



# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT  
School of Energy Systems  
Energiatekniikan koulutusohjelma

Teemu Aatsinki

## **Termiset käsittelymenetelmät energian ja ravinteiden talteenottoon puhdistamolietteestä**

Diplomityö  
2021

131 sivua, 30 kuvaa, 28 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: Dosentti, TkT Kari Myöhänen  
Apulaisprofessori, TkT Jouni Ritvanen

Hakusanat: puhdistamoliete, lietteen käsittely, energian talteenotto, ravinteiden talteenotto, prosessimalli

Yhdyskuntajätevedet käsitellään jätevedenpuhdistamoilla mekaanisesti, kemiallisesti ja biologisesti. Puhdistamolietteet syntyvät jätevedenpuhdistuksen lopputuotteena. Konventionaaliset käsittelymenetelmät, kuten lietteen kompostointi ja mädätys, ovat olleet vallalla lietteen loppukäsittelyyn. Liette sisältää arvokkaita ravinteita, kuten typpeä ja fosforia, jolloin lietteen hyötykäyttö ja ravinteiden kierrätys ovat tärkeässä asemassa lietteenkäsittelyn jälkeen.

Viime vuosina tehdyt tutkimukset ovat osoittaneet puhdistamolietteiden sisältävän merkittävästi orgaanisia haitta-aineita, mikromuoveja ja lääkejäämiä. Tämän diplomityön ensimmäisenä tavoitteena on selvittää kirjallisuuskatsauksena termisten käsittelymenetelmien potentiaalia lietteen loppukäsittelyyn. Termiset käsittelymenetelmät hävittävät lietteen sisältämiä haitta-aineita ja mikromuoveja konventionaalisia menetelmiä tehokkaammin. Myös energian ja ravinteiden talteenotto lietteistä on mahdollista. Termisistä menetelmistä tärkeimpiä ovat lietteen erillispoltto, kaasutus, pyrolyysi ja märkähiilto (HTC). Katsauksen mukaan erillispoltto on kehittyin ja potentiaalisin menetelmä huomioiden sekä energian ja ravinteiden talteenotto että haitta-aineiden ja mikromuovien hävitystehokkuus.

Maailmalta löytyy useita kehitettyjä termisen lietteenkäsittelyn teknologioita. Työssä tarkastellaan lähemmin Endev-teknologiaa, joka on Endev Oy:n kehittämä lietteen erillispoltto-tekniikka. Tämän diplomityön toisena tavoitteena on Endev-teknologian tarkastelu työssä kehitetyllä IPSEpro-pohjaisella prosessimallilla. Prosessimalli soveltuu Endev-teknologian massa- ja energiataseiden laskentaan määrättyihin tapauksiin. Monimutkaisempiin tarkasteluihin, kuten eri komponenttien lämmönsiirtoon, malli ei toimi riittävän luotettavasti. Mallilla tehdään skaalaustarkastelu Endev-teknologialle suunniteltuun kolmeen eri standardikokoluokkaan. Mallia käytetään myös herkkyystarkasteluihin prosessin eri muuttujille. Muuttujiksi valitaan lietteen kuiva-ainepitoisuus, tuhkapitoisuus ja orgaanisen aineksen koostumus. Kuiva-ainepitoisuus ja orgaanisen aineksen koostumus aiheuttavat huomattavimmat vaikutukset prosessin energia- ja massataseisiin mallilla tehtyjen tarkastelujen perusteella.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT  
School of Energy Systems  
Degree Programme in Energy Technology

Teemu Aatsinki

### **Thermal treatment methods for recovery of energy and nutrients from sewage sludge**

Master's Thesis

2021

131 pages, 30 figures, 28 tables and 2 appendices

Examiners: Adjunct Professor, D.Sc. (Tech.) Kari Myöhänen

Associate Professor (Tenure Track), D.Sc. (Tech.) Jouni Ritvanen

Keywords: sewage sludge, sludge treatment, energy recovery, nutrient recovery, process model

Municipal wastewater is treated mechanically, chemically and biologically at wastewater treatment plants. Sewage sludge is a final product of wastewater treatment. Conventional treatment methods, such as sludge composting and digestion, have been prevailing in sludge final treatment. Sludge contains valuable nutrients, such as nitrogen and phosphorus, making the sludge utilization and nutrient recovery important after the sludge treatment.

Studies in recent years have shown noticeable concentrations of organic contaminants, microplastics and drug residues in sewage sludges. The first aim of this thesis is to find out the potential of thermal treatment methods for sludge final treatment through a literature survey. Thermal treatment methods are more capable of disposing the contaminants and microplastics in sludges compared to conventional treatment methods. The recovery of energy and nutrients from sludges is possible as well. The most important thermal treatment methods are sludge mono-incineration, gasification, pyrolysis and hydrothermal carbonization (HTC). According to the survey, mono-incineration is the most developed and potential method considering both the recovery of energy and nutrients and the efficiency of disposal of contaminants and microplastics.

There are several thermal treatment methods developed for sludge treatment in the world. Endev-technology is examined in more detail which is a sludge mono-incineration technology developed by Endev Ltd. The second aim of this thesis is to study Endev-technology with an IPSEpro-based process model developed in the work. The process model is suitable for calculations mass and energy balances of Endev-technology in prescribed cases. The model is not reliable enough for more complex studies, such as heat transfer of the different components. The model is used for a scaling study in which Endev-technology is studied in three proposed standard size classes. The model is used for sensitivity studies of different variables of the process as well. The chosen variables are the dry matter content, the ash content and the composition of the organic matter of the sludge. Based on the studies with the model, the dry matter content and the organic matter composition cause the most noticeable effects on the energy and mass balances of the process.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan-Lahden teknillisellä yliopistolla marraskuun 2020 ja kesäkuun 2021 välisenä aikana. Työ tehtiin myös yhteistyössä Endev Oy:n kanssa. Haluaisin kiittää Lappeenrannan-Lahden teknilliseltä yliopistolta dosentti Kari Myöhästä tämän mielenkiintoisen aiheen tarjoamisesta ja myös hyvästä työn ohjauksesta. Haluaisin kiittää yliopistolta myös apulaisprofessori Jouni Ritvasta työn ohjauksesta ja hyvien kommenttien ja vinkkien antamisesta. Endev Oy:n puolelta haluaisin kiittää Petteri Peltolaa useampien pulmatilanteiden selvityksestä. Koko diplomityö on ollut pitkä, mielenkiintoinen ja opettavainen projekti.

Nämä monet opiskeluvuodet Lappeenrannassa ovat olleet minulle unohtumatonta aikaa. Haluaisin kiittää erityisesti perheenjäseniäni, jotka ovat olleet tukenani koko opiskelutaipaleeni ajan. Kiitos myös opiskelukavereilleni, joiden kanssa yhteiset vuodet opiskelujen parissa ovat vierähtäneet kuin siivillä. Kiitos kuuluu myös yliopiston energiatekniikan ja ympäristötekniikan opetushenkilökunnille, jotka ovat tarjonneet erittäin mielenkiintoisia kursseja ja hyvää opetusta. Näiden oppien kanssa on hyvä jatkaa eteenpäin!

Lappeenrannassa 20.6.2021

Teemu Aatsinki

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO .....	8
2	PUHDISTAMOLIETTEET JÄTEVEDENPUHDISTUKSESTA .....	13
2.1	Jätevedenpuhdistamon toiminta .....	15
2.1.1	Mekaaninen puhdistus.....	16
2.1.2	Biologinen puhdistus.....	17
2.1.3	Kemiallinen puhdistus.....	18
2.2	Lietteen koostumus.....	20
3	KONVENTIONAALISET KÄSITTELYMENETELMÄT LIETTEILLE.....	23
3.1	Mekaaninen kuivaus .....	24
3.2	Kemiallinen käsittely .....	26
3.3	Aerobinen käsittely – kompostointi.....	27
3.4	Anaerobinen käsittely – mädätys.....	28
4	TERMISET KÄSITTELYMENETELMÄT LIETTEILLE .....	31
4.1	Terminen kuivaus .....	32
4.2	Poltto erillispolttona .....	37
4.3	Poltto yhteispolttona.....	44
4.4	Kaasutus .....	45
4.5	Pyrolyysi.....	48
4.6	Märkähiilto (HTC).....	52
4.7	Terminen hydrolyysi (THP) .....	55
4.8	Hydroterminen nesteytys (HTL) .....	55
4.9	Ylikriittinen vesikaasutus (SCGW).....	56
5	ESIMERKKEJÄ KEHITETYISTÄ TEKNOLOGIOISTA MAAILMALLA.....	57
5.1	Outotec Sewage Sludge Incineration Plant .....	57
5.2	Huber SE & WTE sludge2energy .....	59
5.3	Sülzle KOPF SynGas sewage plant.....	60
5.4	PYREG®.....	62
5.5	Eisenmann Pyrobustor®.....	63
5.6	C-Green OxyPower HTC™ .....	65
5.7	TerraNova® Ultra.....	67
6	ENDEV-TEKNOLOGIA.....	70

