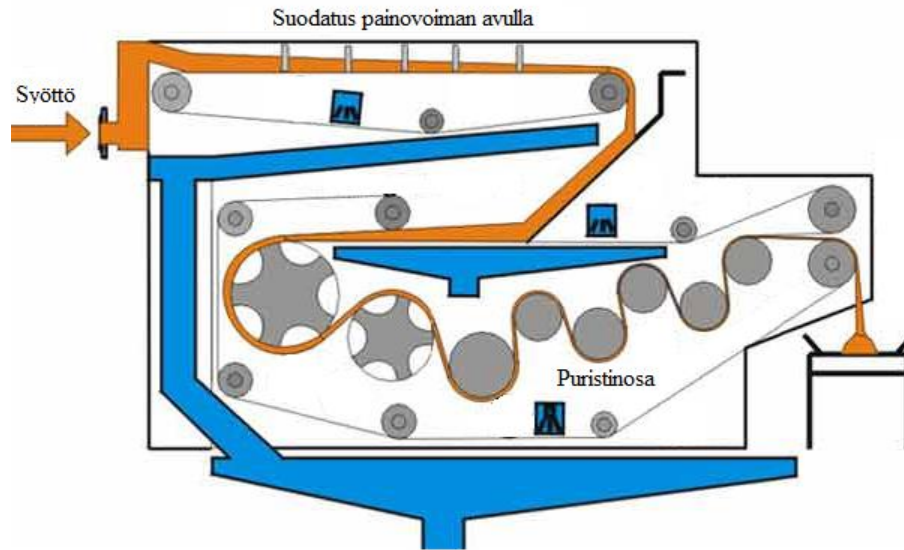
Riippumatta lietteen loppusijoitustavasta kunnallisissa ja metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoilla lietteestä erotetaan vesi mekaanisesti suotonauhapuristimilla, lingoilla tai ruuvi-puristimilla (Liimatainen et al., 2000). Mekaaninen vedenpoisto on laajasti teollisuudessa käytetty vedenpoistomenetelmä pääosin johtuen sen alhaisesta energiankulutuksesta verrattuna termiseen kuivatukseen. Mekaanisella vedenpoistolla ei pystytä kuitenkaan poistamaan lieteflokkeihin sitoutunutta vettä, jonka vuoksi lietteiden esikäsittely on välttämätöntä (Mowla et al., 2013). Lietteenkäsittelylaitokselle sopivin vedenpoistomenetelmä riippuu muun muassa lietteen määrästä, laadusta ja halutusta loppukuiva-ainepitoisuudesta (Lohiniva et al., 2001).



Lietteen hävitystapa vaikuttaa haluttuun loppukuiva-ainepitoisuuteen. Polttoa varten lietteen kuiva-ainepitoisuus pitää olla vähintään 35 %, jotta poltto toimisi tasaisesti ja olisi energia-  
tehokas. Jos kuiva-ainepitoisuus jää paljon alle tämän, on käytettävä tukipolttoaineita, kuten  
kuorta. (Liimatainen et al., 2000) Kuori tai hakejäte voidaan lisätä myös ennen mekaanista  
puristusta tehostamaan kuivatusta (Mowla, et al., 2013). Mikäli liete kompostoidaan, alhai-  
sempikin kuiva-ainepitoisuus riittää, sillä tavoitteena on ainoastaan pienentää käsiteltävää  
lietemäärää (Liimatainen et al., 2000).

### **6.1 Suotonauhapuristin**

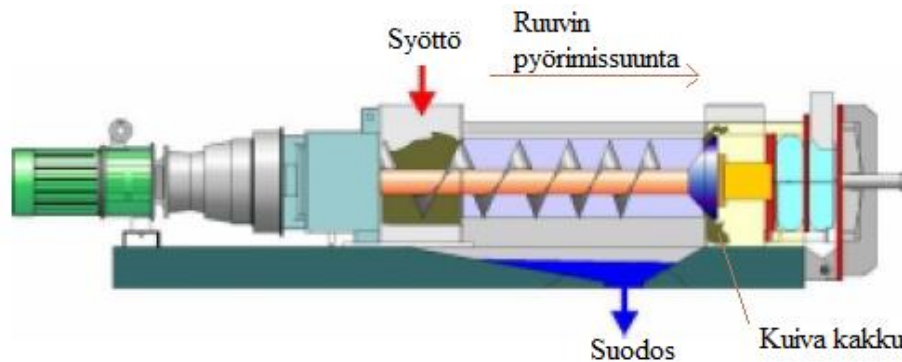
Suotonauhapuristimen toiminta perustuu puristimen alussa gravitaation avulla tapahtuvaan  
vedenpoistoon ja loppupuolella lietteen puristamiseen suotonauhojen välissä (Liimatainen et  
al., 2000) Suotonauhapuristimen rakenne on esitetty Kuvassa 15. Suotonauhoista toinen on  
huokoista materiaalia ja toinen läpäisemätöntä materiaalia, jolloin puristinosassa rullasarjat  
puristavat lietteestä ylimääräisen veden huokoisen nauhan läpi. Ensimmäiset rullasarjat pu-  
ristavat lietettä matalalla paineella paineen kasvaessa puristinosan loppua kohden. Suotonau-  
hapuristimen loppuosassa lietekakku putoaa hihnalle, josta se kuljetetaan hävitettäväksi.  
Suotonauhapuristimen tehokkuus riippuu puristusvoimasta ja retentioajasta. (Gray, 2010)  
Lietteen puristamisen vuoksi biolietteen osuus sekalietteestä on oltava matala tai vaihtoeht-  
oisesti on käytettävä runsaasti kemikaaleja lietteen kunnostukseen. Pelkkää biolietettä pu-  
ristettaessa sen kuiva-ainepitoisuus jää 10–20 %:iin. Metsäteollisuuden kuitu- ja biolietteen  
seoksella päästään kuiva-ainepitoisuuteen 20–35 %:a riippuen primaarilietteen osuudesta se-  
kalietteessä sekä prosessiin syötetyn polymeerin määrästä (Liimatainen et al., 2000; Lohiniva  
et al., 2001)



Kuva 15 Suotonauhapuristin. Suotonauhapuristimen alussa suodatus tapahtuu painovoiman avulla, minkä jälkeen lietekakku johdetaan puristinosaan kuivattavaksi (Krofta Engineering).

## 6.2 Ruuvipuristin

Ruuvipuristimessa puristimen sisällä pyörivä ruuvi kuljettaa lietettä eteenpäin ja painaa lietettä vasten puristimen seiniä. Puristuksen aiheuttama paine saa veden puristumaan seinämien reikien läpi. (Lohiniva et al., 2001) Ruuvipuristin esitetty Kuvassa 16. Erimalliset ruuvipuristimet eroavat lähinnä puristinosan suunnittelussa (Gray, 2010).

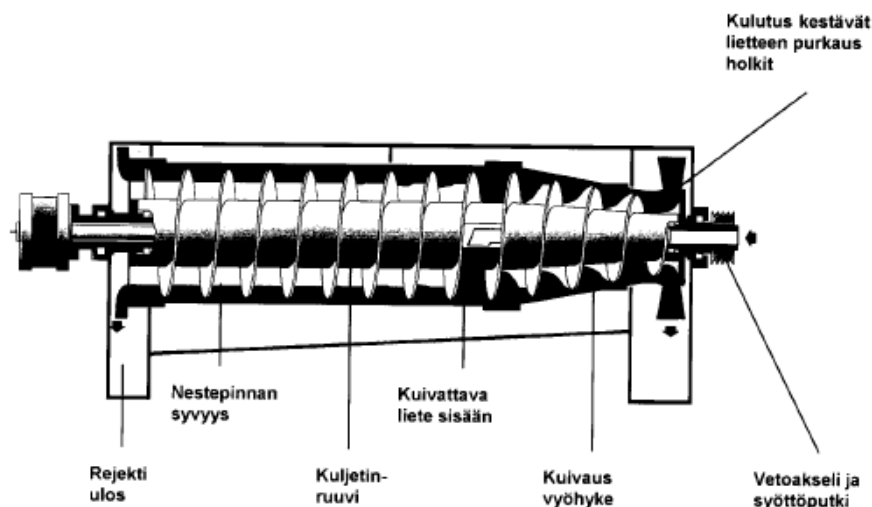


Kuva 16 Ruuvipuristin. Puristimen sisällä pyörivä ruuvi puristaa lietettä seiniä vasten, mikä saa veden puristumaan seinien reikien läpi (Lohiniva et al., 2001).

Loppukuiva-ainepitoisuus on samaa luokkaa kuin suotonauhapuristimissa, noin 20–40 %. Jossain ruuvipuristimissa ruuvia tai puristimen seiniä voidaan lämmittää höyryllä, minkä avulla lietteen kuiva-ainepitoisuutta voidaan nostaa jopa 5 prosenttiyksikköä. (Liimatainen et al., 2000) Lisäksi höyry vähentää kitkaa lietteen ja ruuvien väliltä, mikä vähentää sähkönkulutusta ja puristimen kulumista. Ruuvipuristimessa biolietteen osuus sekalietteestä on hyvä olla alle 40 %. (Lohiniva et al., 2001)

### 6.3 Linko

Linkojen toiminta perustuu keskipakovoimien kiihdyttämään kiintoaineen laskeutumiseen nesteeseen jäädessä kiintoainefaasin yläpuolelle. Kuvassa 17 on esitetty linkon toimintaa. Kiintoaine erottuu linkon seinämille pyöriksen vaikutuksesta. (Lohiniva et al., 2001) Linkon sisällä on ruuvi, joka pyörii hieman linkoa hitaammin tehostaen lietteen vedenerotusta. Ruuvi auttaa myös kiintoaineen ulos kuljettamisessa. Erottunut neste poistetaan linkosta vastakkaisesta päästä kuin kiintoaine. (Lohiniva et al., 2001)



Kuva 17 Linkon rakenne. Linkon pyöriessä kuivattava liete kerääntyy linkon seinämille keskipakovoimien ansiosta. Linkon sisällä olevalla ruuvilla kuljetetaan kiintoaine ulos veden poistuessa vastakkaisesta päästä. (Lohiniva et al., 2001).

Linkoja käytetään isoilla kunnallisilla jätevedenpuhdistamoilla ja usein myös metsäteollisuudessa. Yhdyskuntalietteillä saavutetaan kuiva-ainepitoisuus 20–30 %:a, mutta pelkän biolietteen kuiva-ainepitoisuus jää usein vain 10 %:iin. Lingoissa on käytettävä kemiallista kunnostusta, jotta vedenpoistoa lietteestä saadaan parannettua. Tämä kuitenkin lisää prosessin kustannuksia. (Lohiniva et al., 2001)

## **7 BIOLIETTEEN SUODATUS JA TUKIAINEIDEN KÄYTTÖ**

Bakteerimassasta koostuvan ylijäämälietteen suodatus poikkeaa usein epäorgaanisen materiaalin suodatuksesta. Biolietteen suodatusta vaikeuttaa bakteerisolujen ja -flokkien huomattava kokoonpuristuvuus, joka johtuu vettä sitovasta EPS-rakenteesta ja bakteerisoluista. (Jadhav et al., 2017) Biolietteen vedenpoisto on vaikeaa jopa korkeassa paineessa (Sharma & Sanghi, 2013). Tässä luvussa käsitellään lyhyesti biolietteen suodatuksen perusteita ja siihen vaikuttavia prosessiparametreja. Lisäksi käsitellään tukiaineiden käyttöä suodatuksessa ja pohjustetaan kokeellista osaa, jossa torrefioitua hiiltä käytetään suodatuksen tukiaineena.

### **7.1 Biolietteen suodatus**

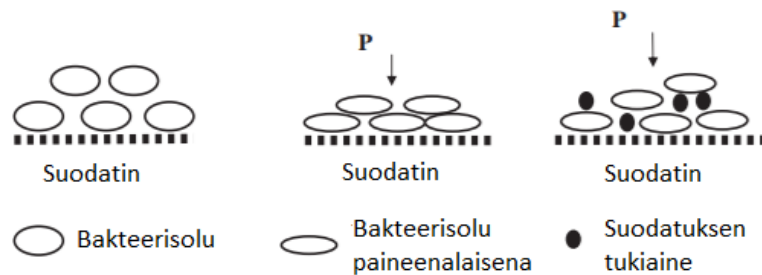
Biolietteen suodatus alkaa lietteen kiintoainepartikkelien laskeutuessa suodattimen päälle, ja niiden muodostaessa läpäisevän, jäykän ristikkorakenteisen kerroksen (Mowla et al., 2013). Suodatuksen jatkuessa yhä useampi kiintoainepartikkeli takertuu kiintoaineen muodostamaan verkkoon kooten lopulta kiintoainekakun suodattimen päälle. Liettekakun, joka koostuu kolloidista partikkeleista, kokoonpuristuvuus riippuu flokkausasteesta. Flokkautuneet kolloidiset partikkelit muodostavat huokoisen ja kokoonpuristuvan kakun. Flokkautuvuuden lisäksi partikkelikoko, flokkien vesipitoisuus, flokkien vahvuus ja pienten partikkeleiden osuus vaikuttavat biolietteen vedenpoistoon. (Chistensen et al., 2015)

Jadhav et al. tutkivat biolietteen vedenpoiston prosessiparametrien, kuten paineen ja suodattimen huokoskoon, vaikutuksia kakun ominaisuuksiin laboratoriomittakaavan painesuodattimella. Tutkimusten mukaan paineen noustessa yli yhden baarin suodattimen vastus oli merkityksetön verrattuna kakun vastukseen. Tällöin suodattimen huokoskoolla ei ole juurikaan

vaikutusta biolietteen suodatukseen. Mikäli suodattimen huokoskoko on hyvin suuri, kiintoainepartikkelit pääsevät vastuksettomasti kulkemaan suodattimen läpi. Hyvin pienellä huokoskokoilla saadaan aikaan usein tiheämpi kakku, kun kiintoainepartikkelit asettuvat lähelle toisiaan. (Jadhav et al., 2017)

Paineen nousu kasvattaa kakun vastusta, sillä se ajaa kiintoainepartikkelit järjestyseen uudelleen lähemmin toisiaan. Jadhav et al:n tutkimusten perusteella suodatetun kakun rakenne oli paras yhden baarin paineessa, jolloin kakkuun ei muodostunut näkyviä halkeamia. Sopiva paine kuitenkin riippuu käytössä olevasta suodattimesta.

Biolietteen suodatusta voidaan flokkaavien kemikaalien lisäksi edistää tukiaineiden avulla. Niiden tarkoituksena on parantaa kiintoainekakun huokoisuutta ja läpäisevyyttä, jolloin kakun yläpuolella oleva vesi pääsee virtaamaan paremmin kakussa olevien onkaloiden kautta. (Mowla et al., 2013) Mitä isompi tukiaineen partikkelikoko on, sitä huokoisempi kakusta tulee. Biolietteen käyttäytyminen paineenalaisena ja tukiaineiden vaikutus suodatukseen on esitetty Kuvassa 18.



Kuva 18 Biolietteen solujen käyttäytyminen paineenalaisena ja tukiaineiden käyttö suodatuksessa (muokattu lähteestä Mowla et al., 2013).

Biolietteen suodatuksessa voidaan käyttää käytännössä mitä vain tukiaineena, mutta tukiaineen käyttöä on hyvä miettiä lietteen loppusijoitusmenetelmien kannalta. Metsäteollisuudessa tukiaineina voivat hyvin toimia esimerkiksi sahanpuru ja hakerejekti. Näiden materiaalien etuina ovat, etteivät ne aiheuta ympäristöhaittoja, ja ne voivat myös lisätä lietteen lämpöarvoa. (Mowla et al., 2013) Kustannusten kannalta on edullisinta, mikäli tukiaineet voidaan hankkia samasta tuotantolaitoksesta. Vaikkei tukiaineiden avulla pystyttäisi täysin poistamaan kemikaalien tarvetta, niiden käyttöä voidaan vähentää.

## 8 TORREFIOINTI JA MÄRKÄTORREFIOINTI

Torrefiointi eli mieto pyrolyysi on biomassan termokemiallista käsittelyä, jossa raaka-aine kuivataan, jolloin sen energiatiheys kasvaa ja rakenne muuttuu. Torrefiointiprosessi tapahtuu lähellä ilmanpainetta 200–300 °C lämpötilassa hapettomassa tilassa. Tällä lämpötilan vaihteluvälillä biomassaa menettää kuitumaisen, jäykän rakenteensa, jolloin sen jauhaminen paranee huomattavasti. (Bergman & Kiel, 2005) Mitä korkeammassa lämpötilassa torrefiointi tapahtuu, sitä tummemmaksi torrefioitun hiilen väri muuttuu ja sitä haurasrakenteisempi siitä tulee. Torrefioitun hiilen energiatiheys kasvaa korkeammassa lämpötiloissa, ja raaka-aineen energiasaanto pienenee massan vähentyessä. Massan saanto vähenee 85 %:sta 240 °C lämpötilassa lähes 50 %:iin 300 °C lämpötilassa. (IEA Bioenergy, 2015) Hiilen energiasisältö on noin 70–90 % alkuperäisen biomassan energiasisällöstä (Yan et al., 2009). Yhdistämällä torrefiointi pelletöintiin saadaan parannettua biomassan logistisia ominaisuuksia (Bergman & Kiel, 2005).

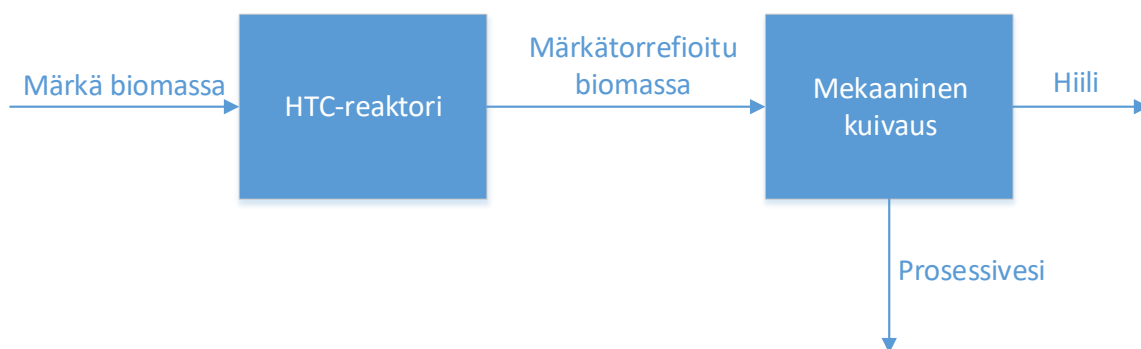
Torrefiointiprosessin raaka-aineena voi toimia laaja kirjo erilaisia biomassoja, esimerkiksi paju, pyökki ja olki. Raaka-aineesta riippumatta lopputuoteelle saavutetaan samankaltaiset ominaisuudet, sillä kaikki biomassaa rakentuu samoista polymeereistä: hemiselluloosasta, selluloosasta ja ligniinistä. Kuitenkin prosessiolosuhteet sekä massa- ja energiasaannot vaihtelevat käytettävän raaka-aineen mukaan. (Bergman & Kiel, 2005)

Märkätorrefiointi eli märkäpyrolyysi tai HTC-käsittely (*hydrothermal carbonization*, hydroterminen hiilto) on termokemiallinen menetelmä, jolla biomassaa muutetaan lämpöarvoltaan korkeammaksi tuotteeksi (Yan et al., 2010). Märkätorrefiointi on biomassan torrefiointia vesifaasissa suhteellisen matalassa lämpötilassa (180–250 °C) ja korkeassa paineessa prosessiajan ollessa muutamista tunneista useisiin päiviin. Prosessissa paine aiheutuu kaasujen muodostumisesta suljetussa tilassa ja kylläisen vesihöyryn paineesta, joka kasvaa lämpötilan noustessa. (Mäkelä et al., 2016; Roman et al., 2012) Raaka-aineen täytyy olla kokonaan upoutuneena veden alle tai muuten tuotteena muodostuu tervaa ja häkää. HTC-prosessi on yksinkertainen, suhteellisen edullinen ja tehokas tapa kasvattaa biomassan hiilipitoisuutta ja vähentää sen happipitoisuutta. (Roman et al., 2012; Yan et al., 2009) Verrattuna torrefiointiin

märkätorrefoinnin etuna on, että prosessiin syötettävän raaka-aineen kosteuspitoisuus voi olla suhteellisen korkea veden toimiessa prosessin väliaineena (Mäkelä et al., 2016).

Märkätorrefoinnin aikana biomassan komponentit muun muassa hydrolysoituvat, polymerisoituvat ja aromatisoituvat samalla kun prosessin päätuotetta hiiltä eli hydrohiiltä muodostuu (Mäkelä et al., 2016; Roman et al., 2012). Kiintoaine muodostaa noin 55–90 % alkuperäisen raaka-aineen massasta riippuen prosessiolosuhteista. Hiilen lisäksi syntyy vesiliukoisia yhdisteitä, pääasiassa monosakkarideja, furfuraalijohdannaisia ja orgaanisia happoja, kuten metaani- ja etikkahappoja, jotka aiheuttavat nestefaasin happamuuden. (Wirth et al., 2012; Yan et al., 2010) Muita nestefaasissa esiintyviä yhdisteitä ovat PAH-yhdisteet (*Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*, polysykliset aromaattiset hiilivedyt) ja ligniinistä lähtöisin olevat fenolit (Wirth et al., 2012). Vesiliukoisten yhdisteiden osuus on noin 10 % raaka-aineen massasta loppujen yhdisteistä ollessa kaasuja, pääosin hiilidioksidia. (Yan et al., 2010)

Yksinkertaistettu prosessikaavio märkätorrefoinnista on esitetty Kuvassa 19. Mekaanisen kuivauksen yhteydessä erotettua prosessivettä usein kierrätetään HTC-prosessin sisällä sen sisältäessä paljon COD (*Chemical Oxygen Demand*, kemiallinen hapenkulutus) lisääviä yhdisteitä ja TOC:ia (*Total Organic Carbon*, orgaanisen hiilen kokonaismäärä) sisältäviä yhdisteitä. COD-pitoisuus prosessivedessä on 10–40 g/L ja TOC-pitoisuus 5–20 g/L. (Wirth et al., 2012)



Kuva 19 Prosessikaavio märkätorrefoinnista.

Raaka-aineen hemiselluloosa alkaa hajota noin 180 °C lämpötilassa ligniinin ja selluloosan osittain hajotessa vasta yli 200 °C lämpötilassa (Kruse et al., 2013). Lämpötilan kasvaessa

kiintoaineen massa vähenee, polttoarvo kasvaa ja kaasujen määrä lisääntyy (Yan et al., 2010). Märkätorrefioinnissa hapen ja vedyn määrä raaka-aineessa vähenee hiilipitoisuuden kasvaessa. Tämä johtaa hydrohiilen alhaisempiin O/C- ja H/C-suhteisiin verrattuna alkuperäiseen raaka-aineeseen, jolloin tuloksena on tuotteen korkeampi energiatiheys ja lämpöarvo. (Kruse et al., 2013) Märkätorrefioidun hiilen polttoarvo voi olla 36 % korkeampi kuin alkuperäisen biomassan (Yan et al., 2010). Parantuneiden poltto-ominaisuuksien lisäksi märkätorrefioidun lietteen on myös havaittu poistavana vedestä raskasmetalleja, kuten lyijyä, kromia ja arseenia (Alatalo et al., 2013). Märkätorrefiointiprosessin on myös tutkittu vähentävän lietteiden lääkeainejäämiä, kuten muun muuassa tulehduskipulääke ibuprofeinia, epilepsian ja kaksisuuntaisen mielialahäiriön hoidossa käytettyä karbamatsepiinia ja kolesterolilääke fenofiraattia (Eyser et al., 2015).