6.1	Prosessin esittely .....	70
6.2	Energian ja ravinteiden talteenotto .....	72
6.3	Rovaniemen laitos .....	73
7	PROSESSIMALLI ENDEV-TEKNOLOGIASTA .....	75
7.1	Energia- ja massataseet.....	76
7.1.1	Kuivuri .....	76
7.1.2	Reaktori.....	79
7.2	IPSEpro-malli .....	81
7.3	Skaalaustarkastelu .....	85
7.4	Herkkyystarkastelu .....	93
7.4.1	Lietteen kuiva-ainepitoisuus .....	93
7.4.2	Lietteen tuhkapitoisuus .....	99
7.4.3	Lietteen orgaanisen aineksen koostumus.....	105
8	POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	113
8.1	Kirjallisuuskatsaus puhdistamolietteen termisistä käsittelymenetelmistä.....	113
8.2	Endev-teknologian tarkastelu .....	116
9	YHTEENVETO .....	122
	LÄHTEET .....	125

## LIITTEET

- Liite 1. Yhteenveto puhdistamolietteen termisistä käsittelymenetelmistä
- Liite 2. Endev-teknologia skaalaustarkastelun taseet

## SYMBOLILUETTELO

### Roomalaiset

$c_p$	ominaislämpökapasiteetti	kJ/kgK
$h$	ominaisentalpia	kJ/kg
$\dot{m}$	massavirta	kg/s
$p$	paine	bar
$q$	alempi lämpöarvo	kJ/kg
$Q$	energiamäärä	kWh/kg
$T$	lämpötila	°C

### Kreikkalaiset

$\lambda$	ilmakerroin	
$\eta$	energian talteenoton tehokkuus	
$\varphi$	suhteellinen kosteus	
$\Delta$	ero	
$\Phi$	lämpövirta	kW

### Alaindeksit

1	lietteen kuiva-aineen osuus ennen termistä kuivausta
2	lietteen kuiva-aineen osuus termisen kuivauksen jälkeen
DE	kuivaukseen käytetty energiamäärä (engl. Drying Energy)
EB	energiatase (engl. Energy Balance)
HR	poltosta talteen saatu lämpöenergia (engl. Heat Recovery)
el	sähkö (engl. electric)
th	lämpö (engl. thermal)
k	kuivuri
l	lauhdutin
pe	palamisilman esilämmitin
r	reaktori
h1	höyry lauhduttimeen
h2	lauhtunut vesi lauhduttimen jälkeen ulos prosessista

i,sisään	palamisilma prosessiin
i1	palamisilma palamisilman esilämmittimeen
i2	palamisilma reaktoriin
ju,sisään	jähdytysvesi prosessiin
ju1	jähdytysvesi lauhduttimeen
ju2	jähdytysvesi reaktoriin
ju3	jähdytysvesi reaktorin jälkeen ulos prosessista
pa1	märkä liete-hiekkaseos kuivurin lämmitysosaan
pa2	kuiva liete-hiekkaseos reaktoriin
sk1	savukaasu palamisilman esilämmittimeen
sk2	savukaasu kuivuriin
sk3	savukaasu kuivurin jälkeen ulos prosessista

### **Lyhenteet**

CHP	Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto (engl. Combined Heat and Power)
DM	Kuiva-aine (engl. Dry Matter)
ODM	Orgaaninen kuiva-aine (engl. Organic Dry Matter)
TS	Kuiva-aine (engl. Total Solids)



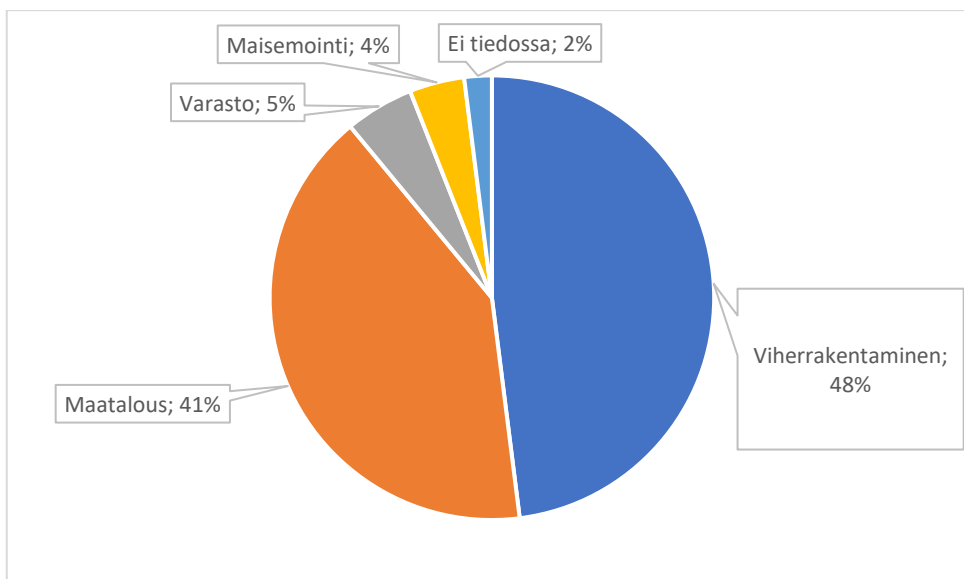
## 1 JOHDANTO

Puhdistamolietteellä tarkoitetaan jätevedenpuhdistuksen lopputuotteena syntyvää jätettä, johon yhdyskunnissa ja teollisuudessa syntyvistä jätevesistä poistetut haitta-aineet ja ravinteet ovat sitoutuneet. Puhdistamoliete sisältää vettä, orgaanista ainesta ja epäorgaanista ainesta (tuhkaa). Puhdistamolietettä on vanhastaan pidettykin jätteenä, joka tulisi käsitellä mahdollisimman haitattomaan tilaan ihmisten ja ympäristön kannalta ennen sen loppusijoitusta. Sen sijaan että puhdistamoliete nähtäisiin jätteenä, tulisi siitä nykyisin puhua enemmänkin raaka-aineena. Tästä raaka-aineesta olisi mahdollista ottaa talteen sekä energiaa että myös arvokkaita ravinteita, etenkin fosforia ja typpeä.

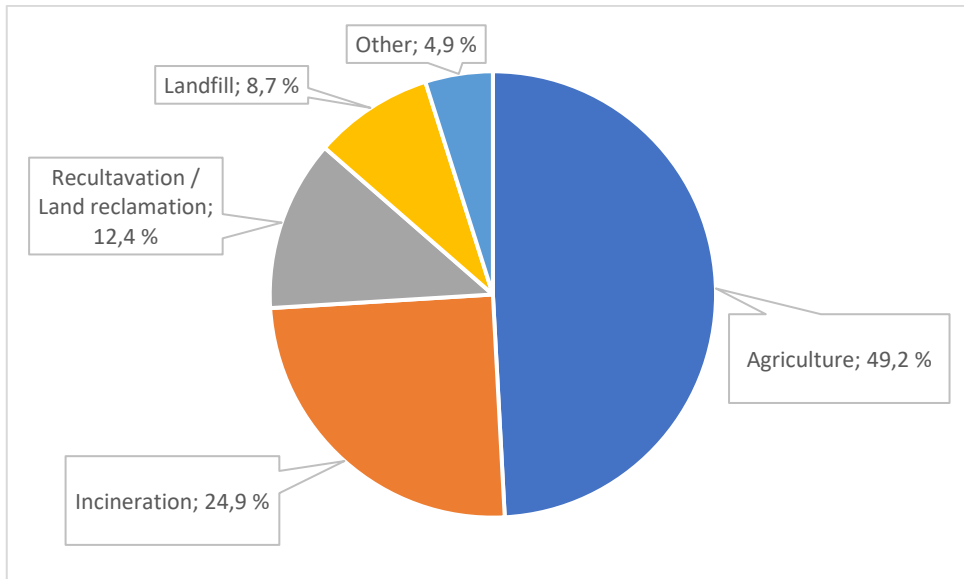
Suomessa ja myös muualla Euroopassa pitkään kasvanut trendi on ollut puhdistamolietteen hyödyntäminen materiaalina kaatopaikalle tehtävän loppusijoituksen sijaan. Ns. konventionaalisilla käsittelymenetelmillä, kuten kompostoinnilla, mädätyksellä tai kemiallisilla menetelmillä puhdistamoliete käsitellään mahdollisimman turvalliseen tilaan ympäristön kannalta ennen sen hyötykäyttöä. Puhdistamolietettä on käytetty hyödyksi niin viherrakentamisessa kuin maataloudessa. Maataloudessa puhdistamolietettä on käytetty lannoituskäytössä viljelyyn sen sisältämien ravinteiden takia. Maatalouskäyttöä onkin pitkään rohkaistu parhaana hyötykäyttönä lietteelle, jolloin lietteen ravinteet saadaan takaisin kiertoon ja voidaan vähentää keinotekoisien väkilannoitteiden tuotantomääriä viljelyssä. Suomen lannoitevalmistelainsäädännön mukaan puhdistamolietepohjaiset tuotteet ovat maanparannusaineita, joiden vaikutus perustuu niiden kykyyn parantaa kasvien kasvuedellytyksiä lietteen sisältämän orgaanisen aineen ansiosta (ProAgria 2013, 14). Maataloudessa lietettä on saanut käyttää pelloilla, joilla kasvatetaan viljaa, sokerijuurikasta, öljykasveja tai sellaisia kasveja, joita ei yleensä käytetä ravinnoksi tuoreena tai syömällä maanalainen osa (Keränen 2018). Lietteen sisältämät ravinteet saadaan kasvien käyttöön niin viherrakentamisessa kuin maatalouskäytössä.