Tärkeimmät muunneltavat parametrit prosessissa ovat prosessilämpötila, veden ja biomassan suhde sekä prosessointiaika (Roman et al., 2012). Märkätorrefioinnilla voidaan heikentää lietteen kolloidisen rakenteen sidoksia ja hajottaa solurakennetta, jolloin kyetään myös parantamaan lietteiden vedenpoisto-ominaisuuksia (Xu & Jiang, 2017).

Vertailtaessa märkätorrefiointia kuivaan torrefiointiin märkätorrefioinnilla tuotetulla hiilellä on korkeampi energiatiheys kuin kuivatorrefioinnista saadulla hiilellä. Yan et al (2009) vertailivat märkätorrefioitua ja kuivatorrefioitua loblollymäntynäytteitä. Märkätorrefiointi 260 °C lämpötilassa tuotti hiiltä, jonka lämpöarvo oli 26,5 MJ/kg ja massasaanto alkuperäisestä raaka-aineesta 57 %. Kuivatorrefioinnilla 300 °C lämpötilassa saatiin hiiltä, jonka lämpöarvo oli 23,5 MJ/kg ja massasaanto 60,5 %. Lämpöarvo kuivatulle loblollymännylle oli 19,5 MJ/kg.

## 9 LOPPUSIJOITUS

Vuodesta 2016 alkaen valtionneuvoston asetus kaatopaikoista on rajoittanut biohajoavan ja orgaanisen jätteen sijoittamista kaatopaikoille. Kaatopaikoille hyväksytään nykyisin jätettä, jossa orgaanisen aineen pitoisuus on enintään 10 %. Tämän tarkoituksena on vähentää jätteen määrää ja edistää materiaalien uudelleenkäyttöä sekä kierrätystä. (Ympäristöministeriö, 2017) Asetus estää kuivattujen lietekakkujen hävittämisen kaatopaikoille sellaisenaan, jonka vuoksi syntyvä lietejäte on pyrittävä hyödyntämään energiana tai maanparannusmateriaalina



(Liimatainen et al., 2000) Metsäteollisuudessa ja kunnallisissa puhdistamoissa lietteiden hävittämisen vaihtoehtoiksi jää polttaminen tai mädätetyn lietteen kompostointi. Vaihtoehtoisesti metsäteollisuudessa bioliete voidaan polttaa soodakattilassa yhdessä mustalipeän kanssa.

Lietteen polttamisen tarkoitus on polttaa lietteen sisältämä orgaaninen ja haihtuva aines korkeassa lämpötilassa, ja näin pienentää lietteen tilavuutta entisestään hävitystä varten, sekä saada se epäorgaaniseen ja steriiliin muotoon. Lietteen pienempi tilavuus alentaa käsittely-, kuljetus- ja varastointikustannuksia. (Liimatainen, et al., 2000) Metsäteollisuudessa lietteen poltto apukattilassa kuoren ja jätepuun kanssa on sen yleisin hävitysmuoto. Jotta lietteen polttaminen onnistuisi tasaisesti, se tarvitsee 30–50 % kuiva-ainepitoisuuden (Lohiniva et al., 2001). Lietteen osuus poltettavan materiaalin massavirrasta on tavallisesti vain 5–10 %, jolloin kuoren lisäksi ei tarvita muuta tukipolttoainetta. Kuitenkin lietemäärän lisääntyminen tulevaisuudessa vaikeuttaa sen hävittämistä edellä polttamalla. (Liimatainen et al., 2000) Muodostunut tuhka on käsiteltävä haitallisten aineiden poistamiseksi ennen jatkokäyttöä (Kangas, 2011).

Mädätetyllä lietteellä on alhaisempi lämpöarvo kuin mädättämättömällä, sillä mädätetyllä lietteellä potentiaalinen energia on vapautunut mädätyksen aikana metaaniksi (Gray, 2010). Metsäteollisuuden lietteenkäsittelyn nykytekniikalla lietteen poltosta ei juurikaan saada energiaa hyödynnettäväksi, sillä lietteen korkea kosteuspitoisuus kuluttaa runsaasti energiaa kattilassa veden höyrystyessä. (Liimatainen, et al., 2000) Lietteenpolto vaatii korkeat pääomakustannukset, jonka vuoksi yhdyskuntalietteitä ei polteta kuin suurissa kaupungeissa (Gray, 2010).

Kuorikattilassa polttamisen sijasta kemiallisessa metsäteollisuudessa vartenotettava vaihtoehto lietteenkäsittelyssä on polttaa bioliete soodakattilassa mustalipeän kanssa ja hävittää kuituliete kuorikattilassa. Biolietteen syöttöpaikka lipeälinjalle on valittava huolella, jottei prosessissa rasvahappojen ja pihkan poisto häiriinny. (Dahl, 2008) Mekaanisen vedenpoiston läpikäynyt bioliete syötetään ensin mustalipeän haihduttamolle, jossa sen vedenpoisto jatkuu. Haihduttamalla lipeänkemikaalit toimivat tehokkaina orgaanisen aineen hajottajina korkeissa lämpötiloissa. Haihdutuksen jälkeen bioliete johdetaan soodakattilaan poltettavaksi mustalipeän kanssa. Poltossa biolietteen kuiva-aineen osuus mustalipeän kuiva-aineesta on

yleensä 1–2 %. Polttamalla bioliete soodakattilassa se saadaan käytännössä kokonaan hävitettyä. Kuitulietettä ei kyetä käsittelemään haihduttamalla sen sisältämien kuitujen vuoksi. (Liimatainen et al., 2000)

Kompostoimalla voidaan jatkaa lietteen mädätystä. Kompostoinnissa eli aerobisessa käsittelyssä aerobiset bakteerit hajottavat hiilen, vedyn ja hapen hiilidioksidiksi, vedeksi ja humukseksi. (Lohiniva et al., 2001) Kompostoinnin tarkoituksena on tuottaa täysin stabiilia lietettä ja pienentää sen tilavuutta (Gray, 2010). Aerobinen hajotus on bakteerien luonnollinen hajotusmenetelmä, jota pyritään nopeuttamaan eristämällä lämpöä ja syöttämällä bakteereille riittävästi happea, vettä, hiiltä ja ravinteita. Prosessi kuluttaa paljon happea, joten lietteen kääntäminen on olennaista hajotuksen onnistumisen kannalta. (Lohiniva et al., 2001) Sekoituksen ja ilmastuksen vuoksi kompostoinnilla on korkeat energiakustannukset (Gray, 2010). Lietteen stabiloimisen jälkeen hajotustoiminta jatkuu hitaasti vielä useiden kuukausien ajan. Kompostointi sopii parhaiten vedenpoiston läpikäynneille, yli 30 % kuiva-ainepitoisuudessa oleville lietteille. Muodostunutta ravinnerikasta humusta eli kompostimultaa voidaan käyttää maanparannukseen. (Lohiniva et al., 2001)

Yhdyskuntalietteet sisältävät paljon orgaanisia yhdisteitä, ravinteita, kuten typpeä ja fosforia, ja hivenaineita, jonka vuoksi niitä voidaan hyödyntää maanparannusaineina ja lannoitteina. Lietteiden sisältö vaihtelee huomattavasti riippuen lietteenkäsittelyprosessista. Lannoitekäytössä eniten ongelmia aiheuttaa se, että merkittävä osuus typpestä ja kaliumista liukenee lietteenkäsittelyssä jäteveden mukana. Usein kaliumia onkin lisättävä, jotta lannoite olisi peltokäyttöön sopivaa. (Gray, 2010) Lietteiden korkeat raskasmetallipitoisuudet ja fosforirajoitukset voivat jossain tapauksissa estää niiden käytön lannoitteena (Lohiniva et al., 2001). Metsäteollisuuden lietteillä on myös potentiaalia toimia lannoitekäytössä, vaikka ne sisältävät vähemmän typpeä kuin yhdyskuntalietteet. Toisaalta niissä on myös vähemmän patogeeneja ja raskasmetalleja. (Liimatainen et al., 2000)

Laserkäsittelyn tarkoitus on ennen mekaanista vedenpoistoa nostaa kuivatuksen jälkeistä kuiva-ainepitoisuutta. Korkeampi kuiva-ainepitoisuus mahdollistaisi tehokkaamman lietteiden loppukäytön. Kuljetus- ja varastointikustannukset pienenisivät vedenpoiston parantuessa ja lietemäärän vähentyessä. Hävitettäessä liete polttamalla poltosta tulisi nykyistä energiatehokkaampi, eikä tukipolttoainetta välttämättä tarvittaisiin ollenkaan tai sen määrää voitaisiin

vähentää. Vapautuvan energian voisi hyödyntää lämpönä tai sähkönä tehtaan sisäisissä prosesseissa tai myydä se tehtaan ulkopuolelle. Lasertekniikka voisi vähentää lietteen patogeeneja, jolloin sitä voitaisiin aikaista tehokkaammin hyödyntää lannoitteena tai muissa sovelluskohteissa.

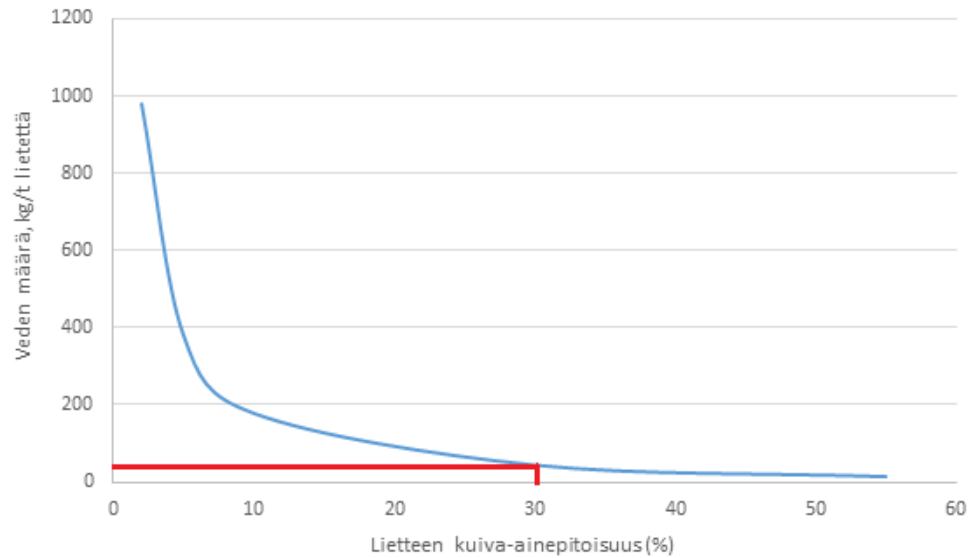
## **KOKEELLINEN OSA**

### **10 KOKEELLISEN OSAN TARKOITUS**

Työn kokeellisen osan tarkoituksena oli tutkia, pystytäänkö laserkäsittelyllä parantamaan biolietteen vedenpoistoa. Tavoitteena oli erityisesti parantaa biolietteen kuiva-ainepitoisuutta hajottamalla lasersäteellä bakteerien soluseiniä, jolloin niiden pidättelemä solunsisäinen vesi saataisiin vapautettua. Laserkäsittelyn vaikutusta vedenpoistoon tutkittiin suodatuskokeiden avulla. Suodatuksissa monitoroitiin suodattuneen veden massaa, suodatukseen kuluvaa aikaa ja suodatuksesta muodostuneiden kiintoainekakkujen kuiva-ainepitoisuuksia.

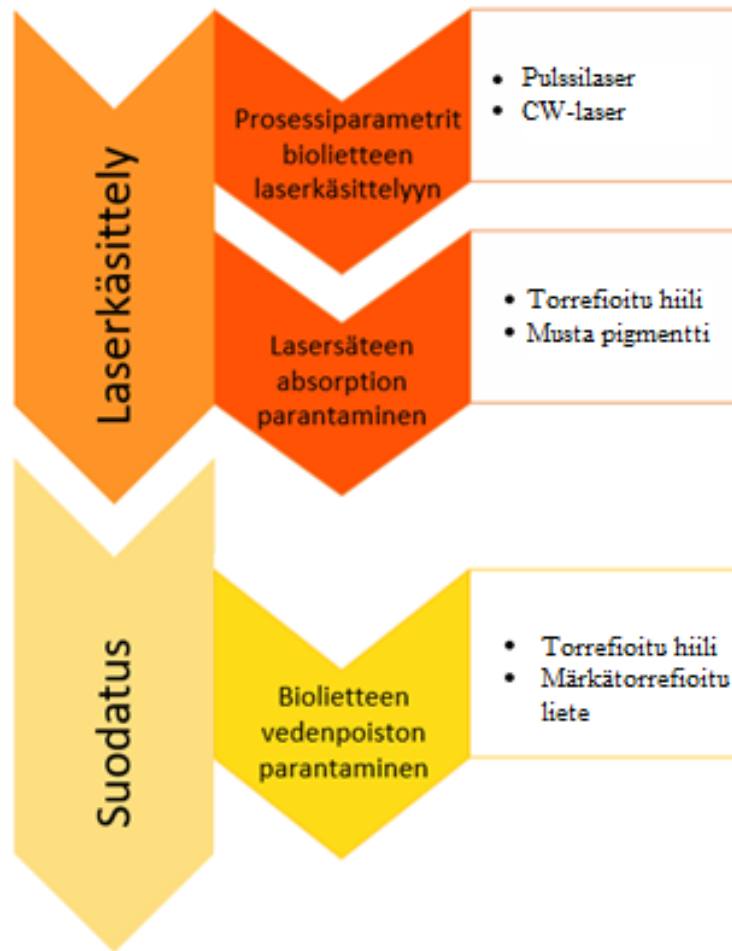
Laserkäsittelyn lisäksi tutkittiin tukiaineiden lisäämisen vaikutusta lietteiden suodatukseen. Tukiaineina käytettiin torrefioitua puuta sekä märkätorrefioituja lietteitä. Suodatuksissa kiinnitettiin huomiota lisäaineiden lisäämisen aiheuttamaan suodatusajan ja kakun kiintoainepitoisuuden muutoksiin.

Työssä tavoitteena oli nostaa biolietteen kuiva-ainepitoisuus vähintään 30 %:n kuiva-ainepitoisuuteen mekaanisen kuivatuksen jälkeen. Tällöin biolietteen tiivistyksen jälkeisestä vesimassasta (biolietteen kuiva-ainepitoisuus on noin 2–4 % tiivistimen jälkeen) huomattava määrä vettä on saatu poistettua, kuten Kuvasta 19 voidaan havaita. Tällöin biolietteen kuiva-ainepitoisuus olisi riittävän korkea polttoon, ja tukipolttoaineiden määrää voitaisiin merkittävästi vähentää tai niiden käyttö voitaisiin jopa kokonaan lopettaa.



Kuva 19 Biolietteen sisältämä vesimäärä kuiva-ainepitoisuuden funktiona. Kuvaan on merkitty punaisella viivalla työssä tavoiteltu kuiva-ainepitoisuus ja biolietteen sisältämä veden massa tässä kuiva-ainepitoisuudessa.

Kokeellinen osio sisältää lyhyen esittelyn käytetyistä koelaitteistoista ja materiaaleista sekä raportoinnin kunkin koesarjan suorittamisesta, minkä jälkeen keskitytään kokeista saatuihin tuloksiin. Kuvassa 20 on havainnollistettu koesarjojen etenemisjärjestystä diplomityössä. Ensimmäisenä työssä keskityttiin biolietteen laserkäsittelyyn, johon etsittiin optimaalisia prosessiparametreja pulssi- ja CW-laserille. Tämän jälkeen selvitettiin, voidaanko torrefioidulla hiilellä tai mustalla pigmentillä parantaa lasersäteen absorptiota biolietteeseen. Lisättäessä lisäaineita biolietteeseen havaittiin sen suodatuksen nopeutuvan huomattavasti. Sen vuoksi laserkäsittelyn lisäksi tutkittiin myös tukiaineiden käyttöä lietteiden suodatuksissa. Lietteiden vedenpoiston parantamista tutkittiin sekä torrefioidulla hiilellä että märkatorrefioiduilla seka- ja biolietteilä. Märkatorrefioidun lietteet valmistettiin märkatorrefiointilaitteella, kun taas torrefioidut hiilet saatiin valmiina.



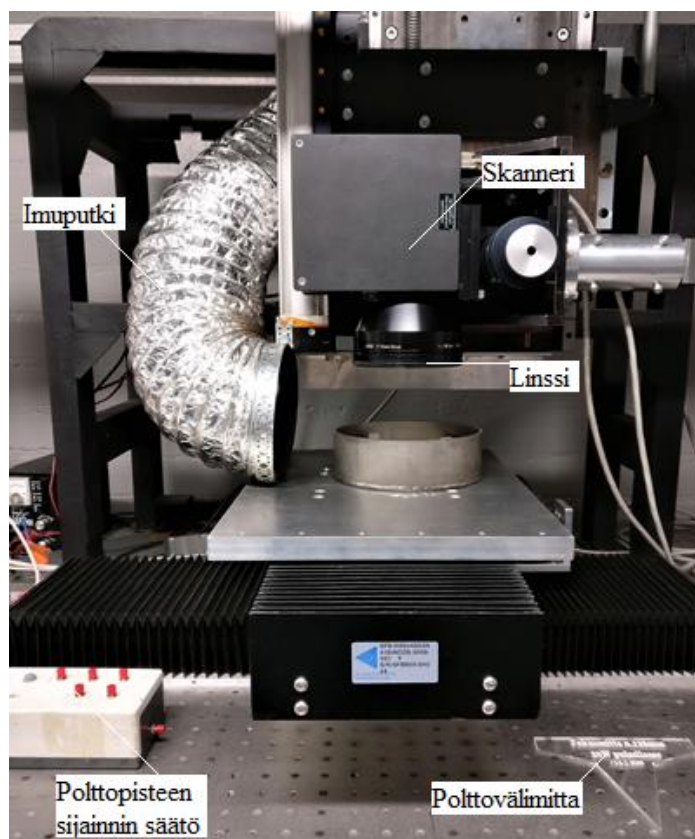
Kuva 20 Koesarjojen eteneminen diplomityössä.

## 11 KOELAITTEISTOT JA KÄYTETYT MATERIAALIT

Näytteiden laserkäsittelyyn käytettiin pulssilaseria ja jatkuvatoimista laseria. Laserkäsittelyn jälkeen näytteet suodatettiin joko alipaineeseen perustuvalla Büchner-suodattimella tai Nutsche-painesuodattimella. Büchner-suodattimella pystyttiin suodattamaan pieniä näytemääriä, kun taas Nutsche-suodattimella näytemäärät olivat suurempia, jolloin näyte täytyi käsitellä laserilla useassa eri osassa. Büchner-suodatuksen tulokset olivat enemmän suuntaa-antavia, kun taas Nutsche-suodatustulokset olivat luotettavampia ja suodatusta pystyttiin monitorimaan tarkemmin. Märkätorrefioinnit toteutettiin siihen suunnitellulla putkireaktorilla.

## 11.1 Laserit

Kokeissa käytetty pulssilaser oli IPG:n pulssitettu ytterbium-kuitulaser, jossa skannerina toimi Scanlabin Hurryscan 14 II. Pulssilaser oli kytketty tietokoneeseen parametrien säätämiseksi. Pulssilaser ja pulssilaserkokeiden kojärjestelyt ovat esitetty Kuvassa 21.



Kuva 21 Kokeissa käytetty IPG:n pulssitettu ytterbium-kuitulaser, Scanlabin Hurryscan 14 II -skanneri ja laserointikokeiden kojärjestely.

Laserkäsiteltävää biolietettä punnittiin 15–40 g:a Kuvassa 21 näkyvän pyöreän metalliastian sisällä olevaan noin 10x10 cm neliömalliseen metalliastiaan. Isompi astia toimi käsittelyssä varoastiana, mikäli sen sisällä oleva astia olisi vaurioitunut laserkäsitelyn aikana. Kokeissa biolietteen näytemäärä ja lietteen kerrospaksuus pyrittiin pitämään vähäisenä, jotta laserin vaikutus kohdistuisi koko näytemäärään eikä lietettä tarvitsisi sekoittaa laserointikertojen välissä.

SAMlight-ohjelmalla piirrettiin työstöalue ja asetettiin laserkäsitelyssä käytettävät parametrit. Tässä työssä pulssilaserin muunneltavia parametreja olivat pulssin pituus, pulssien päällekkäisyys, polttopisteen sijainti, työstönopeus ja hatch. Taajuus määräytyi työstönopeuden, overlapin ja polttopisteen halkaisijan mukaan. Pulssilaserille ominaiset parametrit ovat esitetty Taulukossa III.

Taulukko III Kokeissa käytetyn pulssilaserin parametrien arvot ja säätövarat.

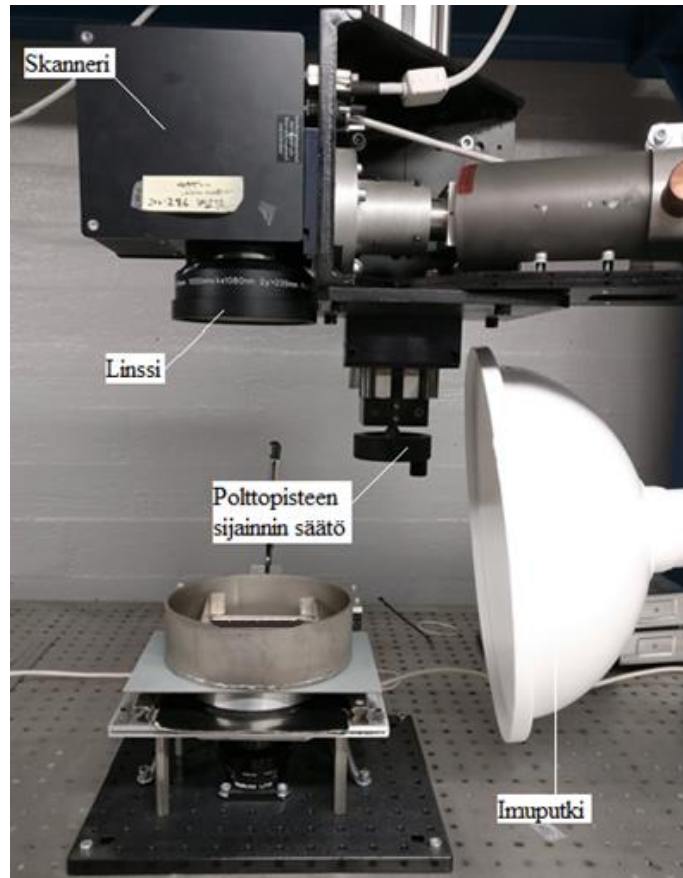
<b>Parametri</b>	<b>Arvo</b>
Teho	Max. 20 W
Pulssin pituus	4–200 ns (4, 8, 14, 20, 30, 50, 100, 200 ns)
Overlap	0–100 %
Polttopisteen sijainti	Säädettävissä 0,5 mm välein
Työstönopeus	Max. 10 000 mm/s
Pulssin taajuus	1,6–1000 kHz
Hatch	Portaaton säätö
Polttopisteen halkaisija	0,04 mm
Aallonpituus	1070 nm
Työstöalueen koko	5x5 cm

Kuvassa 21 näkyvän muovisen polttovälimitan avulla polttopisteen sijainti voitiin kohdistaa lietteen pintaan. Polttopisteen sijainti saatiin säädettyä haluttuun kohtaan muuttamalla laserin korkeutta polttopisteen sijaintia säätävästä ohjaimesta, kun tiedettiin napin yhden painalluksen muuttavan korkeutta 0,5 mm joko ylös- tai alaspäin. Laserin viereen asetetulla imuputkella saatiin poistettua lietteestä ja laserkäsitelystä muodostuvat hajuhaitat.