Puhdistamolietteiden hyödyntäminen on mennyt voimakkaasti eteenpäin 2000-luvulla. Vuonna 1997 EU:n alueella lietteistä noin 40 % sijoitettiin kaatopaikalle, 37 % hyödynnettiin maataloudessa ja viherrakentamisessa ja noin 11 % poltettiin (Lohiniva et al. 2001, 21). Vuonna 1995 Suomessa miltei puolet lietteestä päätyi kaatopaikalle ja hieman yli puolet hyödynnettiin maataloudessa ja viherrakentamisessa (Lohiniva et al. 2001, 22). Vuonna

2016 maataloudessa ja viherrakentamisessa hyödynnettävän puhdistamolietteen osuus Suomessa oli lähes 90 % (maatalous 41 % ja viherrakentaminen 48 %), kun kaatopaikkasijoitus on pudonnut lähes nolnaan. Myös Euroopan Unionin alueella maataloudessa hyödynnettävän lietteen määrä oli noussut lähes puoleen ja kaatopaikkasijoitus pienentynyt alle 10 %:tiin. Suomessa syntyvä yhdyskuntajätevesien puhdistuksesta syntyvä puhdistamoliettemäärä on kuiva-aineena noin 140 000 t/a (Alakangas et al. 2016, 165). Euroopan Unionin alueella puhdistamolietteitä syntyy kuiva-aineena noin 11 500 000 t/a (Durdevic et al. 2019, 3). Puhdistamolietteen laatu on parantunut jatkuvasti, etenkin raskasmetallien pitoisuudet ovat nykyisin erittäin pienet ja taudinaiheuttajat on saatu lietteistä hävitettyä käytännössä kokonaan (ProAgria 2013, 9). Kun konventionaalisista käsittelymenetelmistä mädätyksellä saadaan lietteestä energiaakin talteen ja mädätys on lisääntynyt suuresti, näytti tilanne energian ja ravinteiden talteenoton kannalta pitkään hyvin valoisalta. Kuvassa 1 on esitettyä puhdistamolietteen loppukäyttöä Suomessa vuonna 2016 ja kuvassa 2 puhdistamolietteen loppukäyttöä Euroopan Unionin alueella vuonna 2017.



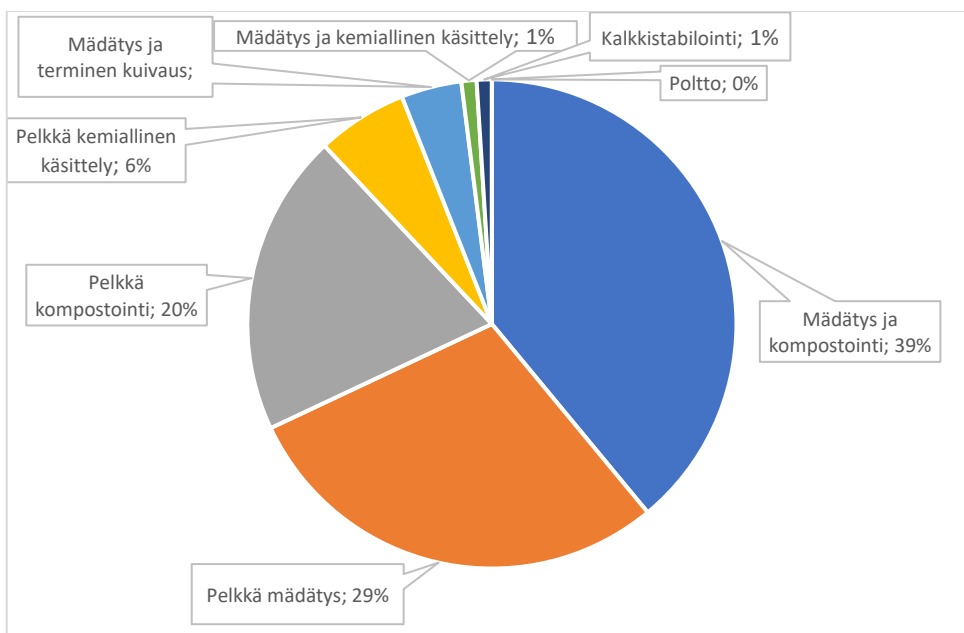
**Kuva 1.** Lietteiden käyttö Suomessa vuonna 2016 (Motiva 2018b, 2).



**Kuva 2.** Lietteiden käyttö EU:n alueella vuonna 2017 (ESPP 2019, 32).

Vasta aivan viime vuosina tilanne puhdistamolietteiden hyötykäytön suhteen on muuttunut radikaalisti. Lietteestä on viime vuosina löydetty yhä kasvavissa määrin erilaisia orgaanisia haitta-aineita, lääkejäämiä, huumeita ja mikromuoveja, joiden määrät yhdyskuntajätevesissä ovat kasvaneet ja jotka päätyvät lietteeseen yhä etenevässä määrin jätevedenkäsittelyn tehossa. Orgaanisia haitta-aineita ovat mm. muoveissa ja tekstiileissä käytetyt bromatut palonestoaineet, elektroniikkateollisuudessa ja liuottimissa käytetyt PCB-yhdisteet (Polyklooratut bifenyylit) sekä vaatteissa ja paperituotteissa käytetyt PFAS-yhdisteet (Perfluoratut alkyliyhdisteet) (ProAgria 2013, 11–12). Vaikka joidenkin haitta-aineiden käyttö onkin sittemmin kielletty, niitä esiintyy vielä vanhastaan erilaisissa tuotteissa. Haitta-aineiden lisääntyneet määrät lietteissä ovat johtaneet siihen, että esimerkiksi Suomessa Fazer lopetti kesällä 2018 puhdistamolietteellä kasvatetun viljan ostamisen (Keränen 2018). Myös muualta elintarviketeollisuudesta painostus ns. lieteviljaa kohtaan on kasvanut voimakkaaksi ja myös Viking Malt on lopettanut lietteellä kasvatetun viljan oston. Ruotsissa hallitus käynnisti vuonna 2018 hankkeen puhdistamolietteen kieltämisestä viljelyssä ja fosforin talteenoton pakollistamista lietteestä (ESPP 2019, 36). Sveitsissä puolestaan lietteiden käyttö on kielletty jo vuonna 2006 ja fosforin talteenotto lietteestä (lietteen poltossa syntyvästä tuhkasta) on tulossa pakolliseksi vuonna 2026. (ESPP 2019, 18). Saksassa on suunnitelmia rajoittaa 2020-luvulla lietteiden levittämistä pelloille (Keränen 2018).

Suomessa vuonna 2019 tehdyn tutkimuksen mukaan riskit puhdistamolietteiden sisältämien raskasmetallien ja orgaanisten haitta-aineiden kulku ihmisravinnon tai juomaveden kautta ihmiseen on vähäistä. Lisätutkimuksia kuitenkin vielä mikromuoveille ja lääkejäämille. Tutkimuksen mukaan myös haitta-aineiden riskiä ympäristölle ei voi sulkea kokonaan pois ja lisätutkimuksia etenkin vaikutuksista maaperän eliöille tarvitaan. Erityisesti viherrakentamisessa maaperän ja pohjaveden eliöt voivat altistua varsin korkeille haitta-ainepitoisuuksille. (Luonnonvarakeskus 2019.) Puhdistamolietteen välttäminen on muodostunut myös imago-oiksymykseksi etenkin maataloudessa ja ruoantuotannossa, jolloin kestävän kehityksen mukaisesti haitta-aineet on tuhottava hallitusti ennen hyötykäyttöä. Vaikka haitta-aineet eivät ihmisiin päätyisivätkään, ne päätyvät silti maaperään ja vesistöihin, joista ne halutaan pois jo jätevedenpuhdistuksen yhteydessä. Konventionaaliset lietteenkäsittelymenetelmät ovat todistetusti riittämättömiä hävittämään haitta-aineita, joten uusia ratkaisuja tarvitaan. Kuvassa 3 on esitettyä lietteen käsittelymenetelmiä Suomessa vuonna 2016.