Koska pulssilaserin työstöalue oli käytettyä astiaa pienempi, jokaisen käsittelykerran jälkeen työstöalue kohdistettiin käsittelemättömään lietealueeseen siirtämällä astiaa. Koko astian läpikäymiseksi tarvittiin neljä käsittelykertaa laserilla.

Pulssilaserin lisäksi kokeissa käytettiin CW-laseria. Käytetty CW-laser oli YLS-200-SM-WC ytterbium-kuitulaser. Se oli kytketty tietokoneeseen parametrien säätämiseksi. Jatkuva toiminen kuitulaser ja koejärjestelyt ovat esitetty Kuvassa 22.





Kuva 22 Kokeissa käytetty jatkuvatoiminen YLS-200-SM-WC ytterbium-kuitulaser ja laserointikokeiden koearjestely.

Laserkäsiteltävää lietettä punnittiin 30–40 g:a Kuvassa 22 näkyvään neliönmalliseen astiaan. Työstöalue piirrettiin ja parametrit asetettiin SAMlight-ohjelmalla. Tässä työssä CW-laserin säädettävänä parametreina olivat teho ja työstönopeus. CW-laserin parametrit on esitetty Taulukossa IV

Taulukko IV Kokeissa käytetyn CW-laserin parametrien arvot ja säätövarat.

Parametri	Arvo
Teho	Max. 200 W
Työstönopeus	Max. 20 000 mm/s
Polttopisteen halkaisija	0,082 mm
Polttopisteen sijainti	Portaaton säätö, kokeissa pidettiin lietteen pinnassa, f 0 mm
Hatch	Portaaton säätö, kokeissa säädettiin arvoksi 0,06 mm
Aallonpituus	1070 nm
Työstöalueen koko	20x20 cm

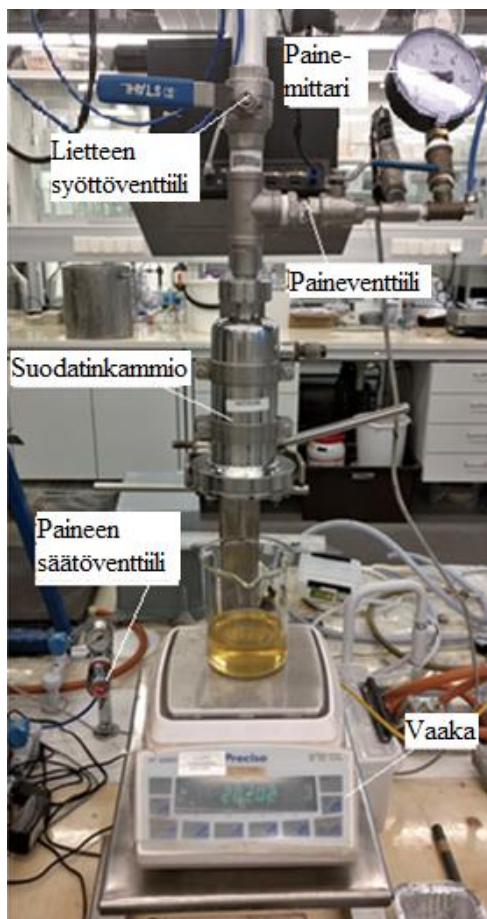
Polttopiste säädettiin Kuvassa 22 näkyvällä portaattomasti toimivalla vivulla. Polttoväliä ei voitu mitata, joten polttopiste asetettiin lietteen pintaan silmämääräisesti laserkäsittelyn aikana, kun aikaisemman kokemuksen perusteella tiedettiin plasman olevan kirkkaimmillaan polttopisteen ollessa lietteen pinnassa. CW-laserissa työstöalueen kooksi asetettiin 10x10 cm, jolloin koko astiallinen lietettä saatiin käsiteltyä laserilla yhdellä kerralla. Laserin viereen asetetulla imuputkella saatiin poistettua lietteestä ja laserkäsittelystä syntyvät hajuhaitat.

## 11.2 Suodatuslaitteistot

Büchner-suodattimella suodatettavat näytteet olivat massaltaan 20–30 g. Imupulloon luotiin alipaine vesihanasta virtaavan veden avulla. Imuletkuun hanan ja imupullon välille oli kytketty painemittari, jonka avulla seurattiin paine-eroja näytteiden välillä. Painemittarin avulla myös valvottiin mahdollisia suodatinpaperin korkkauksia, jolloin lietekakku tiivistyi suodatinpaperin päällä, ja alipaine imupullossa väheni huomattavasti. Kokeissa käytetty Büchner-suppilo oli halkaisijaltaan 45 mm. Suodatinpaperina käytettiin Whatman 113 –suodatinpaperia.

Büchner-suodatuskokeet aloitettiin punnitsemalla suodatinpaperi, jonka massa vähennettiin märän ja kuivan lietekakun massasta kuiva-ainepitoisuuksia laskettaessa Yhtälön 4 avulla, joka on esitetty luvussa 11.5. Haluttu näytemäärä punnittiin, ja vesihana avattiin alipaineen luomiseksi imupulloon. Ajanotto käynnistettiin, kun lietteen kaataminen suodattimeen aloitettiin. Kun ensimmäiset selkeät (noin 1 cm pituiset) halkeamat olivat ilmestyneet kakun pinnalle, odotettiin vielä minuutti ennen hanan sulkemista ja ajanoton pysäyttämistä. Suodatuksen päätyttyä suodoksen määrä punnittiin. Lietekakku ja suodatinpaperi kerättiin talteen ja kiintoainekakun kuiva-ainepitoisuus laskettiin luvun 11.5 osoittamalla tavalla.

Suurempien näytemäärien suodatukseen käytettiin laboratoriomittakaavan Nutsche-paine-suodatinta. Nutsche-suodatinlaitteisto ja koejärjestely ovat esitetty Kuvassa 23. Vaaka ja painelinja olivat kytkettyinä tietokoneeseen suodoksen massan ja paineen arvojen keräämiseksi suodatuksen aikana. Datan varastointiin ja käsittelyyn käytettiin National Instrumentsin LabVIEW-ohjelmaa.



Kuva 23 Nutsche-painesuodatin ja koejärjestelyt. Vaaka ja painemittari ovat kytkettyinä kiinni tietokoneeseen datan keräämiseksi.

Suodattimena käytettiin Pall corporation T1000 –suodatinta. Suodatinta kostutettiin muutama minuutti ajan vedessä ennen kuin se asetettiin reiällisen tukilevyn päälle, ja pohja kiinnitettiin suodattimeen.

Suodatuskokeissa paineenlähteenä käytettiin paineistettua typpeä. Paine asetettiin säätöventtiilistä haluttuun arvoon painemittarin ja tietokoneeseen kytketyn elektronisen mittarin avulla. Suodatuskokeissa paineenarvona käytettiin 6 bar, sillä olosuhteiden haluttiin vastata mahdollisimman paljon teollisen mittakaavan lietteiden mekaanista kuivatusta.

Lietettä punnittiin 70–150 g riippuen koesarjasta, minkä jälkeen hyvin sekoitettu lietenäyte kaadettiin suppiloa apuna käyttäen Nutsche-suodattimeen. Tiedonkeruu käynnistettiin, syöt-

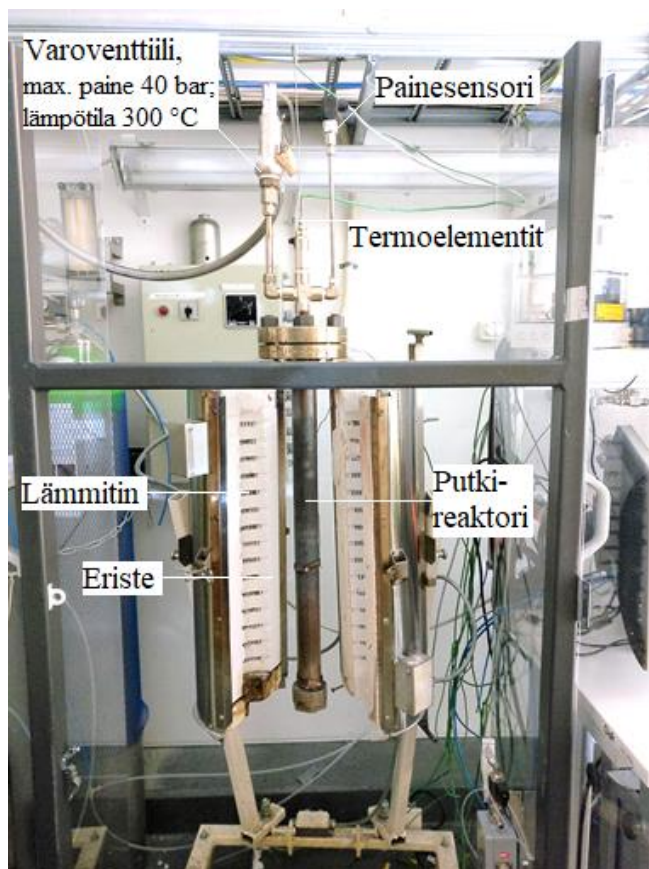
töventtiili suljettiin ja paineventtiili avattiin. Kun ensimmäiset kaasukuplat poistuivat suodattimesta, paineventtiili suljettiin, syöttöventtiili avattiin ja tiedonkeruu sammutettiin. Pohja poistettiin, ja suodatuksesta muodostunut lietekakku poistettiin huolellisesti Nutsche-paine-suodattimesta ja suodattimen pinnalta. Kiintoainekakun kuiva-ainepitoisuus määritettiin luvun 11.5 mukaisesti.

Kerätystä datasta piirrettiin lietteen vedenpoistoa esittävä kuvaaja piirtämällä dekantterilasiin kertyneen suodoksen massa ajan funktiona. Dataan ilmestyi noin 30 sekunnin välein häiriöitä, joissa suodoksen massa putosi 0 g:an. Dataa käsiteltäessä häiriölliset datapisteet poistettiin kokonaan. Suodatuksen alkupisteeksi valittiin biolietteen suodatuksessa ajankohta, jolloin paineventtiili avattiin. Tämä näkyi datassa äkillisenä paineenlaskuna. Suodatuksen alkamisajankohta asetettiin alkamaan 0 sekunnista ja suodoksen määrä asetettiin 0 grammaan suodatuksen alkamispisteessä. Bio- ja kuitulietteiden seosta suodatettaessa alkupisteeksi asetettiin ajankohta, jolloin suodosta alkoi erottua suodattimesta. Tämä ajankohta oli ennen paineventtiilin sulkemista. Kuitenkin kyseisellä tavalla piirrettyjen sekalietenäytteiden kuvaajat olivat paremmin vertailtavissa kuin piirrettäessä ensimmäiseksi esitetyllä tavalla, jolla biolietenäytteet käsiteltiin. Tämä johtui siitä, että sekalietenäytteistä alkoi erottua suodosta melkein heti, kun ne oli kaadettu suodattimeen. Tällöin vertailtavista näytteistä ehti erottumaan erisuuruinen määrä suodosta ennen paineventtiilin sulkemista. Biolietenäytteillä veden erottuminen ennen paineventtiilin sulkemista ei tapahtunut niin nopeasti.

Nutsche-suodatusten tuloksia esittelevissä taulukoissa on esitetty rinnakkaisnäytteiden keskiarvo, kun taas kuvaajiin on valittu vain yhden näytteen suodatuksen arvot, jotka edustavat rinnakkaisnäytteitä parhaiten. Nutsche-suodatusta esittelevien kuvien ja taulukoiden arvot voivat tämän sekä suodatuksen alkupisteen valinnan vuoksi hieman poiketa toisistaan.

### **11.3 Märkätorrefiointilaitteisto**

Lietteiden märkätorrefiointit suoritettiin Kuvan 24 laitteistolla. Painesensori ja termoelementit olivat kytkettyinä tietokoneeseen datan tarkastelemiseksi. Kaksi eripituista termoelementtiä oli johdettuna putkireaktorin sisälle. Lyhyempi termoelementti näytti putkireaktorin yläosan lämpötilan ja pidempi alaosan lämpötilan. Prosessilämpötila katsottiin reaktorin alaosan mukaan.



Kuva 24 Märkätorrefiointilaitteisto.

Kokeet aloitettiin kokoamalla laitteisto. Ensin alaosan tiivistävä korkki asetettiin paikalleen, minkä jälkeen laitteiston yläosa nostettiin pois lietteiden kaatamiseksi reaktoriin. Lietenäytteet olivat massaltaan 600–800 g. Yläosa kiristettiin paikoilleen, ja putkireaktoria ympäröivä eristekuori kiinnitettiin salvoilla. Reaktoria ympäröivät plexilasit suljettiin, ja datan keräys sekä reaktorin lämmitys aloitettiin. Lämpötila nostettiin portaittain haluttuun arvoon. Prosessiajan mittaus aloitettiin reaktorin saavutettua haluttu lämpötila.

Prosessiajan täytyessä putkireaktorin lämmitys sammutettiin, ja sen annettiin jäähtyä. Märkätorrefioidut lietteet poistettiin avaamalla reaktorin alaosan korkki. Lietenäytteistä erotettiin vesi suodattamalla Büchner-suodattimella. Märkätorrefiointi paransi huomattavasti kaikkien lietteiden kuiva-ainepitoisuuksia. Märkätorrefioidut lietteet kuivattiin ilmastoidussa uunissa 105 °C lämpötilassa yön yli.

Märkätorreffiointit suoritettiin kahdella biolietenäytteellä ja kahdella sekalietenäytteellä. 20 % kuiva-aineessa olevat sekalietteet sekoitettiin veteen, ja biolietteet kaadettiin reaktoriin sellaisenaan ilman vesilisäystä niiden ollessa valmiiksi alhaisessa kuiva-ainepitoisuudessa. Prosessiolosuhteet ja suodatuksen jälkeinen kuiva-ainepitoisuus ovat esitetty Taulukossa V. Prosessiaika ja –lämpötila valittiin siten, että saatiin toisistaan mahdollisimman paljon poikkeavat näytepisteet. Paineen arvo on esitetty hetkenä, jona lämpötila on saavuttanut tavoitearvonsa. Biolietenäytteillä paine muuttui noin 1–2 baarin paineen verran prosessiaikana, mutta sekalietenäytteillä paine muuttui enemmän. Sekalietenäytteen märkätorreffiointissa, joka tapahtui 200 °C lämpötilassa 3 tunnin ajan, paine nousi noin 8 bar prosessiaikana. Sekalietenäytteen märkätorreffiointissa, joka kesti 6 tuntia 240 °C lämpötilassa, tuntemattomasta syystä putkireaktorin lämmitin nosti lämpötilaansa reilun kahden tunnin prosessiajan jälkeen. Tämä sai reaktorin yläpuolen lämpötilan nousemaan 400 °C lämpötilaa, joka aiheutti varoventtiilin aukeamisen vajaan neljän tunnin prosessiajan jälkeen. Varoventtiilin aukeaminen laski ylälämpötilaa ja pudotti paineen noin 11,5 baariin. Kuitenkin koko prosessin ajan putkireaktorin alaosassa, jossa lietteen märkätorreffiointi tapahtui, lämpötila pysyi halutussa arvossa. Lisäksi tuotteena tullut märkätorreffioitu liete oli moitteettoman näköinen, minkä vuoksi koepiste sisällytettiin työhön.

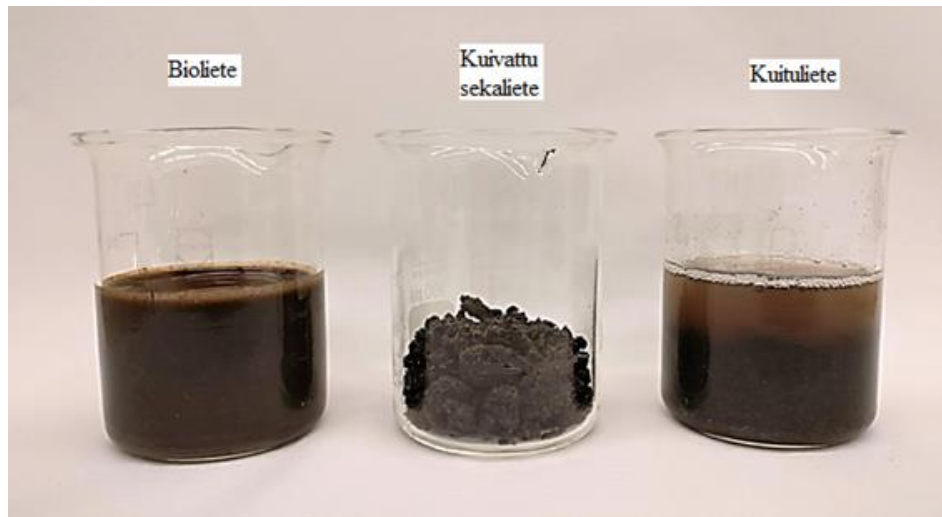
Taulukko V Sekaliete- ja biolietenäytteiden märkätorreffiointien prosessiolosuhteet.

Näyte	Lämpötila, °C	Prosessiaika, h	Biomassa:vesi-suhde	Massa, g	Paine, bar	KAP-%
<b>Sekaliete 240°C/6h</b>	240	6	1:2	600	32,2	37,7
<b>Sekaliete 200°C/3h</b>	200	3	1:2	600	14,5	21,8
<b>Bioliete 240°C/6h</b>	240	6	-	800	32,2	28,5
<b>Bioliete 200°C/3h</b>	200	3	-	800	23,5	16,5

#### 11.4 Käytetyt materiaalit

Kokeissa käytettiin biolietettä ja kuitulietettä, jotka olivat peräisin sellua ja paperia tuottavalta metsäteollisuuden tehtaalta. Bioliete- ja kuitulietenäyte olivat otettu tiivistimien jäl-

keen. Bioliete toimi pääasiallisena tutkimuskohteena kuitulietteen toimiessa suodatuksia nopeuttavana apuaineena. Elokuussa kuitulietenäytettä ei ollut mahdollista ottaa, jolloin se korvattiin mekaanisen kuivatuksen jälkeisellä sekalietenäytteellä. Nutsche-suodatuskokeissa sekaliete laimennettiin kuiva-ainepitoisuuteen 4 % vastaamaan kuitulietteen kuiva-ainepitoisuutta. Kuvassa 25 on esitetty kokeissa käytetyt lietenäytteet.

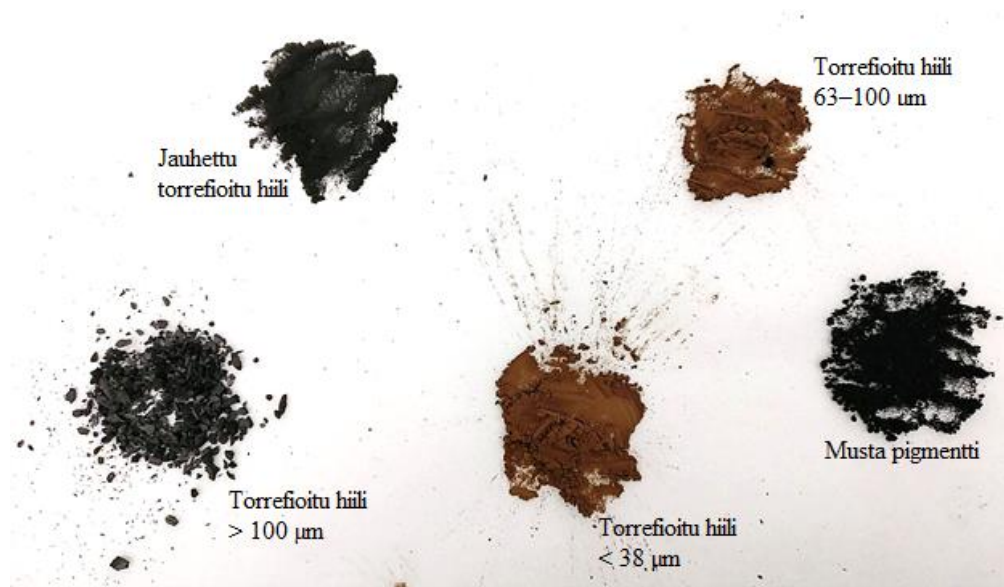


Kuva 25 Kokeellisessa osiossa käytetyt bioliete, kuivattu sekaliete ja kuituliete.

Lietenäyte-erät uusittiin noin kuukauden välein johtuen lietteiden ikääntymisistä ja biolietteen mikrobikannan muutoksista. Bio-, kuitu- ja sekalietteilistä määritettiin kuiva-ainepitoisuudet säilytysajan alku- ja loppuvaiheessa, ja ne ovat esitetty Liitteessä I. Lietenäytteitä säilytettiin kylmiössä noin 4 °C lämpötilassa. Ennen kokeiden suorittamista lietteet lämmitettiin vesihautteessa noin 18–29 °C lämpötilaan.

Lasersäteen absorption tehostamiseen käytettiin kokeissa mustaa pigmenttiä, joka oli kaupallisesti myytävää epäorgaanista pigmenttivalmistetta. Kokeissa käytettiin puuperäistä torrefioitua hiiltä. Hiilet olivat etukäteen jauhettu ja seulottu partikkelikokoihin > 100 µm, 63–100 µm ja < 38 µm. Partikkelikokoon > 100 µm jauhettu torrefioitu hiili oli väriltään tummempaa kuin muut. Siitä jauhettiin edelleen hienojakoisempaa jauhetta planeettamyllyllä (Retsch, Planetary Ball Mill PM 100). Partikkelikooltaan pienempien hiilien torrefioimisaste oli matalampi kuin suurimman hiilen, ja ne olivat väriltään ruskeita. Ruskeat torrefioidut hiilet olivat silmämääräisesti samannäköisiä. Verrattuna mustaan pigmenttiin jauhettu torrefioitu hiili

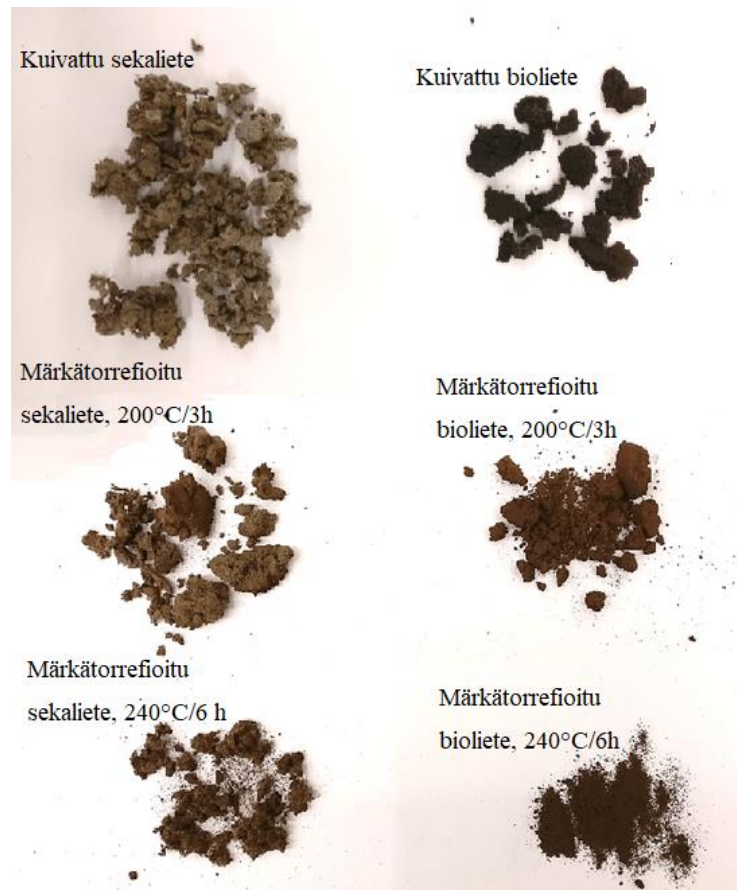
oli huomattavasti pehmeämpää. Kuvassa 26 on esitetty kokeissa käytetyt torrefioidut hiilet ja musta pigmentti.



Kuva 26 Kokeellisessa osiossa käytetyt torrefioidut hiilet ja musta pigmentti.

Kokeissa käytetyt märkatorrefioidut lietteet valmistettiin Kuvan 24 märkatorrefiointilaitteella. Kuvassa 27 on esitetty suodatuksissa käytetyt märkatorrefioidut lietteet, joita on verrattu kuivattuihin bio- ja sekalietteisiiin.





Kuva 27 Kokeissa käytetyt märkätorrefioidut seka- ja biolietenäytteet ja niiden vertailu kuivattuun seka- ja biolietteeneseen.

Kuvasta 27 nähdään, että sekä sekalietteen että biolietteen partikkelikoot pienenevät mitä pidemmälle märkätorrefiointiprosessi etenee. 240 °C lämpötilassa kuusi tuntia märkätorrefioitu bioliete oli jauhemaista. Samoissa olosuhteissa märkätorrefioitu sekaliete oli puolestaan huokoista ja kuitumaista verrattuna sekalietenäytteeseen, joka oli märkätorrefioitu alemmassa lämpötilassa lyhyemmän aikaa. Märkätorrefioitujen lietenäytteiden värinmuutos tummemmaksi prosessiajan ja –lämpötilan kasvaessa oli melko vähäistä. Kuivatun biolietteen havaitaan olevan huomattavasti tummempaa kuin märkätorrefioitujen biolietenäytteiden. Tämä todennäköisesti johtuu siitä, että märkätorrefioinnin aikana jokin biolietteen tummanvärin aiheuttava yhdiste, kuten ligniini, liukeni prosessiveteen. Märkätorrefioidut lietteet olivat rakenteeltaan melko hauraita, ja suuremmat partikkelit hajosivat helposti niitä puristettaessa.

### 11.5 Lietteiden kuiva-ainepitoisuus

Lietteiden kuiva-ainepitoisuus määritettiin jokaisesta bioliete-, kuituliete- ja sekalietenäyteerästä ja suodatuksesta saaduista kuiva-ainekakuista. Laserkäsittelyjen ja referenssinäytteiden kiintoainekakkujen kuiva-ainepitoisuuksien vertailu oli tärkein tapa selvittää laserkäsittelyn vaikutusta lietteeseen.

Lietteiden ja kiintoainekakkujen kuiva-ainemääritykset tehtiin standardiin SFS 3008 perustuen. Ennen näytemäärän punnitsemista lietenäytettä sekoitettiin huolellisesti lietteen homogenisoimiseksi. Bio- ja kuitulietteiden näytemääräksi valittiin noin 100 g. Sekalietteiden näytemäärä oli noin 60 g sen korkeamman kuiva-ainepitoisuuden vuoksi. Suodatusten kiintoainekakut otettiin näytteiksi sellaisenaan. Näytteen punnitsemisen jälkeen sitä kuivattiin ilmastoidussa lämpökaapissa 105 °C lämpötilassa vähintään 15 tuntia. Kuivattu näyte jäähdytettiin eksikaattorissa, minkä jälkeen se punnittiin. Kuiva-ainepitoisuus laskettiin Yhtälön 4 mukaisesti:

$$\text{KAP} - \% = \frac{(m_1 - m_3)}{(m_2 - m_3)} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

Jossa	KAP-%	näytteen kuiva-ainepitoisuus, %
	$m_1$	kuivatun näytteen massa, g
	$m_2$	määrän lietteen massa, g
	$m_3$	astian massa, g.

## 12 KOKEIDEN SUORITUS

Tämän luvun tarkoituksena on esitellä, kuinka eri koesarjojen kokeet suoritettiin. Laserkokeiden osalta on kerrottu parametrit, joita näytteiden laserkäsittelyssä käytettiin, sekä mahdolliset lisäainelisykset lietenäytteisiin. Suodatuksen tukiaineiden käyttö tutkivissa koesarjoissa on kerrottu lisättyjen aineiden määrät.

## 12.1 Laserparametrien vaikutukset

Ensimmäisessä koesarjassa selvitettiin, kuinka eri pulssi- ja CW-laserien parametrien arvoilla käsiteltyjen biolietenäytteiden suodatukset eroavat toisistaan. Näiden avulla pyrittiin selvittämään biolietteen käsittelyyn optimaaliset parametrit, joilla lietettä käsiteltäessä saavutettaisiin korkein kiintoainekakun kuiva-ainepitoisuus. Kokeiltavien parametrien arvot valittiin siten, että parametrien säätöalue saataisiin mahdollisimmat kattavasti tutkittua.

Tässä työssä pulssilaserin parametreista tutkittiin pulssin pituuden, overlapin, polttopisteen sijainnin, työstönopeuden ja hatchin arvojen säätämisten vaikutuksia biolietteen laserkäsitelyyn. Lukuun ottamatta tutkittavaa parametria muiden parametrien arvot pidettiin kokeissa vakioina. Pulssipituuden, joka toimi kokeiden ensimmäisenä muutettavana parametrina, arvoksi valittiin se, jolla saatiin suodatuksesta korkein kuiva-ainepitoisuus. Kokeissa käytetyt pulssilaserin parametrit ovat esitetty Liitteessä II.

Tässä työssä CW-laserin muunneltavina parametreina toimivat teho ja työstönopeus. Kokeissa polttopiste asetettiin lietteen pintaan. Kahdesta muutettavasta parametrasta ensimmäisenä testattiin tehon muutoksen vaikutusta biolietteen laserkäsitelyyn, jolloin nopeus pidettiin vakiona, 1500 mm/s. Työstönopeuden muutoksen vaikutusta tutkittaessa tehon arvoksi valittiin se, jolla saavutettiin korkein kuiva-ainepitoisuus tehon vaikutusta kartoitettaessa.

Eri parametrien arvoilla laserkäsitellyt biolietenäytteet suodatettiin Büchner-suodattimella. Sekä pulssi- että CW-laserkokeissa kullekin laserparametrin arvolle valmistettiin kaksi rinnakkaisnäytettä. Pulssilaserkokeiden ei-laserkäsitellylle referenssinäytteelle tehtiin kuusi rinnakkaista suodatusta. CW-laserkokeiden referenssinäytteelle tehtiin kolme rinnakkaista suodatusta.

Büchner-suodatuskokeista valittiin tutkittaville parametreille arvot, joilla saavutettiin suodatuksissa korkeimmat kuiva-ainepitoisuudet. Niiden arvot yhdistettiin pulssi- ja CW-lasereille omiksi parametrisetiksi, joilla biolietettä laserkäsiteltäessä toivottiin saavutettavan korkea kuiva-ainepitoisuus suodatuksen jälkeen. Näillä parametriseteillä laserkäsitellyillä biolietenäytteillä suodatukset suoritettiin Nutsche-painesuodattimella. Nutsche-suodatus tehtiin lisäksi bioliettelellä, jota laserkäsiteltiin pulssilaserilla laskennallisesti suurimmat pulssi- ja

piikkienergiat tuottavilla parametreilla. Tässä parametrisetissä pulssipituus on 50 ns sekä taajuus ja työstönopeus alhaisia. Näillä parametreilla pulssienergiaksi saatiin 0,99 mJ ja laskennalliseksi piikkienergiaksi 19,8 W. Tällä parametrisetillä biolietettä laserkäsiteltäessä lietteen pinnasta höyrystyi runsaasti vettä, ja käsittelyn jälkeen lietteen pinta oli matta haihtuneen veden vuoksi. Koska vettä haihtuu noin 20 % biolietteen massasta laserkäsittelyn aikana, laserkäsittelyyn näytteeseen oli lisättävä vettä suodatuksen mahdollistamiseksi. Laserkäsiteltävät näyte-erät punnittiin ennen ja jälkeen laserkäsittelyn, ja niihin lisättiin vettä massan muutoksen verran. Näytteiden koostumukset ovat tarkemmin esitetty Liitteessä III. Pulssi- ja CW-lasereille valitut parametrit ovat taulukoitu tulosten yhteydessä esiintyvään Taulukkoon XIII.

## **12.2 Mustan pigmentin vaikutus lasersäteen absorptioon**

Koesarjassa mustaa pigmenttiä lisättiin biolietteeseen tummentamaan sen väriä, minkä toivottiin lisäävän lasersäteen absorptiota lietteeseen. Mustaa pigmenttiä lisättiin biolietteen kuiva-aineeseen suhteessa 1:2 ennen biolietteen laserkäsittelyä. Pigmentti oli melko hydrofobista, ja tasalaatuisen seoksen aikaansaamiseksi se sekoitettiin ensin pieneen määrään biolietettä, jolloin seoksesta muodostui tahnamaista. Tämän jälkeen loput biolietteestä lisättiin seokseen.

Laserkäsittelyyn käytettiin suurimmat pulssi- ja piikkienergiat tuottavia parametreja. Referenssinäytteeseen lisättiin ennen suodatusta sama määrä mustaa pigmenttiä kuin laserkäsittelyyn biolietenäytteeseen. Laserkäsitellyn biolietteen suodatusta vertailtiin myös referenssinäytteen suodatuksen, jossa biolietteeseen ei oltu sekoitettu pigmenttiä. Näytteet suodatettiin Nutsche-suodattimella. Kutakin näytettä oli yksi kappale.

Mustan pigmentin lisäys teki lisäksi näytteiden kuiva-ainepitoisuutta ja nosti niiden viskositeettia, minkä vuoksi niitä täytyi laimentaa vedellä suodatuksen helpottamiseksi. Laserkäsittelyyn näytteeseen lisättiin enemmän vettä kuin referenssinäytteeseen laserkäsittelyn aikana haihtuneen veden vuoksi. Jotta suodatuksia voitiin vertailla keskenään luotettavasti, näytteisiin lisätyn veden määrä säädettiin siten, että näytteissä olisi kuiva-ainetta saman verran ja suodatettavien näytteiden massat olisivat yhtä suuret. Myös referenssinäytteeseen,

jossa ei ollut pigmenttiä, lisättiin vettä, jotta näytemäärä vastaisi pigmenttiä sisältävien näytteiden massoja. Liitteessä III on esitetty näytteiden tarkemmat koostumukset, näytteiden kokonaiskuiva-ainemassat ja suodatettavien näytteiden massat.

### **12.3 Torrefioidun hiilen vaikutus lasersäteen absorptioon**

Mustan pigmentin lisäksi tutkittiin myös mustan torrefioidun hiilen vaikutusta parantamaan lasersäteen absorptiota biolietteeseen. Kokeissa käytettiin mustaa torrefioitua hiiltä, jonka partikkelikoko oli  $> 100 \mu\text{m}$ , sekä siitä hienommaksi jauhattua torrefioitua hiiltä. Kumpaan hiiltä lisättiin biolietteen kuiva-aineeseen noin suhteessa 1:10 ennen lietteen laserkäsittelyä. Mustan pigmentin tapaisesti hiilet olivat melko hydrofobisia, jonka vuoksi ne sekoitettiin ensin pieneen määrään biolietettä, ja sen jälkeen loput biolietteestä lisättiin. Laserkäsittely tehtiin suurimmat pulssi- ja piikkienergiat tuottavilla parametreilla. Kummallekin torrefioidulle hiilelle valmistettiin omat referenssinäytteet, joita ei laserkäsitelty. Torrefioituja hiiliä lisättiin referensseihin sama määrä kuin laserkäsitelyihin biolietenäytteisiin.

Suodatukset tehtiin Nutsche-painesuodattimella. Kullekin näytteelle valmistettiin kaksi rinnakkaisnäytettä. Suodatuksissa käytettiin kuiva-ainepitoisuuteen 4 % laimennettua sekalietettä nopeuttamaan suodatuksia. Sekalietettä ei laserkäsitelty. Sitä lisättiin ennen suodatusta biolietenäytteeseen vastaava määrä kuin biolietettä. Sekalietteen ansiosta näytteisiin ei tarvinnut lisätä ylimääräistä vettä. Tarkemmat näytteiden koostumukset on esitetty Liitteessä III.

### **12.4 Torrefioidun hiilen vaikutus lietteen suodatuksessa**

Koesarjassa etsittiin sopivaa torrefioidun hiilen määrää ja partikkelikokoa lietteen suodatuksen tukiaineeksi. Partikkelikoon vaikutusta tutkittaessa käytettiin kolmea partikkelikooltaan erikokoista torrefioitua hiiltä:  $< 38 \mu\text{m}$ ,  $63\text{--}100 \mu\text{m}$  ja  $> 100 \mu\text{m}$ . Ensin selvitettiin torrefioidun hiilen vaikutus ei-laserkäsitellyn bio- ja kuitulietteen seokseen. Bio- ja kuitulietettä oli sekoitettu suhteessa 1:1, sillä suodatusten haluttiin jäljittelevän teollisen mittakaavan suodatuksia. Myöhemmin selvitettiin myös torrefioidun hiilen vaikutus laserkäsitellyn biolietteen suodatukseen.

Torrefioidun hiilen partikkelikoon vaikutusta sekalietteen suodatuksessa tutkittiin lisäämällä eri partikkelikokoisia torrefioituja hiiliä ei-laserkäsiteltyihin lietenäytteisiin. Torrefioitua hiiltä sekoitettiin 6 grammaa, joka vastasi suurin piirtein torrefioidun hiilen suhdetta 1:1 sekalietteen kuiva-aineeseen. Torrefioidut hiilet sekoitettiin ensin kuitulietteen joukkoon, minkä jälkeen bioliete lisättiin.

Torrefioidun hiilen määrän vaikutusta sekalietteen suodatukseen selvitettiin lisäämällä eri määrät torrefioitua hiiltä partikkelikoossa  $> 100 \mu\text{m}$  sekalietenäytteisiin. Tutkittavina torrefioidun hiilen lisäysmäärinä toimivat 2, 4 ja 6 grammaa. Torrefioitu hiili lisättiin ensin kuitulietteeeseen, minkä jälkeen biolietettä lisättiin suhteessa 1:1 kuitulietteeeseen.

Torrefioitua hiiltä sisältävien lietenäytteiden suodatusten referenssinä toimi suodatus, jossa sekalietteeseen ei ollut lisätty hiiltä. Näytteiden suodatukset tehtiin Nutsche-painesuodattimella. Kutakin näytettä oli yksi kappale.

Lisäksi selvitettiin torrefioidun hiilen eri partikkelikokojen kykyä parantaa laserkäsittelyn biolietteen suodautuvuutta. Laserkäsiteltävänä näytteenä käytettiin biolietettä, johon lisättiin mustaa pigmenttiä biolietteen kuiva-aineeseen suhteessa 1:2 ennen laserkäsittelyä. Bioliete laserkäsiteltiin suurimmat pulssi- ja piikkienergiat tuottavilla parametreilla. Ennen suodatusta kuhunkin laserkäsittelyyn biolietenäytteeseen lisättiin eri partikkelikoon omaavia torrefioituja hiiliä. Hiiltä lisättiin biolietteen kuiva-aineeseen suhteessa 1:1. Suodatustuloksia verrattiin referenssinäytteiden suodatuksiin, joissa referensseihin oli lisätty mustaa pigmenttiä ja torrefioitua hiiltä saman verran kuin laserkäsiteltyihin näytteisiin. Kaikkiin näytteisiin lisättiin vettä suodatuksen ja tulosten luotettavan vertailun mahdollistamiseksi. Tarkemmat näytteiden koostumukset ovat esitetty Liitteessä III. Suodatukset tehtiin Nutsche-painesuodattimella. Kutakin näytettä oli yksi kappale.

### **12.5 Märkatorrefioitujen lietteiden vaikutus biolietteen suodautuvuuteen**

Koesarjassa testattiin märkatorrefioitujen lietteiden vaikutusta biolietteen suodatukseen. Märkatorrefioituja lietteitä lisättiin suhteessa 1:2 biolietteen kuiva-ainetta. Näytteiden suodatusta verrattiin suodatukseen, jossa biolietteeeseen oli lisätty torrefioitua hiiltä partikkelikoossa  $> 100 \mu\text{m}$  suhteessa 1:2 biolietteen kuiva-aineeseen. Lisäksi hiililisäyksen vaikutusta

haluttiin verrata referenssiin, johon ei oltu lisätty tukiaineita. Suodatukset toteutettiin Nutsche-painesuodattimella. Kullakin näytteellä oli kaksi rinnakkaissuodatusta.

## 13 TULOKSET JA NIIDEN KÄSITTELY

Tässä luvussa esitellään edellisessä luvussa kuvattujen laboratoriokokeiden tulokset. Tulosten tarkastelu on jaettu neljään osaan: laserparametrien vaikutuksiin, lasersäteen absorption parantamiseen lisääainelisäysten avulla sekä torrefioidun hiilen ja märkätorrefioitujen lietteiden vaikutuksiin suodatuksissa.

### 13.1 Laserparametrien vaikutukset

Pulssi- ja CW-lasereiden parametrien arvojen vaikutusta biolietteeseen tutkittiin Büchner-suodatuskokeilla. Kokeiden perusteella valittiin pulssi- ja CW-lasereille optimaalisimmat parametrisetit, joilla käsiteltäessä toivottiin biolietteelle saavutettavan mahdollisimman korkea kuiva-ainepitoisuus suodatuksen jälkeen. Parametrisettien vaikutusta biolietteeseen tutkittiin Nutsche-suodatuksen avulla.

#### 13.1.1 Büchner-suodatuskokeet

Taulukoissa VI–X on esitetty pulssilaserin parametrien vaikutukset biolietteen suodatuksen aikana erottuvaan suodoksen määrään, suodatusaikaan ja kakun kiintoainepitoisuuteen. Taulukoissa on lisäksi esitelty ei-laserkäsitellyn referenssinäytteen Büchner-suodatustulokset. Taulukossa VI on esitetty valituilla pulssipituuksilla 200, 50 ja 4 ns laserkäsiteltyjen biolietteenäytteiden suodatustulokset.

Taulukko VI Pulssipituuksilla 200, 50 ja 4 ns laserkäsiteltyjen biolietteenäytteiden ja referenssin suodoksien massat, suodatusajat ja kuiva-ainepitoisuudet Büchner-suodatuksissa. Suodatetut bioliettemäärät olivat noin 20 g.

Pulssin pituus, ns	Suodoksen massa, g	Suodatusaika, s	KAP-%
200	11,8	280	10,7
50	11,2	280	10,4
4	12,9	350	11,6
Referenssi	13,1	325	10,8

Laserkokeiden aikana havaitaan, että pidemmällä pulssin pituudella plasma on voimakkaampaa kuin lyhyellä pulssin pituudella. Pulssipituudella 4 ns plasma on ohut eikä biolietettä juurikaan haihdu laserkäsittelyn aikana, kun taas pulssipituudella 200 ns plasma on kirkas ja noin 1 gramma vettä haihtuu biolietteestä laseroinnin vaikutuksesta. Taulukon VI tuloksista kuitenkin havaitaan, että pulssin pituudella 4 ns biolietettä laserkäsittäessä saavutetaan korkein kakun kiintoainepitoisuus. Lyhyillä pulssipituuksilla saavutetaan korkeampi piikkienergia, kuten Kuvassa 13 on esitetty, jolloin tuloksien perusteella biolietteen solujen hajottaminen vaatii korkean piikkienergian ja säteen korkean tehotiheyden. Pulssin pituuksilla 50 ja 200 ns käsiteltyjen biolietenäytteiden kakkujen kuiva-ainepitoisuudet ovat lähellä referenssinäytteen kakun kuiva-ainepitoisuutta. Niiden arvoilla käsitellyillä biolieteteillä suodatusajat ovat hieman nopeampia referenssiin verrattuna. Pulssipituudella 50 ns lietenäytteen suodoksen massa jää hieman muita näytteitä alhaisemmaksi, mikä havaitaan myös hieman muita näytteitä matalampana kuiva-ainepitoisuutena.

Taulukossa VII on esitetty pulssien päällekkäisyyksillä 98, 75 ja 0 % laserkäsiteltyjen biolietenäytteiden Büchner-suodatusten suodoksien massat, suodatusajat ja kakkujen kuiva-ainepitoisuudet. Laserkäsiteltyjen näytteiden suodatusta on vertailtu myös referenssinäytteen suodatukseen.

Taulukko VII Pulssien päällekkäisyyksillä 98, 75 ja 0 % laserkäsiteltyjen biolietenäytteiden ja referenssin suodoksien massat, suodatusajat ja kakkujen kuiva-ainepitoisuudet Büchner-suodatuksissa. Suodatettavat näytemäärät olivat noin 20 g.

<b>Overlap, %</b>	<b>Suodoksen massa, g</b>	<b>Suodatusaika, s</b>	<b>KAP-%</b>
98	12,5	350	11,0
75	12,9	350	11,6
0	12,5	285	10,4
Referenssi	13,1	325	10,8

Taulukosta VII nähdään, että laserkäsitelyillä biolieteteillä päällekkäiset pulssit saa aikaan korkeamman kakun kiintoainepitoisuuden kuin laserkäsitely ilman pulssien päällekkäisyyttä. Kuitenkin overlapilla 75 % saadaan korkeampi kakun kuiva-ainepitoisuus suodatuksessa kuin overlapilla 98 %. Näytteiden epähomogeenisuuden ja mittaustarkkuuden lisäksi tämä voi johtua siitä, että liiallinen pulssien päällekkäisyys hajottaa lieteflokki liian pieniksi heikentäen biolietteen suodatusta.