**Kuva 3.** Lietteenkäsittelymenetelmät Suomessa vuonna 2016 (Motiva 2018b, 2).

Termisillä lietteenkäsittelymenetelmillä on potentiaali nousta tulevaisuudessa merkittävään osaan puhdistamolietteen käsittelyssä. Monet termiset käsittelymenetelmät kykenevät hävittämään lietteen haitta-aineita tehokkaammin ja myös ravinteiden talteenotto on mahdollista. Tämän lisäksi myös energian talteenotto on mahdollista. Tällä hetkellä termisistä menetelmistä poltto on jo isossa asemassa etenkin Keski-Euroopassa, mutta Suomessa poltto on

vielä hyvin vähäistä. Perinteisesti poltto on katsottu lietteen ravinteiden menetykseksi, eikä sitä ole vanhastaan pidetty hyvänä vaihtoehtona ravinnekierrätyksen takia. Etenkin fosfori vähentyvänä luonnonvarana on talteenoton kannalta arvokas ravinne. Puhdistamolietteessä olevan kokonaisfosforin arvioidaan Euroopan Unionin alueella olevan noin 297 000 t/a (ESPP 2019, 31). Uudet mahdollisuudet ravinteiden talteenottoon niin poltossa kuin muissa termisissä menetelmissä ovat nostaneet ne ohi konventionaalisten käsittelymenetelmien ja tulevat palvelemaan tulevaisuudessa puhdistamolietteen käsittelyssä niin energian talteenottoa, ravinnekierrätystä kuin haitta-aineidenkin tehokkaampaa hävitystä.

Työn ensimmäisenä tavoitteena on tutkia kirjallisuuskatsauksena eri termisten lietteenkäsittelymenetelmien soveltuvuutta ja potentiaalia sekä energian että ravinteiden talteenottoon. Työssä tarkastellaan myös kehitettyjä termisen lietteenkäsittelyn teknologioita eri valmistajilta. Kehitetyistä teknologioista työn keskiöissä on Endev-teknologia, joka on LUT-yliopiston ja Endev Oy:n yhteistyössä kehittämä termisen lietteenkäsittelymenetelmä. Työn toisena tavoitteena on tarkastella Endev-teknologiaa työssä kehitetyn prosessimallin avulla. Prosessimalli on luonteeltaan massa- ja energiatasemalli, jonka kehittämisessä käytetään IPSEpro-nimistä prosessisimulointiohjelmaa. Prosessimallia käytetään sekä prosessin tarkastelussa kolmeen eri standardikokoluokkaan että herkkyystarkasteluun prosessin keskeisille muuttujille.

## 2 PUHDISTAMOLIETTEET JÄTEVEDENPUHDISTUKSESTA

Jätevedenpuhdistamoille tuleva yhdyskuntajätevesi on peräisin kotitalouksista viemäriin johdettavista jätevesistä, joita syntyy mm. WC-tiloista, keittiöstä, astian- ja pyykinpesukoneista sekä suihkuista. Yhdyskuntajätevesissä on yleensä myös pienteollisuuden ja palveluiden (esim. ravintolat) jätevesiä. Jätevesi sisältää mm. kiintoainesta, mikrobeja, orgaanista ainetta, ravinteita ja metalleja. Ne ovat jätevedessä joko partikkeleina, kolloideina tai liuenneina. (Mikola 2018, 5.) Molekyylikooltaan suurimpia orgaanisia aineita ovat proteiinit, hiilihydraatit, rasvat ja öljyt (Lohiniva et al. 2001, 18).

Esimerkiksi Suomessa yhdyskuntien jätevettä muodostuu Suomessa vuosittain yhteensä noin 500 miljoonaa kuutiometriä eli asukasta kohden noin 300 litraa vuorokaudessa (Säylä 2015, 7). Suomessa jätevedenpuhdistuksen taso on ollut jo pitkään erittäin hyvällä tasolla ja kaikki kunnalliseen viemäriverkostoon johdetut jätevedet puhdistetaan ennen niiden johtamista vesistöihin. Suomessa yli 80 prosenttia asukkaista on keskitetyn viemäröinnin ja yhdyskuntajätevedenkäsittelyn piirissä ja yli 50 asukkaan jätevesiä käsitteleviä jätevedenpuhdistamoja oli Suomessa noin 540 kpl vuonna 2013 (ProAgria 2013, 4). Haja-asutusalueilla on yleensä kiinteistökohtainen käsittely tai muutaman kiinteistön yhteinen pienpuhdistamo tai umpisäiliö (Mikola 2018, 5).

Yhdyskuntajätevedellä on ympäristölle haitallisia ominaisuuksia. Puhdistamoilla keskitytään poistamaan kiinteitä aineita, orgaanista eli eloperäistä ainetta ja ravinteita. (Säylä 2015, 7.) Myös patogeenisiä mikrobeja ja myrkyllisiä aineita, kuten esimerkiksi raskasmetalleja, halutaan vähentää vesistöistä. (Mikola 2018, 9). Lääkeaineiden, hormonien ja palonestoaineiden lisääntyneet määrät jätevesissä aiheuttavat tulevaisuudessa huolta yhä enemmän ja niiden poistoa pyritään tehostamaan entisestään (Mikola 2018, 21).

Orgaaninen aines aiheuttaa vesistöissä happikatoa ja edistää rehevöitymistä. Suomessa sitä mitataan jätevesinäytteestä analysoimalla seitsemän päivän aikana hapenkulutusta, jonka yksikkö on BHK<sub>7</sub> eli BOD<sub>7</sub> (biologinen hapenkulutus eli biological oxygen demand). Orgaanista ainetta joutuu jätevesiin lähinnä ihmisten ulosteissa ja teollisuuden jätevesissä. Fosfori on levien kasvua ja vesien rehevöitymistä aiheuttava ravinne. Jätevesien fosfori on peräisin lähinnä ihmisten ulosteista ja virtsasta sekä fosfaattipitoisista pesuaineista. Typpi on

toinen merkittävä vesistöjen rehevöitymistä aiheuttava ravinne. Typeä tulee jätevesiin lähinnä ihmisten virtsasta, mutta myös ulosteista ja muista lähteistä. (Säylä 2015, 7–8.)

Yhdyskuntajätevesidirektiivi määrittelee jätevesien käsittelylle vaatimuksia puhdistamoilta lähtevän jäteveden pitoisuuksille ja poistoteholle. Vaatimuksia annetaan biologiselle hapenkulutukselle, kemialliselle hapenkulutukselle (KHK eli COD), kiintoaineelle, kokonaisfosforille ja kokonaistypelle. Direktiivissä määritellään myös puhdistamoiden kokoluokat perustuen asukasvastinelukuun (AVL), joka kuvaa yhden asukkaan tuottaman jäteveden keskimääräistä eloperäisten aineiden vuorokausikuormitusta. Siihen vaikuttavat sekä ihmisperäinen että teollisuudesta tuleva jäteveden orgaaninen kuormitus. Direktiivin pohjalta tehty yhdyskuntajätevesiasetus säättää puhdistamoille puhdistustehon ja tarkkailun vähimmäisvaatimukset, jotka kiristyvät puhdistamon koon kasvaessa. Ympäristönsuojelulain mukaan kulakin yli 100 asukasvastineluvun omaavalla puhdistamolla on oltava ympäristölupa, jossa määrätään tarkemmin jätevesien käsittelyvaatimukset puhdistamokohtaisesti. (Säylä 2015, 9.)

Teollisuusjätevedet poikkeavat kotitalouksien jätevesistä. Teollisuus käsittelee monesti omat jätevetensä, mutta osa niistä ohjataan kunnallisille jätevedenpuhdistamoille. Mikäli teollisuuslaitos ohjaa jätevetensä kunnalliseen viemäriverkostoon ja sen koostumus poikkeaa selvästi kotitalouksien jätevesistä, on sen tehtävät teollisuusjätevesisopimus kunnallisen vesihuoltoyhtiön kanssa. Sopimuksessa määritetään rajoituksia viemäriin johdettaville jätevesille, jotta jätevedenpuhdistus olisi turvallista. Tämä voi edellyttää teollisuuslaitokselta jäteveden esikäsitteilyä ennen sen johtamista viemäriverkostoon. Esimerkiksi pienteollisuuden, kuten elintarvike-, maali- ja kemianteollisuuden jätevesiä ohjataan kunnalliseen viemäriverkostoon. Myös huoltamoiden, pesuloiden ja ravintoloiden jätevedet kuuluvat teollisuusjätevesisopimusten alle. Kunnallisen viemäriverkoston ja jätevedenpuhdistamoiden toimintojen turvaamiseksi viemäriverkostoon ei saa johtaa sellaisia haitta-ainepitoisuuksia sisältäviä jätevesiä, joista on säädetty valtioneuvoston päätöksissä tai viranomaismääräyksissä tai jotka ovat vahingollisia viemäreille, pumppaamoille tai lietteen käsittelylle. Tällaisia ovat esimerkiksi palo- ja räjähdysvaaraa aiheuttavat aineet, myrkyt tai myrkyllisiä kaasuja muodostavat aineet tai hapot. (Kouvolan Vesi 2013.)

## 2.1 Jätevedenpuhdistamon toiminta

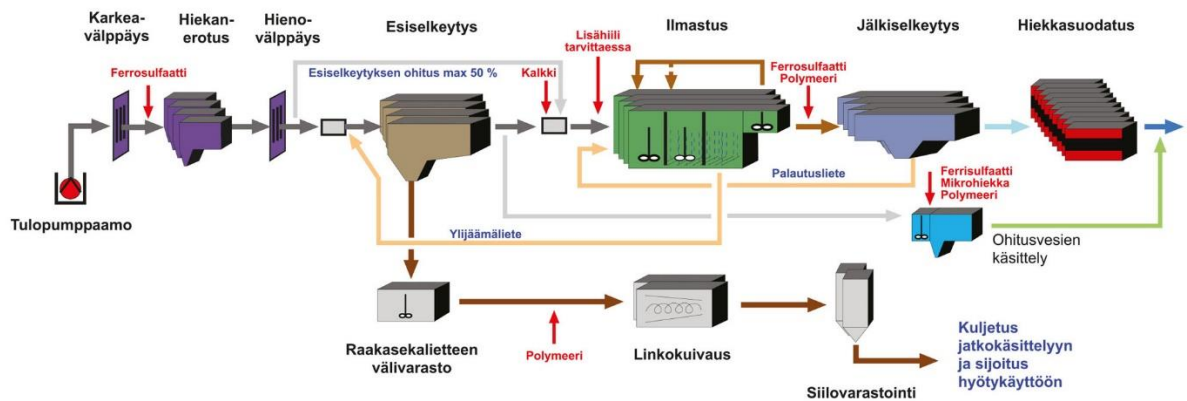
Yleinen ja laajasti käytössä oleva tekniikka jätevesien puhdistamiseen on ns. biologis-kemiallinen rinnakkaissaostus (Säylä 2015, 7). Rinnakkaissaostuksessa orgaanista ainetta ja typpeä poistetaan biologisin menetelmin ja fosforia kemiallisella saostuksella. Puhdistamot ovat käytännössä jo pitkään saavuttaneet yli 95 % poistotehon orgaanisen aineen ja fosforin poistossa. Typen poistossa puhdistusteho oli noin 58 % vuonna 2013. Typen puhdistusteho on kasvanut huomattavasti esimerkiksi 1970-luvulta, jolloin puhdistusteho oli vain noin 20 %. Typpikuormitus vesistöihin on pysynyt kuitenkin suunnilleen samalla tasolla 1970-luvulta, sillä jätevesien typpikuorma on noussut johtuen esimerkiksi taajamissa asuvan väestön voimakkaasta kasvusta. (Säylä 2015, 11.) Suomessa vuonna 2013 yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilta johdettiin vesistöihin orgaanista ainetta 3 520 tonnia, fosforia 157 tonnia ja typpeä 10 900 tonnia (Säylä 2015, 17). Taulukossa 1 on esitettyä puhdistamolle tulevan käsittelemättömän jäteveden ja puhdistamolta lähtevän käsitellyn jäteveden tunnuslukuja Suomessa vuonna 2013.

**Taulukko 1.** Jäteveden tunnuslukuja Suomessa vuonna 2013 (Säylä 2015, 17).

	Käsittelemätön jätevesi	Käsitelty jätevesi
Orgaanisen aineen keskimääräinen pitoisuus	256 mg/l	7,1 mg/l
Kokonaisfosforin keskimääräinen pitoisuus	8,0 mg/l	0,3 mg/l
Kokonaistypen keskimääräinen pitoisuus	52,1 mg/l	21,9 mg/l

Puhdistamolietteellä tarkoitetaan yhdyskuntajätevesien puhdistuksessa syntyvää lietettä, joka sisältää puhdistamolle tulevan jäteveden kiintoainesta ja puhdistusprosessissa kiintoainemuotoon saatettua ainesta. Käytännössä jätevedenpuhdistusprosessi tyypillisellä rinnakkaissaostuslaitoksella koostuu kolmesta puhdistusmenetelmästä, joita ovat mekaaninen puhdistus, kemiallinen puhdistus ja biologinen puhdistus (Mikola 2018, 14–17). Kiintoaine erotetaan puhdistusprosessissa lietteenä ja erotettu liete koostuu jätevedestä poistetusta orgaanisesta ja epäorgaanisesta aineesta. Suomessa yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla syntyi puhdistamolietettä noin miljoona tonnia vuonna 2010, mikä vastasi kuiva-aineena noin 143 000 tonnia (Alakangas et al. 2016, 165). Kuvassa 4 on esitettyä tyypillisen jätevedenpuhdistamon prosessikaavio.





**Kuva 4.** Jätevedenpuhdistusprosessi Kakolanmäen puhdistamolla (Turun seudun puhdistamo 2016a).

### 2.1.1 Mekaaninen puhdistus

Jäteveden mekaaninen puhdistus sisältää puhdistamolle tulevan jäteveden esikäsitteilyn ja esiselkeytyksen (Mikola 2018, 14). Esikäsitteilyyn kuuluu kuvassa 4 esitetyt välppäys ja hiekanerotus. Jätevesi kulkee ensin karkeavälppäyksen läpi, jossa terässäleikkö (Kakolanmäen puhdistamolla 10 mm säleikkö) erottaa jätevedestä suuremmat roskat. Viemäriin päätyy myös kaduilta sadevesien mukana tulevaa hiekkaa, joka erotetaan seuraavassa hiekanerotusvaiheessa. Hiekanerotuksessa jätevesi johdetaan hiekanerotusaltaaseen, jossa hiekka ja raskas kiintoaines laskeutuvat painovoimaisesti altaan pohjalle. Hiekanerotuksessa tapahtuu myös rasvanerotus ja jäteveden esi-ilmastus. Rasva ja kevyt kiintoaines nousevat veteen johdetun ilman avulla jäteveden pintaan, jossa ne poistetaan pintakaavintana. Hiekanerotuksen jälkeen jätevesi kulkee tiheämmän hienovälppäyksen läpi (Kakolanmäen puhdistamolla 3 mm säleikkö), jossa jätevedestä erotetaan vielä pienempiä roskia. Välppäyksessä ja hiekanerotuksessa erotetut hiekka, rasva ja välpe kuljetetaan puhdistamolta jatkokäsittelyyn. (Turun seudun puhdistamo 2016b.) Esikäsitteilyssä erotetut hiekka, rasva ja välpe eivät päädy varsinaiseen puhdistamolietteeseen, vaan käsitellään erikseen omina jakeinaan.

Esikäsitteilyn jälkeen jätevesi ohjataan esiselkeytysaltaisiin. Vesi kulkee altaiden läpi ja suuri osa jäteveden sisältämästä kiintoaineesta laskeutuu painovoimaisesti altaan pohjalle. Altaan pohjalta kiintoainesta kootaan kaapimilla suppilonmuotoisiin liettaskuihin. Esiselkeytyksen liettaskuihin kerääntynyt liete pumpataan eteenpäin lietteen varastointialtaaseen ja

sieltä eteenpäin lietteen käsittelyyn. (Turun seudun puhdistamo 2016c.) Esiselkeytyksessä poistettavaa kiintoainesta nimitetään raakalietteeksi tai primäärilietteeksi, joka on osa lietteen käsittelyyn lähtevää puhdistamolietettä. Primäärilietteen osuus koko puhdistamolietteestä on tyypillisesti noin 60 % (Motiva 2018a, 2).

### 2.1.2 Biologinen puhdistus

Biologinen puhdistus on koko jätevedenpuhdistuksen ydin. Biologisella puhdistuksella jätevedestä erotetaan orgaanista ainesta ja tyypeä mikrobien avulla. Yleisin tapa toteuttaa biologinen puhdistus on aktiivilieteprosessi, jossa mikrobit käyttävät hyväkseen jätevedessä olevia liuenneita ravinteita ja orgaanisia yhdisteitä. Aktiiviliete on mikrobeista ja muusta biomassasta koostuvaa kiintoainemassaa eli lietettä. Tavoitteena aktiivilieteprosessissa on, että poistettavat aineet siirtyvät mikrobisolujen sisään ja niiden poistamiseen jätevedestä riittää mikrobisolujen erottaminen vedestä. Suurin osa jäteveden orgaanisesta aineesta saadaankin poistettua aktiivilieteprosessissa biologisesti. (Turun seudun puhdistamo 2016d). Mikrobitoiminnan tuloksena syntyy kaasumaisina aineina hiilidioksidia ( $\text{CO}_2$ ) ja typpikaasua ( $\text{N}_2$ ), jotka johdetaan ilmakehään. Tietyissä olosuhteissa syntyy myös metaania ( $\text{CH}_4$ ) ja typpioksiduulia ( $\text{N}_2\text{O}$ ), jotka ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja. (Mikola 2018, 22.)