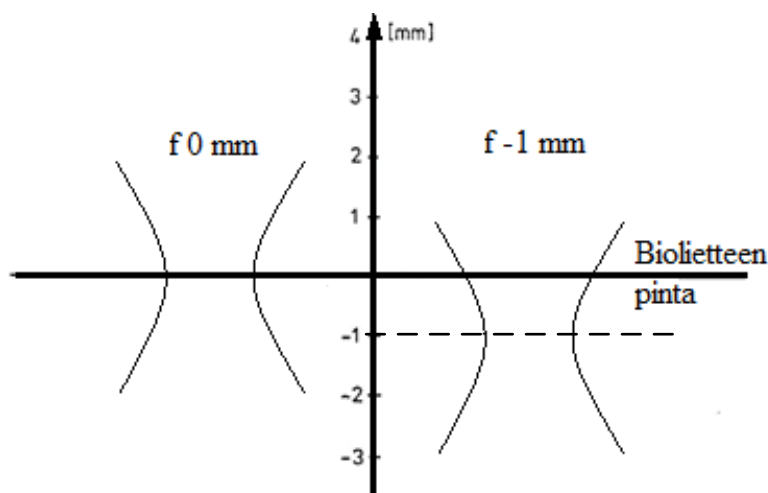


Taulukossa VIII on esitetty polttopisteen sijainneilla 0, -1 ja -2 mm laserkäsitellyn biolietenäytteiden Büchner-suodatuksen tulokset. Taulukossa lisäksi referenssinäytteen suodatustulokset.

Taulukko VIII Pulssilaserin polttopisteen sijainneilla 0, -1 ja -2 mm laserkäsiteltyjen biolietenäytteiden ja referenssin suodoksien massat, suodatusajat ja kakkujen kuiva-ainepitoisuudet Büchner-suodatuksissa. Suodatettavien biolietenäytteiden massat olivat noin 20 g.

<b>Polttopisteen sijainti, mm</b>	<b>Suodoksen massa, g</b>	<b>Suodatusaika, s</b>	<b>KAP-%</b>
0	12,9	350	11,6
-1	12,5	275	10,7
-2	12,4	325	11,0
Referenssi	13,1	325	10,8

Laserkokeiden aikana havaitaan, että polttopisteen sijainnilla on suuri vaikutus plasmanmuodostumiseen. Plasma on kirkkaimmillaan polttopisteen kohdistuessa biolietteen pintaan, mutta se on kuitenkin nähtävissä polttopisteen ollessa 2 mm pinnan alapuolella. Taulukosta VIII havaitaan, että lasersäteen on oltava kohdistettuna biolietteen pintaan, jotta kiintoainekakun kuiva-ainepitoisuus paranisi referenssiin verrattuna. Polttopisteen ollessa kohdistettuna pintaan säteellä on pinnassa korkea tehotiheys eli sen teho pinta-alayksikköä kohti on suuri. Kun polttopiste on kohdistettu lietteen pinnan alapuolelle, säde mahdollisesti absorboituu vain lietteen pintaan johtuen biolietteen ominaisuuksista (esimerkiksi sen tummasta väristä), jolloin lasersäteen tehotiheys on biolietteen pinnassa matala. Kokeissa käytetystä pulssilaserista ei ollut mahdollista saada sädeanalyysia, eli säteen muotoa sekä sen speksejä, ja siten polttopisteen sijainnin vaikutusta ei pystytty täysin varmistamaan. Kuvassa 28 on selvennetty polttopisteen vaikutusta säteen tehotiheyteen.



Kuva 28 Polttopisteen sijainnin vaikutus lasersäteen tehotiheyteen. Vasemman puoleisen säteen ( $f 0 \text{ mm}$ ) polttopiste on kohdistettu biolietteen pintaan, jolloin säteellä on lietteen pinnassa korkea tehotiheys. Oikean puoleisen säteen ( $f -1 \text{ mm}$ ) polttopiste on kohdistettu 1 mm lietteen pinnan alapuolelle, jolloin tehotiheys lietteen pinnassa on alhainen.

Taulukossa IX on esitetty pulssilaserin työstönopeuksilla 2800, 1400, 700 ja 350 mm/s laserkäsiteltyjen bioliettenäytteiden suodatustulokset. Taulukossa on lisäksi esitetty ei-laserkäsitellyn biolietteen suodatus.

Taulukko XI Työstönopeuksilla 2800, 1400, 700 ja 350 mm/s laserkäsiteltyjen bioliettenäytteiden ja referenssin suodoksien massat, suodatusajat ja kakkujen kiintoainepitoisuudet Büchner-suodatuksissa. Suodatettujen biolietteenäytteiden määrät olivat noin 20 g.

Työstönopeus, mm/s	Suodoksen massa, g	Suodatusaika, s	KAP-%
2800	12,7	360	11,5
1400	12,9	350	11,6
700	11,9	345	10,6
350	11,5	330	10,3
Referenssi	13,1	325	10,8

Mitä hitaammalla nopeudella lasersäde työstää materiaalia, sitä selkeämmin yksittäiset pulssit erottuvat ja sitä enemmän vettä haihtuu biolietteen pinnalta. Työstönopeudella 2800 mm/s lietteen pinnalta haihtuu noin 0,5 g vettä, kun työstönopeudella 350 mm/s vettä haihtuu 1,2 g. Taulukosta VIII nähdään, että suurilla työstönopeuksilla biolietettä laserkäsiteltäessä saavutetaan hieman kuivempi lietekakku suodatuksen jälkeen kuin pienillä työstönopeuksilla

käsiteltäessä. Korkein kuiva-ainepitoisuus saadaan nopeudella 1400 mm/s. Syitä sille, miksi nopeammilla työstönopeuksilla biolietettä laserkäsiteltäessä saavutetaan korkeampi kuiva-ainepitoisuus kuin hitailla työstönopeuksilla käsiteltäessä, on vaikea löytää. Hitaammilla nopeuksilla biolietettä työstettäessä vettä haihtuu käsittelyn aikana enemmän, mikä on nähtävissä pienempinä suodoksen massoina. Laserkäsittely sovelluksen kannalta korkeat työstönopeudet olisivat edullisia biolietteen käsittelyajan lyhentyessä. Prosessointiaika riippuu työstönopeuden lisäksi myös hatchin suuruudesta.

Taulukossa X on esitetty hatcheilla 0,03 ja 0,01 mm laserkäsiteltyjen biolietenäytteiden suodatustulokset. Laserkäsiteltyjen biolietteiden suodatuksia on verrattu referenssinäytteen suodatukseen.

Taulukko X Pulssilaserin hatcheilla 0,03 ja 0,01 mm laserkäsiteltyjen biolietteiden ja referenssin suodoksien massat, suodatusajat ja kuiva-ainepitoisuudet Büchner-suodatuksissa. Suodatettavat näytemäärät olivat noin 20 g.

<b>Hatch, mm</b>	<b>Suodoksen massa, g</b>	<b>Suodatusaika, s</b>	<b>KAP-%</b>
0,03	12,9	350	11,6
0,01	12,0	345	10,6
Referenssi	13,1	325	10,8

Taulukosta X havaitaan, että suuremmalla hatchilla 0,03 mm laserkäsitellylle biolietteelle saadaan korkeampi kakun kuiva-ainepitoisuus kuin hatchilla 0,01 mm. Tämä vastaa overlapilla 98 ja 75 % käsiteltyjen biolietenäytteiden suodatustuloksia, joissa overlapilla 75 % saavutettiin korkeampi lietekakun kuiva-ainepitoisuus kuin overlapilla 98 %. Pulssien ollessa huomattavasti päällekkäin myös pystysuunnassa hatchilla 0,01 mm lietekakun kuiva-ainepitoisuus asettuu lähelle referenssinäytteen kuiva-ainepitoisuutta.

CW-laserin muunneltavina parametreina toimivat teho ja työstönopeus. Taulukossa XI on esitetty tehon arvoilla 200, 150, 75 ja 20 W laserkäsiteltyjen biolietenäytteiden ja referenssin suodatustulokset.

Taulukko XI CW-laserin tehoilla 200, 150, 75 ja 20 W laserkäsitelyjen biolietenäytteiden suodoksien massat, suodatusajat ja kakkujen kiintoainepitoisuudet Büchner-suodatuksissa. Suodatettavat biolietenäytemäärät olivat noin 23 g.

<b>Teho, W</b>	<b>Suodoksen massa, g</b>	<b>Suodatusaika, s</b>	<b>KAP-%</b>
200	13,9	553	10,8
150	13,7	505	10,9
75	14,3	525	11,4
20	13,9	505	10,8
Referenssi	14,1	530	10,9

Taulukosta XI nähdään, että tehon arvolla 75 W biolietettä laserkäsiteltäessä saavutetaan suodatuksessa korkeampi kakun kuiva-ainepitoisuus kuin muilla tehon arvoilla käsiteltäessä. Tehon arvolla 75 W käsitellyn biolietteen vedenpoistoa voidaan pitää tehokkaimpana, sillä näytteestä erottuu enemmän suodosta kuin muista biolietenäytteistä. Muilla tehon arvoilla laserkäsitelyjen biolietenäytteiden suodatustulokset vastaavat pitkälti referenssinäytteen tuloksia.

Työstönopeutta tutkittaessa tehon arvoksi valittiin 75 W, jolla laserkäsiteltäessä saavutettiin korkein lietekakun kiintoainepitoisuus edellisistä kokeista. Taulukossa XII on esitetty työstönopeuksilla 3000, 1500, 1000 ja 500 mm/s laserkäsitelyjen biolietenäytteiden ja referenssinäytteen suodatustulokset.

Taulukko XII CW-laserin työstönopeuksilla 3000, 1500, 1000 ja 500 mm/s laserkäsitelyjen biolietenäytteiden suodoksien massat, suodatusajat ja kuiva-ainepitoisuudet Büchner-suodatuksissa. Suodatettavat näytemäärät olivat noin 23 g.

<b>Työstönopeus, mm/s</b>	<b>Suodoksen massa, g</b>	<b>Suodatusaika, s</b>	<b>KAP-%</b>
3000	14,1	560	10,7
1500	14,4	570	11,5
1000	13,9	590	10,8
500	13,8	635	10,7
Referenssi	14,1	530	10,9

Taulukosta XII havaitaan, että työstönopeudella 1500 mm/s biolietettä laserkäsiteltäessä saavutetaan suodatuksessa korkein kiintoainepitoisuus. Muilla parametrien arvoilla biolietettä käsiteltäessä kakkujen kuiva-ainepitoisuudet jäävät hyvin lähelle referenssinäytteen kuiva-ainepitoisuutta. Työstönopeudella 500 mm/s laserkäsitellyllä biolietteellä suodatusaika on muita näytteitä selkeästi pidempi.

Pulssi- ja CW-lasereilla tehtyjen kokeiden tuloksista voidaan kerätä parametrien arvot, joilla saavutetaan suodatuksissa korkeimmat kuiva-ainepitoisuudet. CW-laserilla käsiteltäessä optimaalisimmat parametrit biolietteen kuiva-ainepitoisuuden kannalta ovat teho 75 W ja työstönopeus 1500 mm/s. Pulssilaserin parhaat parametrit on kerätty Taulukoon XIII. Lisäksi jatkokokeissa käytettäväksi valittiin parametrisetti, jolla saavutetaan laskennallisesti suurimmat pulssi- ja piikkienergiat. Parametrisetin arvot ovat myös esitetty Taulukossa XIII. Jatkossa viitattaessa taulukoissa ja kuvissa pulssilaserille valittuihin parametreihin käytetään nimiä ”pulssilaser 4 ns” ja ”pulssilaser 50 ns”.

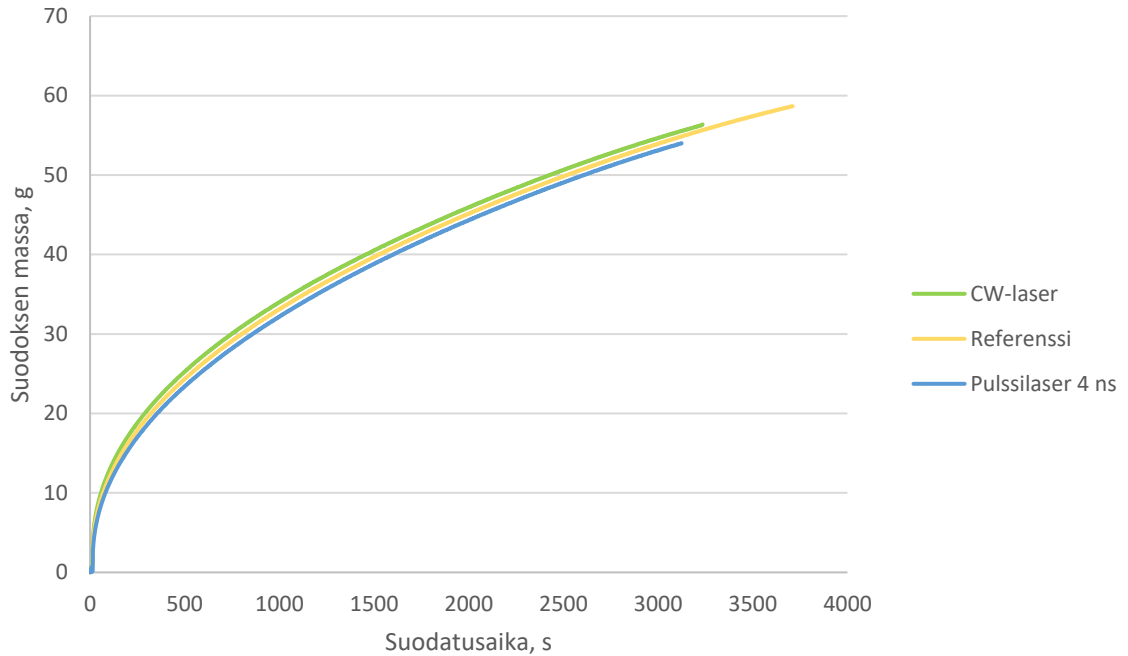
Taulukko XIII Jatkokokeissa käytettäväksi valitut pulssilaserin parametrisetit.

<b>Pulssipituus, ns</b>	<b>Overlap, %</b>	<b>Polttopisteen sijainti, mm</b>	<b>Taajuus, kHz</b>	<b>Työstönopeus, mm/s</b>	<b>Hatch, mm</b>
4	75	0	105	1400	0,03
50	50	0	20	400	0,03

### 13.1.2 Nutsche-suodatuskokeet

Yksittäisten laserin parametrien optimoinnissa suodatuskokeet suoritettiin Büchner-suodattimella. Valittujen parametrisettien vertailemiseksi toisiinsa ja käsittelemättömään biolietteen (referenssiin) niiden arvoilla laserkäsitellyt biolietenäytteet suodatettiin Nutsche-suodattimella.

Büchner-koetuloksista kerätyillä CW-laserin ja pulssilaserin arvoilla laserkäsiteltyjen biolietteiden suodatusten etenemistä on vertailtu referenssinäytteen suodatukseen Kuvassa 29. Taulukossa XIV on taulukoitu CW- ja pulssilasereilla käsiteltyjen biolietenäytteiden ja referenssin Nutsche-suodatuksessa kertyneiden suodosten massat, suodatukseen kuluneet ajat ja kiintoainekakkujen kuiva-ainepitoisuudet suodatusten jälkeen.



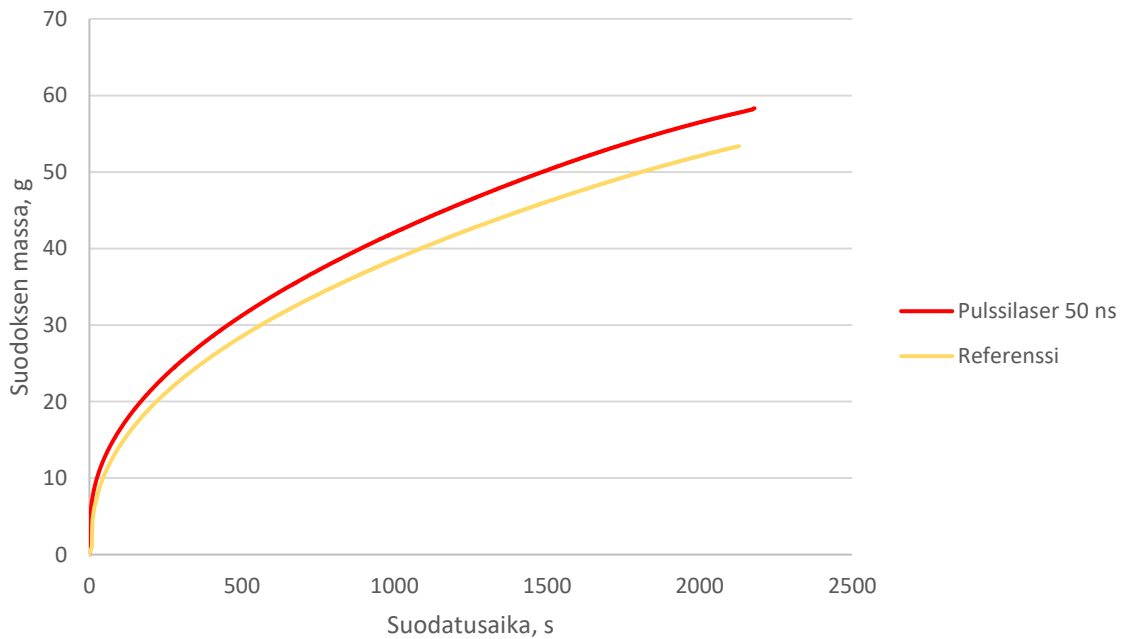
Kuva 29 CW-laserin ja pulssilaserin parhailla arvoilla laserkäsiteltyjen biolietteiden Nutsche-suodatukset verrattuna referenssinäytteen suodatukseen. Suodatuspaine oli 6 bar ja näytemäärät noin 100 g.

Taulukko XIV CW-laserin ja pulssilaserin parhailla arvoilla laserkäsiteltyjen biolietteiden sekä referenssinäytteen suodoksien massat, suodatusajat ja kuiva-ainepitoisuudet Nutsche-suodatuksissa. Suodatuksessa paine 6 bar ja näytemäärät noin 100 g.

Näyte	Suodoksen massa, g	Suodatusaika, s	KAP-%
CW-laser	56,4	3240	9,8
Referenssi	58,7	3700	10,3
Pulssilaser 4 ns	54	3120	9,8

Kuvasta 29 ja Taulukosta XIV nähdään, että CW- ja pulssilaserkäsiteltyjen biolietteenäytteiden suodatukset eivät suuresti eroa referenssinäytteen suodatuksesta. Referenssinäytteellä suodosta kertyy hieman enemmän kuin laserkäsitellyillä näytteillä suodatuksen kestäessä vajaan kymmenen minuuttia laserkäsiteltyjen näytteiden suodatusta pidempään. Tämä voi johtua siitä, että laserkäsitelyjen aikana näytteistä haihtui hieman vettä. Kiintoainekakkujen kuiva-ainepitoisuudet ovat kaikilla näytteillä lähellä toisiaan. Tuloksista voidaan päätellä, että laserkäsiteltäessä biolietettä kyseisillä parametrien arvoilla biolietteen suodatusta ei saada merkittävästi nopeutettua tai suodatuksen jälkeistä kuiva-ainepitoisuutta kohotettua.

Suurimmat piikki- ja pulssienergiat tuottavilla parametreilla laserkäsitellyn biolietteen suodatustuloksia ei kyetty suoraan vertailemaan CW-laserin ja pulssilaserin parhailla arvoilla käsiteltyjen biolietenäytteiden suodatustuloksiin, sillä kokeet olivat suoritettu noin kuukauden päässä toisistaan, jolloin tuloksien vertailu ei olisi ollut luotettavaa. Kuvassa 30 on esitetty suurimmat piikki- ja pulssienergiat tuottavilla parametreilla laserkäsitellyn biolietteen Nutsche-suodatuksen eteneminen verrattuna referenssinäytteen suodatukseseen. Taulukossa XV on taulukoitu näytteiden suodatuksista kertyneiden suodosten määrät, suodatusajat ja kakkujen kiintoainepitoisuudet.



Kuva 30 Laskennallisesti suurimmat piikki- ja pulssienergiat tuottavilla arvoilla laserkäsitellyn biolietenäytteen (Pulssilaser 50 ns) Nutsche-suodatus verrattuna referenssinäytteen suodatukseseen. Laserkäsitelyyn näytteeseen lisättiin vettä noin 14 g. Suodatuspaine oli 6 bar ja näytemäärät noin 95 g.

Taulukko XV Laskennallisesti suurimmat piikki- ja pulssienergiat tuottavilla arvoilla laserkäsittelyn biolietenäytteen (Pulssilaser 50 ns) ja referenssinäytteen Nutsche-suodatuksissa kertyneiden suodosten massat, suodatusajat ja kakkujen kuiva-ainepitoisuudet. Laserkäsiteltyyn näytteeseen lisättiin vettä noin 14 g. Suodatuksessa paine oli 6 bar ja näytemäärät noin 95 g.

Näyte	Suodoksen massa, g	Suodatusaika, s	KAP-%
Pulssilaser 50 ns	58,3	2180	10,4
Referenssi	53,4	2130	9,8

Kuvasta 30 ja Taulukosta XV havaitaan, että laserkäsiteltäessä biolietettä suurimmat pulssi- ja piikkienergiat tuottavilla arvoilla sen vedenpoisto hieman tehostuu verrattuna referenssinäytteeseen. Kuvan 30 Nutsche-suodatuksia esittävistä kuvaajista nähdään, että laserkäsitellyllä biolietteellä suodosta kerääntyy joka ajanhetki enemmän kuin referenssinäytteellä. Taulukosta XV todetaan lopussa erottuneen suodoksen määrän olevan laserkäsitellyllä biolietteellä noin 10 % enemmän kuin käsittelemättömällä biolietenäytteellä. Laserkäsitellyllä näytteellä lietekakun kuiva-ainepitoisuus on myös hieman korkeampi kuin referenssinäytteellä. Parametrisetin tehokkuus biolietteen laserkäsittelyyn voi perustua sen matalaan taajuuteen. Tällöin laserkäsittely hajottaisi lieteflokkeja ultraäänikäsittelyn tavoin.