Perinteistä aktiivilieteprosessia voidaan tehostaa typenpoiston osalta siten, että osa typenpoitosta tapahtuu ilmastuksen alussa hapettomissa olosuhteissa. Aktiivilietemenetelmä vaatii toimiakseen veteen liuennutta happea, jota saadaan puhaltamalla prosessiin kompressoireilla ilmaa. Koko aktiivilieteprosessi tapahtuu ilmastusaltaissa, jossa tehostetussa typenpoitossa alkupään osastot ovat kuitenkin muutettu hapettomiksi. Hapettomissa alkupään osastoissa typenpoistoon erikoistuneet mikrobit käyttävät tyypeä sisältävää nitraattia hapen sijaan soluhengitykseen. Hapettomien olosuhteiden ylläpito vaatii jäteveden hyvää sekoi-tusta ja nitraattipitoisen lietteen kierrätystä ilmastuksen loppupäästä takaisin alkupäähän (ns. typpikierto). Ammoniumtypen ja orgaanisen aineen poisto tapahtuu ilmastuksen loppupään osastoissa hapellisissa olosuhteissa. (Turun seudun puhdistamo 2016d.) Ammoniumtyppi muuttuu hapellisissa loppupään osastoissa ensin nitriitiksi ( $\text{NO}_2^-$ ) ja sen jälkeen nitraatiksi ( $\text{NO}_3^-$ ) (nitrifikaatio). Typpikierrossa nitraattipitoista lietettä palautetaan alkupään hapettomiin osastoihin, jossa lietteessä olevan orgaanisen hiilen läsnä ollessa nitraattia muuttuu typ-

pikaasuksi. (denitrifikaatio) (Metcalf & Eddy 2003, 617.) Poistetusta typestä noin 30 % sitoutuu lietteen orgaaniseen ainekseen ja loppuosa päätyy typpikaasuna ilmakehään (ProAgria 2013, 28).

Ilmastusaltaassa kasvanut mikrobien muodostama kiinteä biomassa poistetaan jätevedestä ilmastuksen jälkeen jälkiselkeytysaltaissa. Jälkiselkeytyksessä toimii samalla periaatteella kuin esiselkeytyksessä eli kiintoaine laskeutetaan painovoimaisesti alaiden pohjalle ja sieltä kaapimilla lietetaskuihin. Jälkiselkeytysaltaista kerätty bioliete palautetaan kuitenkin palautuslietteenä takaisin ilmastusaltaan alkupäähän. (Turun seudun puhdistamo 2016e.) Näin mikrobikasvustoa on aina riittävästi koko ilmastusprosessissa puhdistamassa jätevedestä orgaanista ainesta ja ravinteita. Ilmastuksesta lietettä poistetaan tarvittaessa ylijäämälietteenä eli sekundäärilietteenä ilmastuksen loppupäästä ja ohjataan esiselkeytykseen, jossa se päätyy raakalietteen eli primäärilietteen sekaan. (Turun seudun puhdistamo 2016d). Tyypillisesti raakaliete ja ylijäämäliete yhdistetään puhdistamoilla ns. raakasekalietteeksi, joka muodostaa koko käsittelyyn lähtevän puhdistamolietteen (ProAgria 2013, 29). Ylijäämälietteen osuus koko puhdistamolietteestä on tyypillisesti noin 40 % (Motiva 2018a, 2). Raakaliete ja ylijäämäliete voidaan tarvittaessa ohjata käsittelyyn myös erikseen omina jakeinaan.

### **2.1.3 Kemiallinen puhdistus**

Jäteveden kemiallisen puhdistuksen päätavoitteena on fosforin poisto jätevesistä. Orgaaninen aines ja typpi saadaan poistettua biologisesti, mutta fosfori joudutaan poistamaan kemiallisesti lisäämällä jätevetteen rauta- ja alumiinisuoloja fosforin saostusta varten. (Mikola 2018, 15.) Fosforia voitaisiin poistaa myös biologisesti, mutta kemiallisella saostuksella saavutetaan parempi poistoteho (ProAgria 2013, 28). Esimerkiksi Kakolanmäen puhdistamolla käytetään ferrosulfaattia ( $\text{FeSO}_4$ ) saostuskemikaalina, joka reagoi jätevedessä olevan fosforin kanssa. Ferrosulfaatti lisätään jätevetteen välppäyksen ja hiekanerotuksen yhteydessä. Tällöin fosforia saostetaan jätevedestä erilleen rinnakkain biologisen käsittelyn kanssa, jolloin puhutaan rinnakkaissaostuksesta. Ferrosulfaatti reagoi jätevedessä olevan liuenneen fosforin kanssa ja saostaa sitä kiinteään olomuotoon. Noin puolet fosforista saadaan poistettua kemiallisesti ennen ilmastusvaihetta esiselkeytyksessä, jossa fosforia sitoutuu muuhun kiintoaineeseen ja laskeutuu painovoimaisesti lietteen esiselkeytysaltaan pohjalle. Jäljellä oleva fosfori saostuu esiselkeytyksen jälkeen ilmastusaltaassa sitoutuen aktiivilietteeseen ja

ilmastusaltaasta takaisin esiselkeytykseen poistettavaan ylijäämälietteeseen. (Turun seudun puhdistamo 2016d.)

Kemialliseen puhdistukseen lasketaan myös kuuluvaksi muiden kemikaalien, kuten polymeerien, lisäys sekä jälkiselkeytyksen jälkeinen tertiäärikäsittely ja hygienisointi. (Mikola 2018, 15.) Esimerkiksi Kakolanmäen puhdistamolla käytetään hiekkasuodatusta jäteveden tertiäärikäsittelyä (Turun seudun puhdistamo 2016a). Hiekkasuodatuksessa hiekkapatjaan suodattunut kiintoaine pestään pois hiekkapatjasta ilmalla ja vedellä ja pesusta poistuva jätevesi johdetaan tasaussäiliön kautta takaisin koko laitosprosessin alkuun uutta puhdistuskierrosta varten. Hiekkasuodatuksen tehtävänä on myös toimia laadun varmistajana, jos sitä edeltävissä prosesseissa tapahtuu häiriöitä. Myös veden hygieeninen taso saadaan paremmaksi hiekkasuodatuksessa. (Turun seudun puhdistamo 2016f.)

Polymeeriä voidaan käyttää tehostamaan kiintoaineen laskeutumista jälkiselkeytyksessä. Esimerkiksi Kakolanmäen puhdistamolla ilmastuksesta jälkiselkeytykseen menevään veteen lisätään pieni annos ferrosulfaattia ja polymeeriä, joka auttaa kiintoaineen laskeutumista jälkiselkeytysaltaiden pohjalle. (Turun seudun puhdistamo 2020e.) Kemiallinen puhdistus on tarkoitettu lähinnä fosforin erotusta varten, mutta kemiallisesti voidaan poistaa myös orgaanista ainetta jätevesistä. Tilanteissa, joissa puhdistamolle tulevan jäteveden virtaama ylittää biologisen prosessin maksimikapasiteetin, voidaan osa tulevasta jätevedestä puhdistaa esiselkeytyksen jälkeen erillisessä ohitusvesienkäsittelyssä kokonaan kemiallisesti. Tällöin puhdistuksessa voidaan käyttää ferrisulfaattia ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) ja polymeeriä saostamaan vedestä orgaanista ainesta ja fosforia lietteeksi mikrohiekan sekaan. Mikrohiekkä erotetaan tällöin lietteestä uudelleenkäyttöä varten ja liete palautetaan takaisin esiselkeytykseen ylijäämälietteenä. (Turun seudun puhdistamo 2016g.)

Muita puhdistuksessa käytettäviä kemikaaleja ovat mm. kalsiumkarbonaatti (kalkki) ja metanoli. Kalsiumkarbonaattia käytetään veden pH-arvon ja alkaliteetin säätöön prosessiolosuhteiden parantamiseksi. Metanolia voidaan käyttää tarvittaessa lisähiililähteenä tehostamaan ilmastuksen typenpoistoprosessia. (Turun seudun puhdistamo 2016d.)

## 2.2 Lietteen koostumus

Jätevedenpuhdistamolla muodostuvan puhdistamolietteen koostumus määräytyy puhdistamolle tulevan jäteveden koostumuksen mukaan. Tähän vaikuttaa erityisesti teollisuuden jätevesien määrä yhdyskuntajätevesissä, etenkin orgaanista ainesta päätyy jätevedenpuhdistamoille enemmän teollisuuden jätevesistä, kun taas ravinteita enemmän kotitalouksien jätevesistä. Primääriliete sisältää paljon kiinto- ja epäorgaanista ainesta, kun taas sekundääriliete on valtaosin biologisessa puhdistuksessa syntyvää orgaanista biolietettä (Motiva 2018a, 2). Ennen lietteen käsittelyä puhdistamoliete on haisevaa ja sisältää runsaasti orgaanista ja helposti hajoavaa ainetta (ProAgria 2013, 29).

Primääriliete sisältää kuiva-ainetta noin 5–9 % TS ja sekundääriliete noin 0,8–1,2 TS (Metcalf & Eddy 2003, 1454). Tällöin näistä yhdistetty raakasekaliete sisältää tyypillisesti kuiva-ainetta noin 3–6 % TS. TS:llä (engl. Total Solids) tarkoitetaan lietteen kuiva-ainetta, joka pitää sisällään sekä orgaanisen aineen että epäorgaanisen aineen (tuhkan). Puhdistamolietteestä poistetaan yleensä vettä mekaanisella kuivauksella, jolloin kuiva-ainepitoisuus nousee noin 20–30 %:tiin. Mekaanisesti kuivattu puhdistamoliete sisältää kokonaisuudessaan vettä noin 70–80 %, orgaanista ainesta noin 12–18 % ja tuhkaa noin 8–12 %.