### 13.2 Lasersäteen absorption tehostaminen

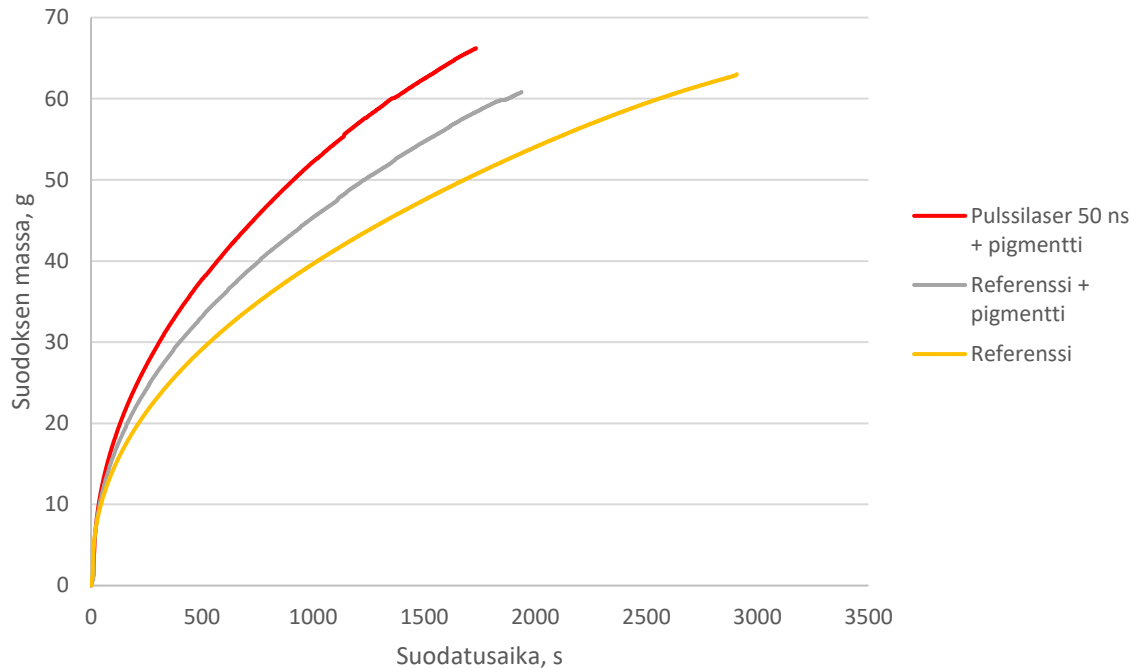
Edellä käsitellyistä tuloksista havaitaan, että käsiteltäessä biolietettä laserilla sen vedenpoisto ja lietekakun kuiva-ainepitoisuus pysyvät samalla tasolla tai paranee hieman verrattuna käsittelemättömään biolietteeseen. Jotta saataisiin merkittävämpi ero laserkäsittelyn ja referenssinäytteen välille, lasersäteen absorptiota kokeiltiin parantaa lisäämällä biolietteen sekaan mustaa pigmenttiä ja torrefioitua hiiltä ennen näytteen laserkäsittelyä.

#### 13.2.1 Musta pigmentin vaikutus lasersäteen absorptioon

Laserkäsittelyn biolietteen suodatusta verrattiin kahden referenssinäytteen suodatuksiin, joissa toiseen oli lisätty vastaava määrä mustaa pigmenttiä kuin laserkäsiteltyyn biolietteeseen (Referenssi + pigmentti) ja toisessa näytteessä ei ollut pigmenttilisäystä (Referenssi). Kaikkien kolmen biolietenäytteen Nutsche-suodatukset on esitetty Kuvassa 31. Taulukossa



XVI on esitetty suodatuksesta kertyneiden suodosten massat, suodatusajat ja kakkujen kiintoainepitoisuudet.



Kuva 31

Mustan pigmentin vaikutus lasersäteen absorptioon biolietteen laserkäsiteltyssä. Bioliete laserkäsiteltiin suurimmat piikki- ja pulssienergiat tuottavilla parametreilla. Mustaa pigmenttiä lisättiin biolietteen kuiva-aineeseen suhteessa 1:2 ennen lietteen laserkäsitelyä. Laserkäsitellyn biolietteen Nutsche-suodatusta vertailtiin ei-laserkäsitellyn biolietteen suodatukseen ja referenssinäytteen suodatukseen, jossa siihen oli ennen suodatusta lisätty mustaa pigmenttiä vastaava määrä kuin laserkäsiteltyyn biolietteeseen. Laserkäsiteltyyn näytteeseen lisättiin vettä noin 26 g, referenssi + pigmentti -näytteeseen 10 g ja referenssiin 7 g. Suodatuksissa paine oli 6 bar ja näytemäärät olivat noin 110 g.

Taulukko XVI

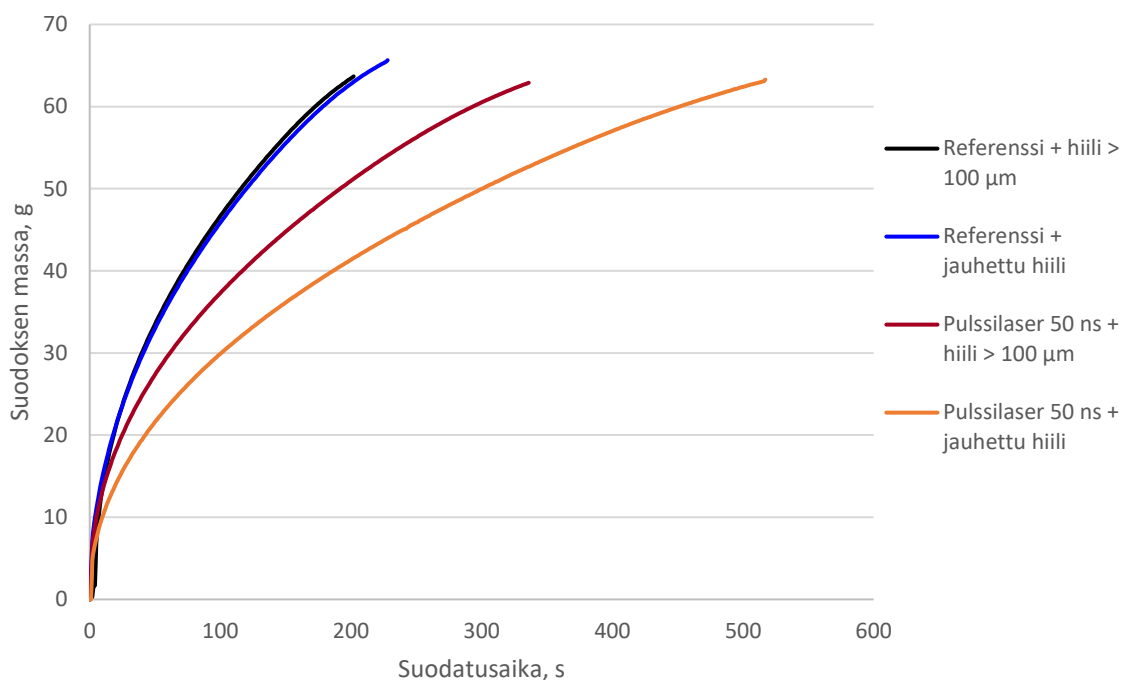
Mustan pigmentin vaikutus lasersäteen absorptioon biolietteen laserkäsittelyssä. Bioliete laserkäsiteltiin suurimmat piikki- ja pulssienergiat tuottavilla parametreilla. Mustaa pigmenttiä lisättiin biolietteen kuiva-aineeseen suhteessa 1:2 ennen biolietteen laserkäsittelyä. Näytteen suodoksen massaa, suodatusaikaa ja kakun kuiva-ainepitoisuutta verrattiin referenssiin ja saman määrän mustaa pigmenttiä sisältävään referenssiin. Laserkäsiteltyyn näytteeseen lisättiin vettä noin 26 g, referenssi + pigmentti -näytteeseen 10 g ja referenssiin 7 g. Paine suodatuksissa oli 6 bar ja näytemäärät noin 110 g.

Näyte	Suodoksen massa, g	Suodatusaika, s	KAP-%
Pulssilaser 50 ns + pigmentti	66,2	1730	14,8
Referenssi + pigmentti	60,8	1940	13,0
Referenssi	63,0	2910	10,3

Kuvasta 31 nähdään, että mustan pigmentin lisäys biolietteeeseen ennen laserkäsittelyä nopeuttaa suodatusta huomattavasti etenkin verrattuna käsittelemättömään biolietteeeseen, jossa ei ole pigmenttiä. Pigmentin lisäys käsittelemättömään biolietteeeseen parantaa lietteen vedenpoistoa, sillä pigmentti toimii suodatuksessa tukiaineena. Kun Taulukosta XVI verrataan referenssinäytteitä ilman mustaa pigmenttiä ja sen kanssa, nähdään pigmentin vaikutus suodatukseen. Suodatusaika lyhenee noin 30 % lisättäessä pigmenttiä biolietteeeseen. Lisäksi kiintoainekakun kuiva-ainepitoisuus parantuu huomattavasti johtuen lisääntyneestä kuiva-ainemäärästä kakussa. Verrattaessa laserkäsiteltyä biolietettä ja referenssinäytettä, johon on lisätty mustaa pigmenttiä, havaitaan laserkäsittelyn vaikutus biolietteeeseen. Suodatusaika lyhenee noin 11 % ja biolietteen kuiva-ainepitoisuus nousee noin 14 %. Kun laserkäsiteltyä näytettä taas verrataan käsittelemättömään biolietenäytteeseen ilman pigmenttilisäystä, havaitaan selkeää suodatusajan lyhenemistä ja kiintoainekakun kuiva-ainepitoisuuden kasvua. Kuiva-ainepitoisuus nousee noin 44 %, ja suodatusaika lyhenee noin 41 %.

### 13.2.2 Torrefioidun hiilen vaikutus lasersäteen absorptioon

Torrefioidun hiilen vaikutusta lasersäteen absorptioon selvitettiin lisäämällä partikkelikooltaan > 100 µm mustaa torrefioitua hiiltä ja siitä jauhettua hiiltä biolietenäytteisiin ennen laserkäsittelyä. Laserkäsiteltyjen biolietenäytteiden ja referenssinäytteiden Nutsche-suodatukset ovat esitetty Kuvassa 32. Taulukossa XVII on esitetty laserkäsiteltyjen biolietenäytteiden ja referenssinäytteiden suodatuksista kerätyt tulokset.



Kuva 32 Mustien torrefioitujen hiilien (> 100 µm ja jauhettu) vaikutus lasersäteen absorptioon biolietteen laserkäsittelyssä. Torrefioituja hiiliä lisättiin biolietteen kuiva-aineeseen suhteessa 1:10. Näytteet laserkäsiteltiin suurimmat piikki- ja pulssienergiat antavilla parametreilla. Laserkäsiteltyjen näytteiden Nutsche-suodatustuloksia vertailtiin referenssinäytteisiin, joihin oli lisätty samat määrät torrefioituja hiiliä. Ennen näytteiden suodattamista kaikkiin näytteisiin lisättiin kuitulietettä suhteessa 1:1 biolietteeeseen. Suodatuksissa paine oli 6 bar ja näytemäärät noin 100 g.

Taulukko XVII Mustien torrefioitujen hiilien (> 100 µm ja jauhettu) vaikutus lasersäteen absorptioon biolietteen laserkäsittelyssä. Bioliete laserkäsiteltiin suurimmat piikki- ja pulssienergiat tuottavilla parametreilla. Torrefioituja hiiliä lisättiin biolietteen kuiva-aineeseen suhteessa 1:10. Näytteiden suodoksien massoja, suodatusaikoja ja kakkujen KAP-%:a verrattiin referenssinäytteisiin, joihin oli lisätty saman verran torrefioituja hiiliä. Ennen näytteiden suodattamista niihin lisättiin kuitulietettä suhteessa 1:1 biolietteeeseen. Paine suodatuksissa oli 6 bar ja näytemäärät noin 100 g.

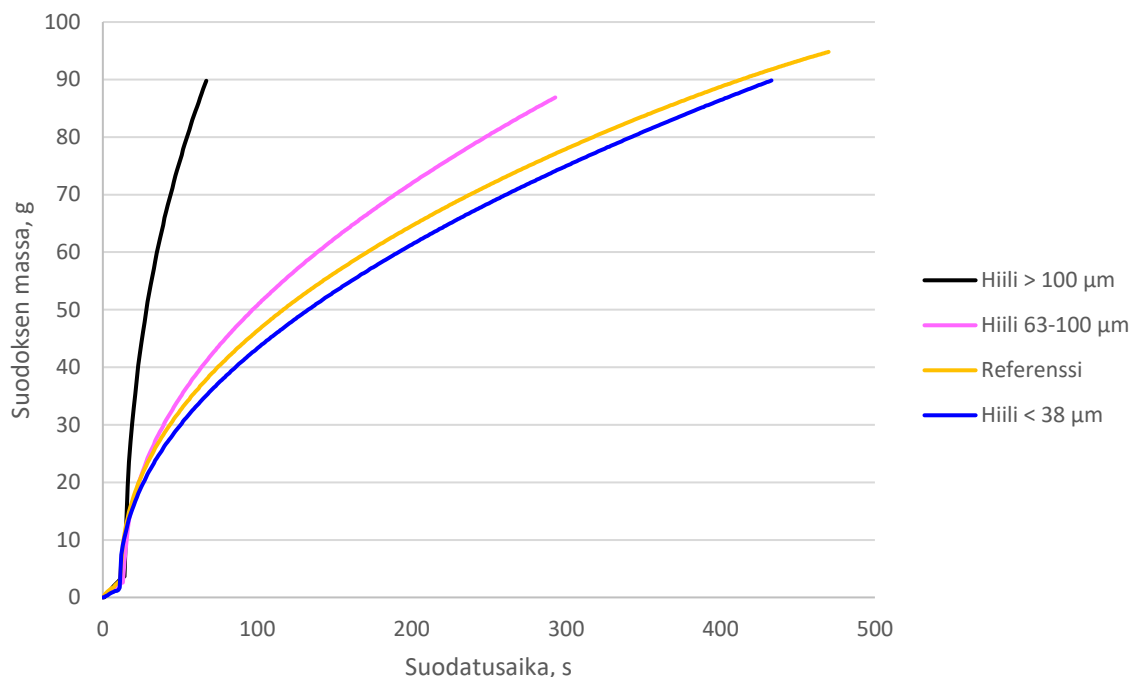
Näyte	Suodoksen massa, g	Suodatusaika, s	KAP-%
Referenssi + hiili > 100 µm	65,8	230	13,2
Referenssi + jauhettu hiili	65,6	240	13,2
Pulssilaser 50 ns + hiili > 100 µm	62,8	330	12,7
Pulssilaser 50 ns + jauhettu hiili	63,9	540	13,1

Kuvasta 32 ja Taulukosta XVII nähdään, että laserkäsiteltyjen lietenäytteiden vedenpoistonepeudet ovat hitaampia kuin referenssinäytteiden. Myös laserkäsiteltyjen näytteiden kiintoainekakkujen kuiva-ainepitoisuudet ovat hieman alhaisempia kuin referenssien. Kun torrefioitujen hiilien partikkelikokoja vertaillaan laserkäsitellyillä lietteillä, isommalla hiilikoolla vedenpoisto on nopeampaa, mutta kiintoainekakun kuiva-ainepitoisuus jää hieman alhaisemmaksi kuin pienemmällä hiilikoolla. Referenssinäytteillä eri partikkelikoon hiilien välillä ei juurikaan havaita eroa.

Tulosten perusteella torrefioitu hiili ei paranna lasersäteen absorptiota biolietteeeseen. Tämä voi johtua siitä, että hiilen partikkelikoko on liian suurta parantamaan lasersäteen absorptiota. Silmämääräisesti kokeiden aikana vaikutti, että isompi hiili hajoaisi käsittelyssä, jolloin se ei toimi niin hyvänä tukimateriaalina lietteen suodatuksessa kuin partikkelikooltaan  $> 100 \mu\text{m}$  torrefioitu hiili referenssinäytteessä. Suuremman hiilen rikkoutumista tukisi Kuvasta 32 ja Taulukosta XVII tehtävä havainto, että laserkäsitellyllä näytteellä, johon lisättiin torrefioitua hiiltä partikkelikoossa  $> 100 \mu\text{m}$ , on heikompi suotautuvuus kuin referenssinäytteellä, johon lisättiin jauhettua torrefioitua hiiltä. Torrefioidun hiilen partikkelikoon ollessa suurempi kuin pigmentin sen peittokyky ei ole yhtä voimakas, minkä vuoksi se ei toimi yhtä hyvänä absorbenttina kuin pigmentti.

### **13.3 Torrefioidun hiilen vaikutus lietteen suodatuksessa**

Torrefioidun hiilen partikkelikokojen vaikutusta lietteen suodatuksen tukiaineeksi selvitettiin lisäämällä kolmea partikkelikooltaan erisuuruista torrefioitua hiiltä,  $< 38 \mu\text{m}$ ,  $63\text{--}100 \mu\text{m}$  ja  $> 100 \mu\text{m}$ , ei-laserkäsiteltyihin sekalietenäytteisiin. Kuvassa 33 on esitetty torrefioitujen hiilien partikkelikokojen vaikutus sekalietenäytteiden Nutsche-suodatuksissa sekä referenssinäytteen suodatus. Taulukossa XVIII on esitetty näytteiden suodatuksesta kertyneiden suodoksien massat, suodatusajat ja kakkujen kuiva-ainepitoisuudet.



Kuva 33 Torrefioidun hiilen partikkelikoon vaikutus sekalietteen Nutsche-suodatuksessa. Torrefioitua hiiltä lisättiin sekalietteen kuiva-aineeseen suhteessa 1:1. Referenssinäytteessä ei ollut lisätty torrefioitua hiiltä. Sekalietteisissä oli sekoitettu kuitulietettä ja biolietettä suhteissa 1:1. Suodatuksissa paine oli 6 bar ja näytemäärät noin 150 g.

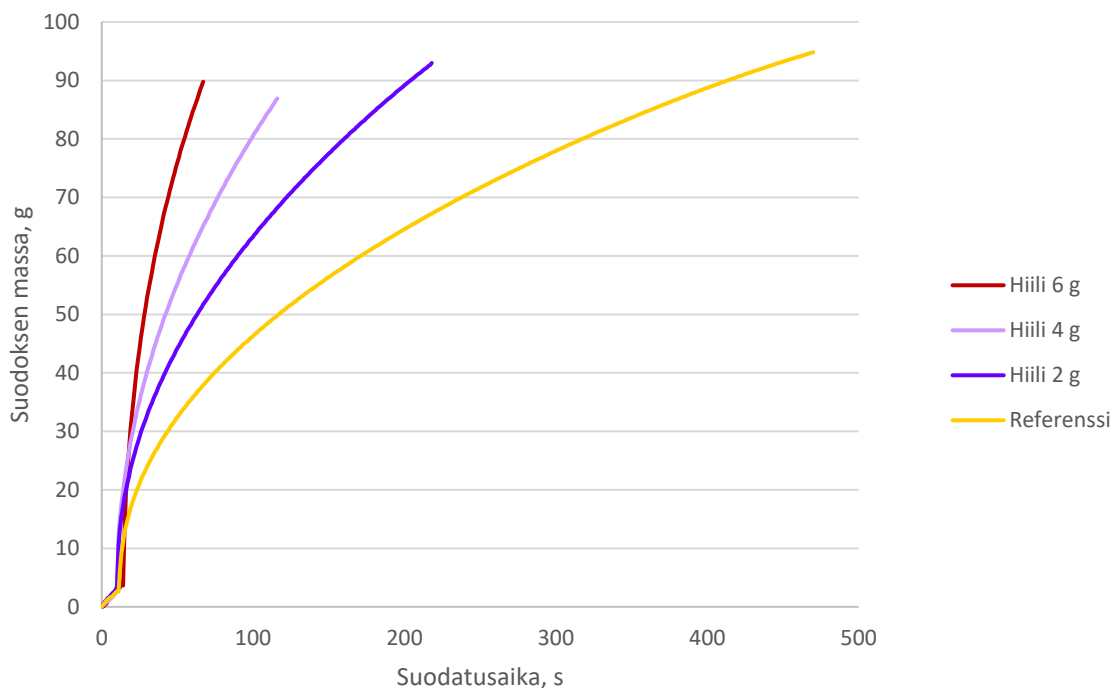
Taulukko XVIII Torrefioitujen hiilien partikkelikoon vaikutus sekalietteen suodatuksissa kertyneisiin suodoksien massoihin, suodatusaikoihin ja kakkujen kuiva-ainepitoisuuksiin. Torrefioitua hiiltä lisättiin sekalietteen kuiva-aineeseen suhteessa 1:1. Referenssissä ei ollut lisätty torrefioitua hiiltä. Sekalietenäytteissä kuitu- ja biolietettä oli sekoitettu suhteissa 1:1. Nutsche-suodatuksen paine oli 6 bar ja näytemäärät noin 150 g.

Näyte	Suodoksen massa, g	Suodatusaika, s	KAP-%
Hiili > 100 µm	89,8	70	19,3
Hiili 63–100 µm	86,9	290	16,1
Referenssi	95,6	470	10,8
Hiili < 38 µm	89,9	430	17,8

Kuvasta 33 ja Taulukosta XVIII huomataan, että mitä suurempaa on hiilen partikkelikoko, sitä enemmän se nopeuttaa suodatusta. Kuitenkin pienimmällä hiilellä (< 38 µm) lietteen vedenpoisto on heikompaa kuin referenssinäytteellä, johon ei oltu lisätty torrefioitua hiiltä. Tämä johtuu mahdollisesti siitä, että pienin hiili muodostaa biolietteen flokkien kanssa tiiviin

kiintoainekerroksen, jonka läpi vesi ei pääse kunnolla poistumaan. Lisättäessä pienintä hiiltä lietekakun kuiva-ainepitoisuus on kuitenkin huomattavan paljon korkeampi kuin referenssillä johtuen hiilen aikaansaamasta korkeammasta kuiva-ainemassasta kiintoainekakussa. Torrefioidun hiilen suurimmalla partikkelikoollla ( $> 100 \mu\text{m}$ ) havaitaan olevan sekä tehokain vedenpoisto että korkein kakun kuiva-ainepitoisuus suodatuksen jälkeen. Suurin torrefioitu hiili antaa eniten tukea ja huokoisuutta lietekakulle suodatuksen aikana, jolloin vesi pääsee poistumaan kakun läpi nopeinten. Kun torrefioitua hiiltä sisältävien näytteiden suodoksien massoja verrataan referenssinäytteeseen, havaitaan suodosta erottuvan vähemmän kuin referenssin suodatuksessa. Tämä voi johtua siitä, että hiilen muodostamiin huokosiin kakussa jää hieman vettä, sillä hiilipartikkelien tukiessa kakkua vesi pääsee läpäisemään kakun nopeasti. Tuloksia tarkasteltaessa on huomattava, että hiililisäyksen aikaansaama korkeampi kuiva-ainepitoisuus johtuu hiilen aiheuttamasta korkeammasta kuiva-ainemäärästä kakussa. Lisäksi tuloksista havaitaan, että hiili ei itsessään lisää lietteestä poistuneen veden määrää, vaan ainoastaan nopeuttaa veden poistumista.

Lisäksi selvitettiin torrefioidun hiilen määrän vaikutusta sekalietteen suodatukseen. Torrefioiduista hiilistä käytettiin suurimman partikkelikoon,  $> 100 \mu\text{m}$ , omaavaa hiiltä, jolla saatiin parhaimmat tulokset edellisistä kokeista. Torrefioidun hiilen määriksi valittiin 6, 4 ja 2 grammaa sekä referenssinäyte, johon ei oltu lisätty torrefioitua hiiltä. Kuvassa 34 on esitetty torrefioidun hiilen määrän vaikutus sekalietteen suodatukseen. Taulukossa XIX on esitetty näytteiden suodatuksissa kertyneiden suodoksien massat, suodatusajat ja kakkujen kuiva-ainepitoisuudet.