Kuiva-aineesta noin 60 % on orgaanista ainesta ja noin 40 % on epäorgaanista tuhkaa (Strömberg 2006, 26). Puhdistamolietteen tuhka sisältää toisaalta ravinnearvoltaan arvokasta fosforia ja hivenaineita, mutta toisaalta haitallisia raskasmetalleja, kuten kadmiumia, kromia, kuparia ja elohopeaa. Typeä on puolestaan sekä sitoutuneena lietteen orgaaniseen ainekseen että liukoisessa muodossa. Fosforin pitoisuus lietteen kuiva-aineessa on noin 0,5–0,7 % ja typen noin 2,4–5,0 % (Tyagi & Lo 2013, 714).

Erilaisia alkuaineanalyysyjä puhdistamolietteen koostumuksesta löytyy kirjallisuudesta useita. Koska lietteen koostumus määräytyy jäteveden koostumuksen mukaan, voi eri puhdistamoilta syntyvissä lietteissä olla suuriakin eroja. Taulukossa 2 on esitetty puhdistamolietteen orgaanisen aineksen keskimääräistä koostumusta ja taulukossa 3 tuhkan keskimääräistä koostumusta.

**Taulukko 2.** Puhdistamolietteen orgaanisen aineksen koostumus (Strömberg 2006, 26).

Alkuaine	m-% kuiva-aineessa, tuhkaton
C	52,25
H	7,35
O	31,3
S	2,05
N	6,8
Cl	0,12

**Taulukko 3.** Puhdistamolietteen tuhkan koostumus (Strömberg 2006, 26).

Alkuaine	mg/kg tuhkassa
Al	51 443
As	16
Ba	1 000
Ca	53 557
Cd	3,2
Co	18
Cr	79
Cu	930
Fe	146 556
Hg	3,47
K	4 035
Mg	10 705
Mn	1 000
Mo	12,1
Na	4 658
Ni	56
P	64 367
Pb	100
Sb	10,5
Si	87 708
Ti	2 923
V	39
Zn	1 560

Suomessa myös metsäteollisuudella on merkittävä rooli puhdistamolietteen tuotannossa. Etenkin sellu- ja paperiteollisuudessa syntyy suuria määriä jätevesiä, jotka on puhdistettava tehtaiden ympäristöluvan mukaisesti. Sellu- ja paperiteollisuuden jätevedet käsitellään pääsääntöisesti tehtaiden omilla jätevedenpuhdistamoilla suurien määrien vuoksi, joten yhdyskuntajätevesien puhdistamoille metsäteollisuuden jätevesiä ei juurikaan päädy. Vuonna 2014 Suomessa syntyi 537 000 tonnia TS puhdistamolietettä metsäteollisuudesta (Alakan-gas et al. 2016, 165). Määrä on merkittävä verrattuna yhdyskuntajäteveden puhdistamoilta syntyneeseen lietemäärään, joka on noin 150 000 tonnia TS vuodessa.

Metsäteollisuuden jätevedet käsitellään pääsääntöisesti samanlaisella aktiivilietemenetelmällä kuin yhdyskuntajätevedet. Lietteen laatu ja koostumus riippuvat tuotantoprosessista. Metsäteollisuuden primäärilietteisissä on kuori-, kuitu-, täyte- ja lisäaineita sekä pigmenttejä. Sekundääri- eli biolietteisissä on puolestaan puun uuteaineita, ligniiniyhdisteitä ja klooriorgaanisia yhdisteitä. Metsäteollisuuden lietteissä on enemmän puusta peräisin olevia aineksia (selluloosa, ligniini ja hiilihydraatit) ja tuhkaa sekä vähemmän rasvaperäisiä ainesosia verrattuna yhdyskuntalietteeseen. Ravinnepitoisuudet ovat metsäteollisuuden lietteissä pienempiä kuin yhdyskuntalietteisissä. Myös raskasmetallipitoisuudet ovat metsäteollisuuden lietteissä yleensä melko pieniä yhdyskuntalietteisiin verrattuna eikä patogeenisiä mikrobeja juurikaan esiinny. Toisaalta metsäteollisuuden lietteet sisältävät sellun valkaisuissa syntyviä orgaanisia klooriyhdisteitä. (Alakangas et al. 2016, 165–167.)

### **3 KONVENTIONAALISET KÄSITTELYMENETELMÄT LIETTEILLE**

Konventionaaliset käsittelymenetelmät pitävät sisällään puhdistamolietteiden mekaanisen kuivauksen (mekaaninen vedenerotus) sekä kemiallisen käsittelyn tai biologisen käsittelyn. Biologinen käsittely toteutetaan yleensä joko aerobisena käsittelynä kompostoimalla tai anaerobisena käsittelynä mädättämällä. Jätevedenpuhdistamolta syntyvät puhdistamolietteet on perinteisesti pyritty käsittelemään niiden määrän pienentämiseksi, laadun parantamiseksi ja loppusijoituksesta aiheutuvien haittojen minimoimiseksi (Lohiniva et al. 2001, 38). Käsittelemättömässä puhdistamolietteessä on ihmisille, eläimille ja kasveille tauteja aiheuttavia mikrobeja ja muita mikrobeja sekä helposti hajoavaa orgaanista ainetta. Kemiallisen ja biologisen käsittelyn tavoitteena on ollut lietteen stabilointi ja hygienisointi, jotta lietteen loppukäyttö olisi mahdollisimman haitaton. Yksittäinen käsittelymenetelmä voi olla joko stabiloiva, hygienisoiva tai molempia. Liete voidaan käsitellä myös useammalla menetelmällä peräkkäin, jolloin varmistetaan riittävä hygienisointi, stabiloidaan jo käsiteltyä lietettä tai jatkojalostetaan tuotetta. (ProAgria 2013, 30.)

Lietteen stabiloinnilla tarkoitetaan puhdistamolietteen saattamista vähemmän haitalliseen tilaan kuljetusta, levitystä tai loppusijoitusta varten (Lohiniva et al. 2001, 39). Stabiloinnin tarkoituksena on ollut pyrkimys vähentää orgaanisten, helposti hajoavien yhdisteiden määrää lietteessä ja vähentää lietteen levityksestä aiheutuvia hajuhaittoja. Hygienisointi vähentää taudinaiheuttajien määrää lietteessä. (ProAgria 2013, 30.)

Ensimmäinen lietteenkäsittelytapa jätevedenpuhdistamoilla ennen varsinaisia käsittelymenetelmiä on tyypillisesti raakasekalietteen tiivistys ja sakeutus. Tiivistyksellä pyritään nostamaan raakalietteen kuiva-ainepitoisuutta noin 2–3 kertaiseksi, jonka jälkeen lietteen kuiva-ainepitoisuus on noin 5–10 %. Tiivistys voidaan toteuttaa joko laskeutustiivistyksenä tai floataatiotiivistyksenä. Laskeutustiivistys on yleisempi, helppohoitoisuuden ja pienten käyttökustannusten vuoksi sekä se soveltuu laajasti erityyppisille lietteille. (Lohiniva et al. 2001, 38–39.) Lietteen tiivistystä ja sakeutusta seuraa lietteen mekaaninen kuivaus ja/tai lietteen kemiallinen tai biologinen käsittely.



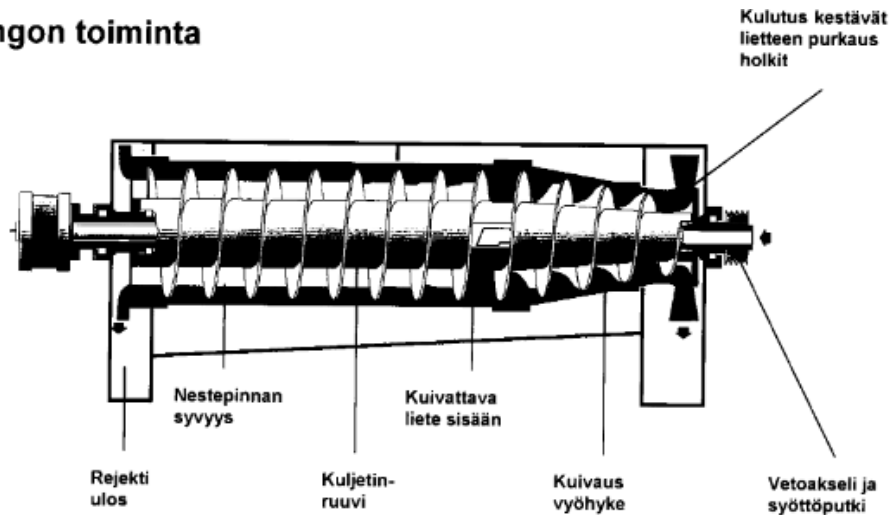
### 3.1 Mekaaninen kuivaus

Mekaanisella kuivauksella pyritään nostamaan lietteen kuiva-ainepitoisuutta noin 10–40 %:tiin. Kuivaustekniikkaa valittaessa on otettava huomioon kuivattavan lietteen laatu ja määrä, tekniikan hankinta- ja ylläpitokustannukset, tavoiteltu lietteen kuiva-ainepitoisuus kuivauksen jälkeen, suodosveden kiintoainepitoisuus sekä kuivatun lietteen kuljetuskustannukset. Tavoiteltava kuiva-ainepitoisuus riippuu lietteen sijoituksesta tai jatkokäsittelystä. Mitä pidemmälle kuivaus viedään, sitä enemmän kuivaukseen käytettävät kustannukset nousevat. Useimmiten tavoitellaan noin 15–20 % kuiva-ainepitoisuutta. (Lohiniva et al. 2001, 52–53.) Puhdistamolietteen mekaaninen kuivaus toimii myös esikäsittelymenetelmänä ennen lietteen termisiä käsittelymenetelmiä. Mekaaninen kuivaus tehdään esikäsittelynä lähes poikkeuksetta, jotta saavutetaan riittävä kuiva-ainepitoisuus termisille menetelmille.