Kuva 34 Torrefioidun hiilen määrän vaikutus sekalietteen suodatukseen. Käytetyn torrefioidun hiilen partikkelikoko oli  $> 100 \mu\text{m}$ . Referenssinäytteeseen ei ollut lisätty torrefioitua hiiltä. Sekalietteisissä oli sekoitettu kuitulietettä ja biolietettä suhteissa 1:1. Suodatuksissa paine oli 6 bar ja näytemäärät noin 150 g.

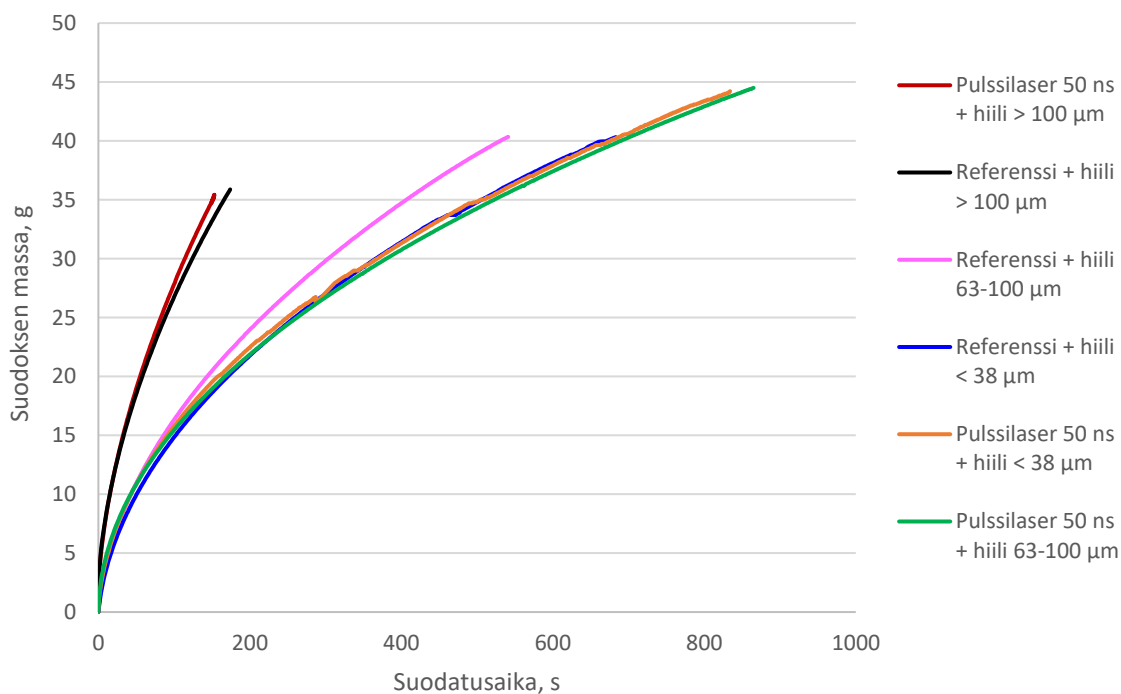
Taulukko XIX Torrefioidun hiilen määrän vaikutus sekalietteen suodatuksessa suodoksen massaan, suodatusaikaan ja kakun kuiva-ainepitoisuuteen. Torrefioidun hiilen partikkelikoko oli  $> 100 \mu\text{m}$ . Referenssissä ei ollut lisättyä torrefioitua hiiltä. Suodatuksissa paine oli 6 bar ja näytemäärät noin 150 g.

Näyte	Suodoksen massa, g	Suodatusaika, s	KAP-%
Hiili 6 g	89,8	70	19,3
Hiili 4 g	86,9	120	15,0
Hiili 2 g	93,0	220	13,4
Referenssi	95,6	470	10,8

Kuvasta 34 ja Taulukosta XIX huomataan torrefioidun hiilen massan lisäämisen nopeuttavan lietteen vedenpoistoa. Lietekakun kuiva-ainepitoisuus kasvaa hiilen määrän kasvaessa kaksinkertaiseksi. Korkeampi hiilimäärä saa aikaan jäykemmän ja huokoisemman kiintoainekakun kuin matalampi hiilimäärä tai biolietenäyte ilman hiiltä, mikä havaitaan lyhyenä suodatusaikana. Samoin kuin torrefioidun hiilen partikkelikoon vaikutusta tutkivassa koesarjassa, jälleen ha-

vaitaan hiiltä sisältävistä näytteistä erottuvan vähemmän suodosta kuin referenssistä. Kertyneen suodoksen massa ei täysin riipu lisätyn hiilen määrästä, sillä hiilen määrän kasvattaminen ei suoraan vähennä kerääntyneen suodoksen massaa.

Torrefioidun hiilen partikkelikoon vaikutusta selvitettiin myös laserkäsitellyn biolietteen suodatukseen. Torrefioidun hiilen partikkelikokoina käytettiin samoja kuin edellisissä koeksissa,  $< 38 \mu\text{m}$ ,  $63\text{--}100 \mu\text{m}$  ja  $> 100 \mu\text{m}$ . Biolietteen laserkäsitelyä oli parannettu mustan pigmentin avulla. Myös referenssinäytteisiin lisättiin mustaa pigmenttiä ennen suodatusta. Kuvassa 35 on esitetty laserkäsiteltyjen biolietenäytteiden ja referenssien Nutsche-suodatukset.



Kuva 35

Torrefioidun hiilen partikkelikoon vaikutus laserkäsitellyn biolietteen suodatukseen. Ennen laserkäsitelyä mustaa pigmenttiä lisättiin biolietteen kuiva-aineeseen suhteessa 1:2 tehostamaan laserkäsitelyä, joka suoritettiin suurimmat pulssi- ja piikkienergiat tuottavilla parametreilla. Ennen suodatusta näytteisiin lisättiin torrefioitua hiiltä biolietteen kuiva-aineeseen suhteessa 1:1. Referenssinäytteet valmistettiin vastaavalla tavalla, mutta ilman laserkäsitelyä. Laserkäsitelyihin näytteisiin lisättiin vettä noin 18 g ja referenssinäytteisiin noin 5 g. Nutsche-suodatuksessa paine oli 6 bar ja näytemäärät noin 75 g.



Kuvasta 35 havaitaan huomattavia eroja vedenpoistonopeuksissa näytteiden välillä. Laserkäsitellyllä biolietteellä ja referenssinäytteellä, joihin on lisätty suurinta torrefioitua hiiltä, vedenpoisto on nopeaa, mutta suodosmäärät jäävät selkeästi vähäisemmiksi kuin muilla näytteillä. Laserkäsitellyllä biolietenäytteillä ja referenssinäytteillä, joihin lisättiin pienintä torrefioitua hiiltä, sekä laserkäsitellyllä näytteellä, johon on lisätty keskikokoista torrefioitua hiiltä, vedenpoiston kuvaajat menevät päällekkäin. Niillä vedenpoisto on hitaampaa kuin muilla näytteillä, mutta suodosta kertyy enemmän, vaikkakin näistä referenssillä suodosta kertyy laserkäsiteltyjä näytteitä vähemmän.

Taulukkoon XX on kerätty näytteiden Nutsche-suodatusten suodoksien massat, suodatusajat ja kakkujen kuiva-ainepitoisuudet. Suodatustulokset ovat esitetty laserkäsitellyille biolietenäytteille ja referenssinäytteille.

Taulukko XX

Torrefioidun hiilen partikkelikoon vaikutus laserkäsiteltyihin biolietenäytteiden ja referenssinäytteiden suodatuksiin. Ennen laserkäsittelyä mustaa pigmenttiä lisättiin biolietteen kuiva-aineseen suhteessa 1:2. Laserkäsittely suoritettiin suurimmat pulssi- ja piikkienergiat tuottavilla parametreilla. Ennen suodatusta näytteisiin lisättiin torrefioitua hiiltä biolietteen kuiva-aineseen suhteessa 1:1. Referenssinäytteet valmistettiin vastaavalla tavalla, mutta ilman laserkäsittelyä. Laserkäsiteltyihin näytteisiin lisättiin vettä noin 18 g ja referenssinäytteisiin noin 5 g. Nutsche-suodatuksessa paine oli 6 bar ja näytemäärät noin 75 g.

Näyte	Suodoksen massa, g	Suodatusaika, s	KAP-%
Pulssilaser 50 ns + hiili > 100 µm	35,5	155	20,4
Referenssi + hiili > 100 µm	36,0	175	18,7
Pulssilaser 50 ns + hiili 63–100 µm	47,1	870	22,6
Referenssi + hiili 63–100 µm	43,8	545	21,1
Pulssilaser 50 ns + hiili < 38 µm	46,9	835	22,9
Referenssi + hiili < 38 µm	43,3	700	20,0

Vertaillen Taulukosta XX laserkäsiteltyjä näytteitä ja referenssejä, joihin on lisätty samankokoisia torrefioituja hiiliä, nähdään laserkäsitellyillä lietteillä olevan suurempi kakun kuiva-ainepitoisuus kaikilla kolmella eri hiilen partikkelikoolla. Tämä osoittaisi, että laserkäsitellyllä kyettäisiin hieman hajottamaan biolietteen flokkeja ja bakteerisoluja sekä nostamaan

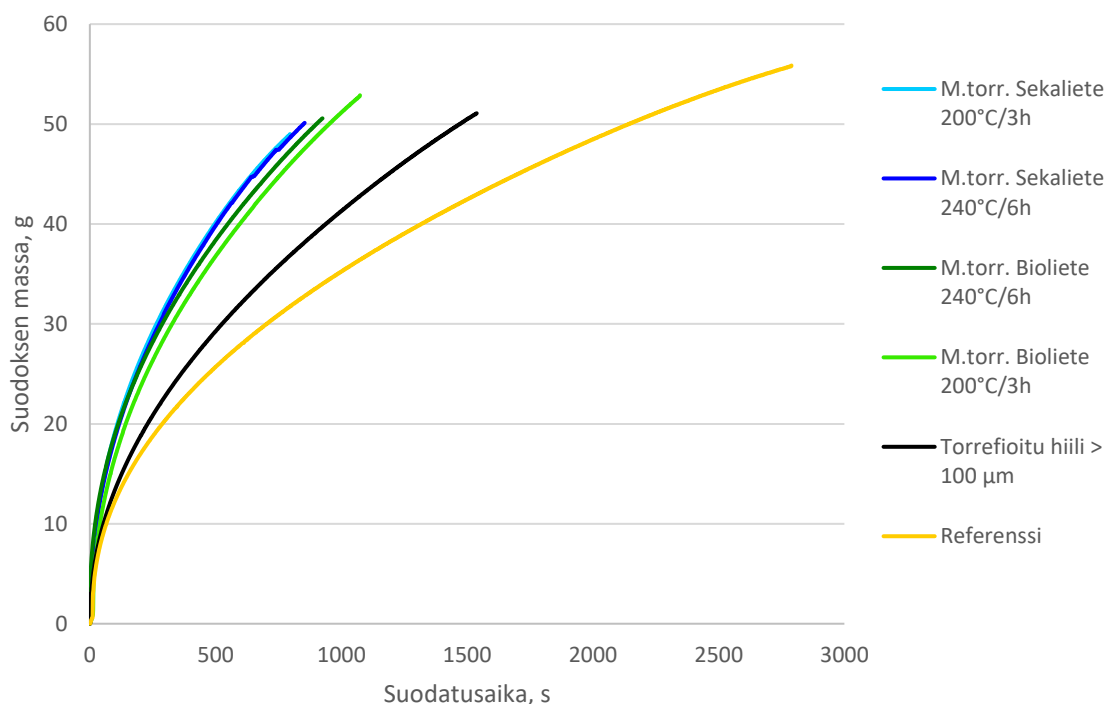
biolietteen kuiva-ainepitoisuutta. Laserkäsittelyn vaikutus biolietteeseen vaikuttaisi kuitenkin olevan melko vähäinen suhteessa torrefioidun hiilen lisäykseen.

Korkeimmat kuiva-ainepitoisuudet laserkäsitellyillä näytteillä ja referensseillä saavutetaan kahdella pienimmällä torrefioidun hiilen partikkelikoolla. Edellisistä kokeista korkein kiintoainekakun kuiva-ainepitoisuus saatiin suurimmalla hiilen partikkelikoolla, mutta tällöin suodatuksissa käytettiin bio- ja kuitulietteiden seosta, joka sisälsi biolietettä suurempia partikkeleita. Tässä koesarjassa biolietteeseen oli sekoitettuna mustaa pigmenttiä, jolloin pienempi torrefioitu hiilikoko mahdollisesti tuki suodatusta paremmin.

Kuten Kuvasta 34, myös Taulukosta XX havaitaan, että suurella torrefioidun hiilen partikkelikoolla suodoksen määrä jää laserkäsitellyllä biolietteellä ja referenssinäytteellä muita biolietenäytteitä alhaisemmaksi. Tämä viittaa siihen, että kiintoainekakkuihin jää kosteutta, mikä havaitaan muita näytteitä matalimpina kakkujen kuiva-ainepitoisuuksina. Tämä johtuu siitä, että vesi läpäisee kakun nopeasti, jolloin osa vedestä jää vielä kakkuun. Laserkäsitellyllä näytteellä ja referenssillä, joihin on lisätty suurinta torrefioidun hiilen partikkelikokoja, suodatusajat ovat kuitenkin huomattavasti lyhyempiä verrattuna näytteisiin, joihin on lisätty pienempiä torrefioidun hiilen partikkelikokoja.

#### **13.4 Märkätorrefioidun lietteen vaikutus biolietteen suotautuvuuteen**

Biolietettä ja sekalietettä märkätorrefioitiin Taulukon V kuvaamissa prosessiolosuhteissa. Märkätorrefioidun hiilen vaikutusta biolietteen suodatuksen tukiaineena selvitettiin lisäämällä prosessista saatuja, kuivattuja lietteitä biolietteeseen. Kuvassa 36 ja Taulukossa XXI on esitetty märkätorrefioitujen lietteiden lisäämisen vaikutus biolietteeseen. Tuloksia on vertailtu biolietteeseen, johon on lisätty torrefioitua hiiltä partikkelikoossa  $> 100 \mu\text{m}$ , sekä referenssiin ilman hiililisäystä.



Kuva 36 Märkätorrefioitujen bioliete- ja sekalietenäytteiden vaikutus biolietteen suodatuksen tukiaineena. Märkätorrefioituja lietteitä verrattiin torrefioituun hiileen, jonka partikkelikoko oli  $> 100 \mu\text{m}$ , ja referenssinäytteeseen, johon ei oltu lisätty tukiaineita. Tukiaineita sekoitettiin 1:2 biolietteen kuiva-aineeseen. Suodatuksen paine oli 6 bar, ja näytemäärät noin 100 g.

Taulukko XXI Märkätorrefioitujen bio- ja sekalietteen vaikutus biolietteen suodatuksen tukiaineena, ja niiden vertailu torrefioituun hiileen tukiaineena ja referenssinäytteen suodatukseseen. Tukiaineita sekoitettiin suhteessa 1:2 biolietteen kuiva-aineeseen. Suodatuksen paine oli 6 bar, ja näytemäärät noin 100 g.

Näyte	Suodoksen massa, g	Suodatusaika, s	KAP-%
M.torr. Sekaliete 200°C/3h	48,9	790	14,4
M.torr. Sekaliete 240°C/6h	49,3	860	13,9
M.torr. Bioliete 240°C/6h	51,8	1000	14,6
M.torr. Bioliete 200°C/3h	53,8	1270	15,0
Torrefioitu hiili $> 100 \mu\text{m}$	52,1	1570	14,6
Referenssi	58,2	3440	12,0

Kuvasta 36 havaitaan, että kaikkien biolietenäytteiden suodatuksien kuvaajat, joissa biolietteenäytteeseen on lisätty märkätorrefioituja lietteitä, asettuvat lähelle toisiaan. Märkätorrefioitujen

lietteiden huomataan nopeuttavan suodatusta enemmän kuin torrefoidun hiilen suodosmäärien pysyessä lähes samana. Verrattuna pelkän biolietteen suodatukseen märkätorrefioidut lietteet nopeuttavat suodatusta huomattavasti, ja suodatusaika lyhenee noin 70 % verrattuna referenssin suodatukseen. Kun Taulukosta XXI vertaillaan lietekakkujen kuiva-ainepitoisuuksia, joissa suodatuksiin on lisätty märkätorrefioituja lietteitä, havaitaan näytteiden välisissä kuiva-ainepitoisuuksissa vain vähäisiä eroja, jotka menevät hajonnan piikkiin. Suodatuksissa, joissa tukiaineena toimii märkätorrefioidut biolietteet, kuiva-ainepitoisuudet ovat hieman korkeampia kuin suodatuksissa, joissa tukiaineena on käytetty märkätorrefioituja sekalietteitä. Parhain kuiva-ainepitoisuus saadaan bioliettelelle, johon on sekoitettu 200 °C lämpötilassa 3 tuntia märkätorrefioitua biolietettä. Suodatustulosten erot ovat kuitenkin hyvin vähäisiä, eikä niiden perusteella ole väliä, millaista märkätorrefioitua lietettä suodatuksen tukiaineena käytetään.

#### **14 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET**

Työssä tutkittiin lasertekniikan vaikutusta biolietteen vedenpoiston parantamiseksi. Useissa biotekniikan alan tutkimuksissa on havaittu pulssitetun lasersäteen hajottavan soluja säteen polttopisteen ympäriltä. Lasersäteen solujahajottava vaikutus perustuu shokkiaallon seurauksena syntyvän kavitaatiokuplan laajentumiseen. Lääketieteellisissä sovelluksissa lasersäde vaikuttaa soluihin vain paikallisesti, ja ympäröivään kudokseen kohdistuvaa vahinkoa pyritään välttämään. Sen sijaan biolietteen laserkäsittelyllä soluja pyritään vaurioittamaan mahdollisimman laajamittaisesti. Kuitenkin liiallinen solujen hajottaminen voi johtaa biolietteen EPS-rakenteen vuoksi vedensitomiseen ja vedenpoistokyvyn heikkenemiseen.

Biolietteen vaikean kuivattavuuden takia sen osuuden kasvaminen teollisuuden ja kunnallisten puhdistamoiden kokonaislietemäärästä aiheuttaa ongelmia lietteenkäsittelyn jatkoprosesseissa, kuten lietteiden kuivattamisessa ja loppusijoituksessa. Lietteiden vedenpoistoa pystytään tehostamaan polymeereillä, joilla voidaan sitoa lieteflokkeja yhteen ja vahvistaa niitä. Biolietteen vedenpoiston parantamiseksi on kehitetty tekniikoita, kuten elektrokuivatus, Kemikond-käsittely ja ultraäänikäsittely, mutta ne eivät ole saavuttaneet laajaa suosiota lietteidenkäsittelyssä.

Kokeellisessa osassa tutkittiin, pystytäänkö biolietteen kuiva-ainepitoisuutta parantamaan lasersertekniikan avulla optimoimalla prosessiparametrit ja -olosuhteet. Kokeissa tärkeimpänä analyysimenetelmänä toimivat suodatuskokeet, sillä laserkäsittelyn tarkoituksena oli ensisijaisesti nostaa biolietteen kuiva-ainepitoisuutta. Laserkokeissa käytettiin sekä pulssilaseria että jatkuvatoimista (CW) laseria, joiden muutettaville parametreille etsittiin optimaalisimmat arvot, joilla biolietettä käsiteltäessä saavutettiin suodatuksien jälkeen korkeimmat kuiva-ainepitoisuudet. Kokeissa löydettiin yksi parametrisetti, jonka avulla tutkittiin lasersäteen absorption parantamista biolietteeeseen lisäaineiden avulla. Lisäksi tutkittiin lietteiden suotautuvuuden parantamista torrefioidun hiilen ja märkätorrefioitujen lietteiden avulla.

Pulssilaserin pulssin pituudelle, overlapille, polttopisteen sijainnille, työstönopeudelle ja hatchille etsittiin biolietteen laserkäsittelyyn parhaimmat arvot. Suurimmat biolietteen kuiva-ainepitoisuudet suodatuksissa saavutettiin pulssipituudella 4 ns, overlapilla 75 %, polttopisteen sijainnilla 0 mm, työstönopeudella 1400 mm/s ja hatchilla 0,03 mm. Lyhyen pulssipituuden tehokkuutta voidaan selittää lasersäteen korkealla piikkienergialla ja tehotiheydellä. Polttopisteen ollessa kohdistettuna biolietteen pintaan muodostunut plasma oli silmännähtävästi voimakkaampi kuin lasersäteen polttopisteen ollessa pinnan alapuolella. Alkuperäisenä ajatuksena oli, että lietteen pinnan alapuolelle kohdistetun lasersäteen pulssi saavuttaisi paremmin biolietteen solut kuin polttopisteen ollessa pinnalla. Voi kuitenkin olla, että lasersäde absorboituu vain biolietteen pintaan, vaikka säde olisikin kohdistettuna liete-pinnan alapuolelle. Parhaimmille overlapin, työstönopeuden ja hatchin arvoille on vaikeampi löytää yksiselitteistä tulkintaa.

CW-laserilla korkeimmat kiintoainepitoisuudet saavutettiin tehon arvolla 75 W ja työstönopeudella 1500 mm/s. Pulssi- ja CW-laserien parhaimmista parametreista koottiin parametrisetit, joiden arvoilla biolietenäytteet laserkäsiteltiin, ja käsittelyn jälkeen suodatettiin. Vertaillen suodatusaikoja ja kuiva-ainepitoisuuksia ei-laserkäsiteltyyn biolietenäytteeseen ei havaittu laserkäsittelyn juurikaan muuttavan biolietteen suotautuvuutta.

Pulssilaserille löydettiin laskennallisesti suurimmat piikki- ja pulssienergiat tuottavan parametrisetin, joissa pulssipituus on 50 ns, taajuus matala ja työstönopeus alhainen. Tämän parametrisetin arvoilla käsitellyn biolietteen suotautuvuus ja kiintoainekakun kuiva-ainepitoisuus olivat hieman parempia verrattuna käsittelemättömään biolietenäytteeseen.

Löydetyllä parametrisetillä tutkittiin lasersäteen absorption parantamista lisäämällä biolietteeseen mustaa pigmenttiä. Pigmenttilisäyksen havaittiin nopeuttavan laserkäsittelyn biolietteen suodatusta sekä kohottavan kuiva-ainepitoisuutta. Pigmentin kanssa biolietteen laserkäsittelyn aikana muodostunut plasma oli paljon kirkkaampi kuin laserkäsittely ilman pigmenttilisäystä. Näytteen kuiva-ainepitoisuus nousi noin 45 % ja suodatusaika lyheni noin 40 % verrattuna käsittelemättömän biolietteen suodatukseen. Suodatuksen nopeutuminen ja kuiva-ainepitoisuuden parantuminen havaittiin myös laserkäsittelyn biolietenäytteen ja mustaa pigmenttiä sisältävän referenssin välillä.

Kaikkiin koesarjan näytteisiin lisättiin vettä, jotta pigmenttiä sisältävien näytteiden suodatukset voitaisiin suorittaa käytössä olevalla laitteistolla. Vesilisäykset laskettiin siten, että näytteiden suodatettavat määrät ja kuiva-ainemassat vastaisivat toisiaan, jotta niiden suodatustuloksia voitiin luotettavasti vertailla keskenään. Vesilisäyksen vaikutusta näytteisiin ei täysin voitu selvittää. Vesi todennäköisesti paransi hieman näytteiden suodatuvuutta, sillä biolietteeseen lisätty vesi ei ehtinyt sitoutua biolietteen kolloidiseen rakenteeseen, vaan laimensi sitä. Vesilisäys tuskin vaikutti kiintoainekakun kuiva-ainepitoisuuteen.

Tulosten perusteella vaikuttaa, että laserkäsittely poistaisi hieman lieteflokkien sisältämää vettä, mikä nähdään laserkäsittelyllä biolietteellä korkeampana kiintoainekakun kuiva-ainepitoisuutena kuin referenssinäytteillä suodatuksen jälkeen. Tässä työssä ei kyetty saata- vissa olevien analyysimenetelmien puutteellisuuden vuoksi selvittämään tarkalleen, minkä tyyppistä lieteflokin sisältämää vettä laserkäsittely poistaisi.

Mustan pigmentin lisäksi tutkittiin myös mustan torrefioidun hiilen vaikutusta tehostamaan lasersäteen absorptiota biolietteeseen. Vertaamalla laserkäsittelyjen näytteiden suodatustuloksia referenssinäytteisiin, havaittiin, ettei torrefioidun hiilen lisääminen ennen laserkäsittelyä paranna lasersäteen absorptiota. Tämä voi johtua siitä, että torrefioidun hiilen partikkelikoko oli liian suurta. Suurempi partikkelikokoisella torrefioidulla hiilellä ( $> 100 \mu\text{m}$ ) oli nähtävissä hiilen hajoamista laserkäsittelyn aikana.

Torrefioidun hiilen määrän ja partikkelikoon vaikutusta tutkittiin ei-laserkäsittelyn sekalietteen suodatuksessa. Tutkimuksista havaittiin, että mitä suurempi on torrefioidun hiilen par-

tikkelikoko ja mitä enemmän hiiltä on, sitä nopeampi on lietteen vedenpoisto. Kiintoainekakun kuiva-ainepitoisuus ei riippunut hiilen partikkelikoosta. Kakun kuiva-ainepitoisuus nousee lisätyn hiilimäärän myötä.

Torrefioidun hiilen partikkelikoon vaikutusta selvitettiin myös laserkäsitellyn biolietteen suodatuksissa, joissa biolietteen laserkäsitelyä oli tehostettu mustalla pigmentillä. Sekä laserkäsitellyillä biolietenäytteillä ja referensseillä saavutettiin korkeat kuiva-ainepitoisuudet; näytteiden kuiva-ainepitoisuudet olivat noin 20 %. Suurella hiilen partikkelikoolla suodatusnopeutta saatiin parannettua huomattavasti, mutta suodoksien massat jäivät alhaisemmiksi kuin muiden näytteiden, sillä kakkuun jäi vielä jonkin verran vettä. Kaikilla laserkäsitellyillä näytteillä oli muutaman prosenttiyksikön verran parempi kuiva-ainepitoisuus kuin laseroimattomilla referenssinäytteillä.

Seka- ja biolietteitä märkätorrefioitiin hiileksi, joita lisättiin biolietteen joukkoon ennen sen suodatusta. Eri prosessiolosuhteissa märkätorrefioiduilla lietteillä ei juurikaan havaittu eroja suodatusajoissa tai kuiva-ainepitoisuuksissa biolietteen suodatuksessa. Märkätorrefioidut lietteet tukiaineena nopeuttivat biolietteen suodatusta enemmän kuin torrefioitu hiili (> 100 µm). Verrattuna referenssiin märkätorrefioidun lietteen lisäyksellä saadaan lyhennettyä biolietteen suodatusaikaa noin 70 %.

Torrefioidun ja märkätorrefioidun hiilen lisäys biolietteeeseen ennen suodatusta nopeutti merkittävästi vedenpoistoa. Hiilien lisäyksellä ei kuitenkaan kyetty lisäämään vedenpoistoa lietteistä, jolloin hiililisäyksestä huolimatta polttoon menisi sama vesimäärä kuin ilman hiililisäystäkin. Hiililisäyksellä voitaisiin kuitenkin korvata ainakin osittain polymeerien käyttöä lietteensuodatuksen nopeuttajana, vaikkakin vielä tarkempaa vertailua hiililisäyksen ja polymeerien käytön välillä on tehtävä.

Hiilien lisäyksen etuna lietteiden jatkokäsittelyn kannalta, esimerkiksi verrattuna polymeerien käyttöön, on sen aikaansaama lietteen polttoarvon kohoaminen hiilen lisätessä lietteen energiatiheyttä. Hiilen lisääminen lietteeseen kasvattaisi lietteen määrää, mikä lisäisi lietteen kuljetus-, varastointi- ja pumppauskustannuksia. Tämän vuoksi parempi vaihtoehto olisi märkätorrefioida tehtaan omia lietteitä hiileksi, jolloin pystyttäisiin pienentämään lietevirtoja. Pelkän biolietteen märkätorrefiointi parantaisi sen kuivattavuutta. Lisäksi biolietteen

märkätorrefointi pienentäisi sen osuutta sekalietteestä, mikä parantaisi jäljelle jäävän lieteosuuden kuivattavuutta mekaanisessa suodatuksessa. On vielä kuitenkin selvitettävä märkätorrefoinnin taloudellisuutta ja siitä saatavia hyötyjä lietteen energiatihyden nostamiseksi, ja mikä lietevirta ja –osuus kannattaisi käsitellä.

Laserkäsittelyllä ja hiilen lisäyksellä ennen suodatusta saatiin parannettua kiintoainekakun kuiva-ainepitoisuutta, vaikka tavoitekuiva-ainepitoisuutta 30 % ei saavutettu. Kokeissa käytetyillä lasereilla kyettiin parantamaan biolietteen kuiva-ainepitoisuutta muutama prosenttiyksikkö.

Bioliete sisältää runsaasti vettä verrattuna sen sisältämään kuiva-aineeseen, jolloin biolietettä laserkäsiteltäessä herää epäily, saavuttaako lasersäde kunnolla soluja vai meneekö laserin energia pääasiassa biolietteen sisältämän vapaan veden höyrystymiseen. Suhteellisen pienestä kuiva-ainepitoisuuden paranemisesta voitaisiin päätellä, että lasersäde ei aivan täysin saavuta biolietteen soluja. Biolietteen laserkäsittelyn parantaminen tässä tapauksessa vaatisi laserin, jonka aallonpituus ei höyrystäisi vettä, vaan läpäisisi sen, jolloin laser pääsisi työstämään soluja. Toisena vaihtoehtona olisi tehokkuudeltaan suurempi laser. Teollisen mittakaavan sovellukseen tällaiset laserit olisivat todennäköisesti vielä liian hintavia, mutta lasertekniikan edelleen kehittyessä ja laserien hintojen tullessa alaspäin tulevaisuudessa tekniikkaa voitaisiin mahdollisesti lietteenkäsittelyssä hyödyntää.



## LÄHDELUETTELO

- Alatalo, S., Repo, E., Mäkilä, E., Salonen, J., Vakkilainen, E. & Sillanpää, M., 2013, Adsorption behavior of hydrothermally treated municipal sludge & pulp and paper industry sludge. *Bioresource Technology*, 147, s. 71–76.
- Bajpai, P., 2012, *Biotechnology for Pulp and Paper Processing*, Springer, s. 349–352.
- Bergman, P. C. & Kiel, J. H., 2005, Torrefaction for biomass upgrading. *Published at 14 th European Biomass Conference & Exhibition , Paris, France, 17-21 October 2005*.
- Chistensen, M. L., Keiding, K., Nielsen, P. H. & Jørgensen, M. K., 2015, Dewatering in biological wastewater treatment: A review. *Water research*, 82, 14–24.
- Dahl, O., 2008, *Environmental Management and Control*, 2. Painos, Paperi ja Puu Oy, s. 87–148.
- Euroopan komissio, 2015, *Kierto kuntoon: komissio hyväksyy uuden kunnianhimoisen kiertotalouspaketin, jolla edistetään kilpailukykyä, luodaan työpaikkoja ja tuetaan kestäväää kasvua*, [Online], [Viitattu 9.11.2018], Saatavilla: [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-15-6203\\_fi.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-6203_fi.htm)
- Eyser, C., Palmu, K., Schmidt, T.C. & Tuerk, J., 2015, Pharmaceutical load in sewage sludge and biochar produced by hydrothermal carbonization. *Science of the Total Environment*, 537, s. 180–186.
- Feng, X. et al., 2009. Dewaterability of waste activated sludge with ultrasound conditioning. *Bioresource Technology*, 100, s.1074–1081.
- Gray, N. F., 2010, *Water Technology: An Introduction for Environmental Scientists and Engineers*, 3. Painos, Butterworth-Heinemann, s. 149–654.
- Hellman, A. N., Rau, K. R., Yoon, H. H. & Venugopalan, V., 2008, Biophysical response to pulsed laser microbeam-induced cell lysis and molecular delivery. *Journal of Biophoton*, 1, s. 24–34.
- Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J. I. C. & Arvin, E., 2002, *Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes*, 3. Painos, Springer-Verlag, s. 27–100.

IEA Bioenergy, 2015; Wild, M. & Deutmeyer, M., *Possible effects of torrefaction on biomass trade*, Task 40, [Online], Saatavilla: <http://task40.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/09/t40-torrefaction-2016.pdf>

Islam, M. S., Arayasomayajula, A. & Selvaganapathy, P. R., 2017, A Review on Macroscale and Microscale Cell Lysis Methods. *Micromachines*, 8(3), s. 1–27.

Jadhav, S. V., Haramkar, S. S., Kamble, A. R. & Thorat, B. N., 2017, Insights into dewatering and characterization of the waste activated sludge. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 000, s. 1–7.

Kangas, A. et al., 2011, *Energiätehokas lietteenkäsittely*, Suomen ympäristökeskus 17, [Online], Saatavilla: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37060/SY\\_17\\_2011.pdf?sequence](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37060/SY_17_2011.pdf?sequence)

Kootenaei, F. G., Mehrdadi, N., Bidhendi, G. N. & Rad, H. A., 2015, Application of Ultrasound Waves for Sludge Dewatering. *International Journal of Life Sciences*, 9(4), s. 6–9.

Krofta Engineering, *Belt filter press*, [Online], [Viitattu 1.8.2018], Saatavilla: <http://www.kroftaengineering.com/krofta-beltfilter.html>

Kruse, A., Funke, A. & Titirici M., 2013, Hydrothermal conversion of biomass to fuels and energetic materials. *Current Opinion in Chemical Biology*, 17, s. 515–521.

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

Kyllönen, H., Pirkkonen, P. & Grönroos, A., 2007, Ultrasonically assisted dewatering of waste activated sludge, *19<sup>TH</sup> International Congress on Acoustics, Madrid, 2–7 September 2007*, s. 1–5.

Lackner, M., 2008, *Lasers in Chemistry; Volume 1 ja 2*, Wiley-VCH, s. 31–1215.

Laitinen, J., Nieminen, J., Saarinen, R. & Toivikko, S., 2014, *Paras käyttökelpoinen tekniikka (BAT) - Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamot*, Ympäristöministeriö 3, s. 14–51.

- Lee, J. E., Lee, J. K. & Choi, H. K., 2007, Filter Press for Electrodeewatering of Waterworks Sludge. *Drying Tehnology*, 25, s. 1649-1657.
- Liimatainen, P., Soukka, R., Marttila, E. & Hammo, S., 2000, *Metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamon lietteiden vaihtoehtoiset käsittelymenetelmät*, Tutkimusraportti, Lappeenranta, s. 6–27.
- Lohiniva, E., Mäkinen, T. & Sipilä, K., 2001, *Lietteiden käsittely - Uudet ja käytössä olevat tekniikat*, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), s. 19–51.
- McMillan, J. R., Watson, I. A., Ali, M. & Jaafar, W., 2013, Evaluation and comparison of algae cell disruption methods: Microwave, waterbath, ultrasonic and laser treatment. *Applied Energy*, 103, s. 128–134.
- Metcalf & Eddy, 2003, *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*, 4. Painos, McGraw-Hill Higher Education, s. 551–1556.
- Mowla, D., Tran, H. & Allen, D. G., 2013, A review of the properties of biosludge and its relevance to enhanced dewatering processes. *Biomass and bioenergy*, 58, s. 365–378.
- Mäkelä, M., Benavente, V. & Fullana, A., 2016, Hydrothermal carbonization of industrial mixed sludge from a pulp and paper mill. *Bioresource Technology*, 200, s. 444–450.
- National Research Council, 1996, *Use of Reclaimed Water and Sludge in Food Crop Production*, The National Academies Press, s. 45–48.
- Pöyry Environment Oy, 2007, *Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukyky -selvitys*, Sitra, s. 5–33.
- Ramboll, Rautiainen; Mutka; Toppila; Lindgvist; Venelampi; Lukkarinen; Outinen; Vesanto; Salmelainen, 2015, *Pirkanmaan keskuspuhdistamo yleissuunnitelma*, s. 7–52.
- Rau, K. R., Quinto-Su, P. A., Hellman, A. N. & Venugopalan, V., 2006, Pulsed Laser Microbeam-Induced Cell Lysis: Time-Resolved Imaging and Analysis of Hydrodynamic Effects. *Biophysical Journal*, 91, s. 317–329.

- Roman, S., Nabais, J.M.V., Laginhas, C., Ledesma, B. & González, J.F., 2012, Hydrothermal carbonization as an effective way of densifying the energy content of biomass, *Fuel Processing Technology*, 103, s. 78–83.
- Saimaan vesi- ja ympäristötutkimus Oy; Kaarlampi, Johanna, 2017, *Lappeenrannan Toikansuon jätevedenpuhdistamon velvoitetarkkailun neljännesvuosiyhteenveto lokajoulukuu 2016 ja vuosiyhteenveto 2016*, [Online], [Viitattu 13.11.2018], Saatavilla: <https://www.lappeenrannanenergia.fi/palvelut/LRE%20tiedostot/LPRPMO%202016.pdf>
- Samer, M., 2015, *Wastewater Treatment Engineering*, Intech, s. 3–4.
- Sharma, S. K. & Sanghi, R., 2013, *Wastewater Reuse and Management*, Springer, s. 255–257.
- Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL R.Y, 2004, *RIL 124-2 Vesihuolto II*, Helsinki, s. 578.
- Säylä, J., 2015, *Yhdyskuntien jätevesien puhdistus 2013*, Suomen ympäristökeskuksen raportteja 34, s. 7–10.
- Thunberg, A., 2010, Optimizing Sludge Dewatering by Using the KemiCond® Process with the Bucher Hydraulic Filter Press - Full Scale Experiences at Käppala WWTP. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 11, s. 225–235.
- Tuán, P. A., 2011, *Sewage sludge electro-dewatering*, Acta Universitatis Lappeenrantaensis 452, s. 25–42.
- ULTRAWAVES GmbH 2018 a, *Ultrasonic Disintegration*, [Online], [Viitattu 7.5.2018], Saatavilla: <http://www.ultrawaves.de/technology/ultrasonic-disintegration>
- ULTRAWAVES GmbH 2018 b, *ULTRAWAVES High-Power Ultrasound Technology*, [Online], [Viitattu 7.5.2018], Saatavilla: <http://www.ultrawaves.de/technology/ultrawaves-high-power-ultrasound-technology>
- Vesilind, P. A. & Hsu, C.-C., 1997, Limits of sludge dewaterability. *Water Science & Technology*, 36(11), s. 87–91.
- Wang, L. K., Chang, S.-Y., Hung, Y.-T. & Chen, J. P., 2007, *Biosolids Treatment Processes*, Humana Press Inc., s. 394–398.

Wang, L. K., Wu, Z. & Shammass, N. K., 2009, *Biological Treatment Processes*, Humana Press, s. 207–210.

Wirth, B., Mumme, J. & Erlach, B., 2012, Anaerobic Treatment of Waste Water Derived from Hydrothermal Carbonization, *20<sup>th</sup> European Biomass Conference and Exhibition, 18–22 June 2012, Milan, Italy*, s. 683–692.

Xu, X. & Jiang, E., 2017, Treatment of urban sludge by hydrothermal carbonization, *Biore-source Technology*, 238, s. 182–187.

Yan, W., Hastings, J., Acharjee, T., Coronella, C. & Vásquez, 2010, Mass and Energy Balance of Wet Torrefaction of Lignocellulosic Biomass, *Energy Fuels*, 24, s. 4738–4742.

Yan, W., Hastings, J., Acharjee, T., Coronella, C. & Vásquez, 2009, Thermal Pretreatment of Lignocellulosic Biomass, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 28(3), s. 435–440.

Ympäristöministeriö, 2017, *Orgaanisen jätteen kaatopaikkakiellon soveltaminen*, [Online], Saatavilla: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B0235F419-7F99-48E3-90B8-F0C0EC1C3F90%7D/126229>

Zhang, Q.-Q. & Jin, R.-C., 2015, The Application of Low-Intensity Ultrasound Irradiation in Biological Wastewater Treatment: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(24), s. 2728–2761.

## **LIITTEET**

Liite I Bioliete-, kuituliete- ja sekaliete-erien kuiva-ainepitoisuudet

Liite II Laserparametrit

Liite III Näytteiden koostumukset

**Bioliete-, kuituliete- ja sekaliete-erien kuiva-ainepitoisuudet**

Taulukko I Tutkimuksiin saatujen bioliete-, kuituliete- ja sekalietenäytteiden kuiva-ainepitoisuudet.

<b>Liete-erän saapumispäivämäärä</b>	<b>Mittauspäivämäärä</b>	<b>Biolietteen KAP-%</b>	<b>Kuitu-/sekalietteen KAP-%</b>
6.4.2018	6.4.2018	3,8	3,3
21.5.2018	21.5.2018	4,2	-
21.5.2018	12.7.2018	4,1	-
7.8.2018	7.8.2018	4,0	23,8
7.8.2018	11.9.2018	4,0	-
16.11.2018	16.11.2018	4,4	20,1
16.11.2018	8.1.2018	4,2	-
30.1.2019	30.1.2018	4,4	-

**Laserparametrit**

Taulukko I Laserparametrien arvot pulssilaserilla tehdyissä parametrikokeissa.

<b>Säädettävä parametri</b>	<b>Pulssin pituus, ns</b>	<b>Työstönopeus, mm/s</b>	<b>Taajuus, kHz</b>	<b>Overlap, %</b>	<b>Polttopisteen sijainti, mm</b>	<b>Hatch, mm</b>	<b>Teho, W</b>
Pulssin pituus	200, 50, 4	1400	105	75	0	0,03	20
Overlap	4	1400	105	75	0	0,03	20
Polttopisteen sijainti	4	1400	105	75	0, -1, -2	0,03	20
Työstönopeus	4	2800	210	75	0	0,03	20
		1400	105				
		700	53				
		350	26				
Hatch	4	1400	105	75	0	0,03, 0,01	20



**Näytteiden koostumukset**

Taulukko I Laserkäsitellyn näytteen ja referenssin koostumukset laserointikokeessa, jossa biolietettä käsiteltiin suurimmat piikki- ja pulssienergiat tuottavilla parametreilla.

Näyte	Lietteen KAP-% ennen vesilisäystä	Liete, g	Kuiva-ainemassa, g	Lisätty vesi, g
Pulssilaser 50 ns	4,87	87,43	4,25	13,58
Referenssi	4,20	101	4,24	-

- Laserkäsitellyn lietenäytteen KAP-% ennen vesilisäystä on laskettu jakamalla laserkäsiteltävän biolietteen kuiva-aineen massa biolietteen massalla laserkäsitelyn jälkeen. Oletuksena on, että kaikki käsittelyn aikana haihtunut massa on vesihöyryä, jolloin biolietteen kiintoaineen määrä olisi yhtä suuri kuin ennen laserkäsitelyä.

Taulukko II Biolietenäytteiden koostumukset kokeessa, jossa selvitettiin mustan pigmentin vaikutus lasersäteen absorptioon.

Näyte	Lietteen KAP-% ennen vesilisäystä	Liete, g	Pigmentti, g	Kokonaiskuiva-aine, g	Lisätty vesi, g	Suodatettava määrä, g
Referenssi	4,25	101,01	-	4,29	7,29	108,30
Referenssi + pigmentti	5,86	101,00	1,73	6,02	10,04	112,77
Pulssilaser 50 ns + pigmentti	6,32	85,52	2,15	5,40	26,43	111,95

- Lietteen KAP-% ennen vesilisäystä on laskettu jakamalla bioliettemäärän sisältämä kuiva-aineen ja pigmentin massat lietteen ja pigmentin kokonaismassalla. Laserkäsitellyn näytteen KAP-% laskemisessa on huomioitu laserkäsitelyn aikana haihtuneen veden massa.

Taulukko III Näytteiden koostumukset kokeessa, jossa selvitettiin torrefioidun hiilen vaikutusta lasersäteen absorptioon.

Näyte	Torrefioitu hiili, g	Bioliete, g	Sekaliete, g
Referenssi + hiili < 38 $\mu\text{m}$ 1	0,22	48,62	53,31
Referenssi + hiili < 38 $\mu\text{m}$ 2	0,22	48,56	52,60
Referenssi + hiili > 100 $\mu\text{m}$ 1	0,21	48,52	52,80
Referenssi + hiili > 100 $\mu\text{m}$ 2	0,21	48,76	52,73
Pulssilaser 50 ns + hiili < 38 $\mu\text{m}$ 1	0,22	48,52	52,79
Pulssilaser 50 ns + hiili < 38 $\mu\text{m}$ 2	0,21	48,53	52,63
Pulssilaser 50 ns + hiili > 100 $\mu\text{m}$ 1	0,21	48,52	52,69
Pulssilaser 50 ns + hiili > 100 $\mu\text{m}$ 2	0,21	48,53	52,73

Taulukko IV Biolietenäytteiden koostumukset kokeessa, jossa verrattiin torrefioidun hiilen lisäämisen vaikutusta laserkäsiteltyjen näytteiden ja referenssien suodatukseen.

Näyte	Bioliete, g	Pigmentti, g	Torrefioitu hiili, g	Kokonaiskuiva-aine, g	Lisätty vesi, g	Suodatettu määrä, g
<b>Pulssilaser 50 ns + hiili &gt; 100 <math>\mu\text{m}</math></b>	58,78	1,42	3,02	7,25	18,00	73,03
<b>Referenssi + hiili &gt; 100 <math>\mu\text{m}</math></b>	75,00	1,48	3,00	7,40	5,04	77,18
<b>Pulssilaser 50 ns + hiili 63-100 <math>\mu\text{m}</math></b>	58,51	1,42	3,01	7,22	18,00	74,81
<b>Referenssi + hiili 63-100 <math>\mu\text{m}</math></b>	75,00	1,48	3,01	7,41	4,99	77,52
<b>Pulssilaser 50 ns + hiili &lt; 38 <math>\mu\text{m}</math></b>	57,89	1,40	3,00	7,16	17,97	73,86
<b>Referenssi + hiili &lt; 38 <math>\mu\text{m}</math></b>	75,00	1,48	3,00	7,40	5,02	77,23