Puhdistamolietteilteille kehitettyjä mekaanisia kuivausmenetelmiä ovat mm. lingot, suotonauhapuristin, kammipuristin, ruuvipuristin, kammiosuotopuristin, kiekkopuristin ja imu-suodatin. Näistä lingot ja suotonauhapuristin ovat eniten käytettyjä kuivausmenetelmiä etenkin yhdyskuntajätevesien puhdistamoilla ja suotonauhapuristimia käytetään myös metsäteollisuuden lietteille. Myös ruuvi- ja kiekkopuristimia on käytetty Suomessa jonkin verran metsäteollisuuden lietteille. (Lohiniva et al. 2001, 57.)

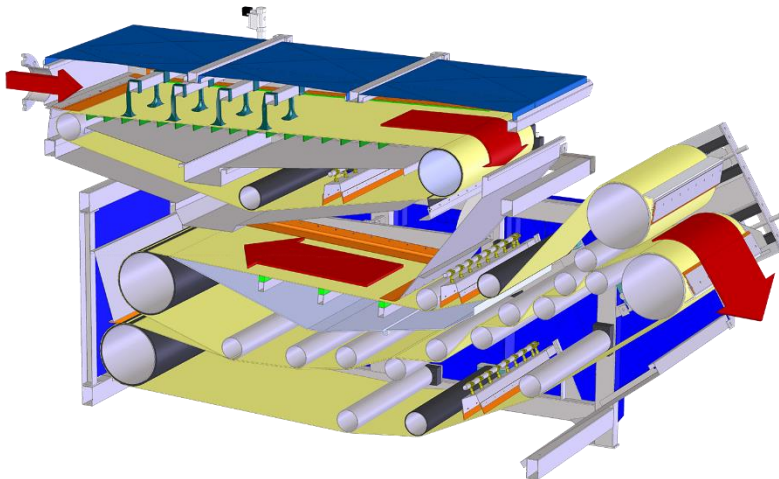
Lingot perustuvat keskipakovoimilla kiihdytetyyn laskeutumiseen. Lingoissa on pyörivä toisesta päästä kartion muotoinen rumpu, jonka sisällä pyörii ruuvi. Raskaammat ainekset erottuvat keskipakovoiman avulla rummun kehälle, jossa kiintoaine siirretään rummun kartiopintaa pitkin pois nesteestä. Näin liete kuivuu ja poistuu rummusta kiintoaineholkkien avulla. Erotettu neste puolestaan virtaa ulos rummun toisesta päästä olevien puristusaukkojen kautta. Nesteen erotuskapasiteettia voidaan säädellä rummun ja kuljetinruuvien kierrosluvuilla ja nestepinnan syvyydellä. Lingot ovat yleinen mekaaninen kuivausmenetelmä etenkin suurilla ja keskikokoisilla yhdyskuntajätevesien puhdistamoilla. Lingoilla päästään tyypillisesti noin 20–35 % kuiva-ainepitoisuuksiin ja niiden kuivauskapasiteetti sekä tilantarve ovat vähäisempiä kuin muilla menetelmillä. Lingot ovat myös helppohoitoisia. Haittapuolena lingoilla on suuri energiankulutus (noin 1–1,5 kWh/lietetonni) ja polymeerin lisäyksen tarve lietteeseen ennen kuivausta. (Lohiniva et al. 2001, 53–54.) Kuvassa 5 on esitettyinä puhdistamolietteen kuivaukseen käytettävä linko.

## Lingon toiminta



**Kuva 5.** Linko (Lohiniva et al. 2001, 54).

Suotonauhapuristin perustuu painovoimaan ja puristustelojen aiheuttamiin puristus- ja leikkausvoimiin. Puhdistamoliete ohjataan hitaasti kulkevan viiran päälle. Ylemmällä viiralla vettä poistuu painovoimaisesti viirakankaan läpi. Puristusvaiheessa lietteestä erotetaan vettä puristamalla lietteen ohjautuessa alemmalle viiralle ja viirojen väliin. Suotonauhapuristimen toimintaan vaikuttaa viiran nopeus, puristusvaiheessa viirojen väliin muodostuva paine ja lietteen syöttönopeus. Tyypillisesti suotonauhapuristimella päästään noin 12–35 % kuiva-ainepitoisuuksiin. Suotonauhapuristimella on pieni energiankulutus, mutta sen haittapuolina ovat herkkyys lietteen laadun vaihteluille, rajoitettu hydraulinen kapasiteetti ja viirojen lyhyt kestoikä. Suotonauhapuristin vaatii monesti tukiainetta, kuten turvetta, sekoitettavaksi lietteen sekaan toimiakseen tehokkaasti. Suotonauhapuristimia käytetään pienillä ja keskisuurilla yhdyskuntajätevesien puhdistamoilla sekä metsäteollisuudessa. Metsäteollisuuden lietteille suotonauhapuristimilla on saatu parempi kuivaustulos kuin lingoilla. (Lohiniva et al. 2001, 54–55.) Kuvassa 6 on esitettyä suotonauhapuristin.



**Kuva 6.** Suotonauhapuristin (Econet Group 2018).

### 3.2 Kemiallinen käsittely

Lietteiden yleisimmät kemialliset käsittelymenetelmät ovat kalkkistabilointi ja happo-hapetus-käsittely. Kalkkistabiloinnissa lietteen sekaan lisätään poltettua kalkkia ( $\text{CaO}$ ) tai sammutettua kalkkia ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Kalkkistabilointi voidaan tehdä joko ennen lietteen kuivausta, kuivauksen aikana tai sen jälkeen (ProAgria 2013, 32.) Kalkkistabilointi perustuu lietteen pH-arvon nostamiseen yli 11:een, jolloin kaikki biologinen toiminta päättyy. Kalkkia lisätään lietteeseen sen verran, että pH on vielä 14 vuorokauden päästä yli 11. Ennen kuivausta käytetään sammutettua kalkkia ja kuivauksen jälkeen voidaan käyttää poltettua kalkkia. (Lohiniva et al. 2001, 40.) Käsiteltäessä kuivattua lietettä poltetulla kalkilla lietteen lämpötila nousee noin 50–70 °C:een, jolloin pH nousee yli 12 ja lietteen ammoniumpitoisuus kohoaa. Nämä tekijät myös hygienisoivat lietettä. Sammutettua kalkkia käytettäessä lietteen lämpötila ei nouse. Tällöin on varmistuttava lisäanalyysillä siitä, että liete on hygienisoitunut riittävästi. Kalkkistabiloinnissa lietteen määrä kasvaa ja lietteen pH-arvo ja kalsiumpitoisuudet ovat korkeat. Kalkkistabiloitua lietettä on käytetty sellaisenaan maataloudessa maanparannusaineena. (ProAgria 2013, 32–33.)

Kalkkistabiloinnin hyvä puoli on prosessin yksinkertaisuus. Patogeeniset bakteerit ja virukset kuolevat lietteestä ja kalkittu liete on soveltuvaa suomalaisen maaperään. Haittapuolina ovat olleet korkeat kemikaalikustannukset ja lietemäärän kasvaminen kalkin lisäyksen takia. Raakasekalietteen kalkkistabilointi sitoo kalkkia noin 300–500 kg  $\text{Ca(OH)}_2$ /t TS tai 200–

400 kg CaO/t TS. Kalkkistabilointia käytetään lähinnä pienillä yhdyskuntajäteveden puhdistamoilla. (Lohiniva et al. 2001, 40.)

Puhdistamoliete voidaan myös hydrolysoida käyttämällä hapettavia vetyperoksidiin pohjautuvia menetelmiä. Menetelmät sopivat sekä raakasekalietteen että mädätetyn lietteen käsittelyyn. Käsittelyt ovat happo-hapetus-käsittelyjä, jossa lietteeseen syötetään happoa. Tällöin lietteen pH laskee, lietteen rakenne hajoaa ja metallisuolat liukenevat. Sen jälkeen liete hapetetaan vetyperoksidilla ( $H_2O_2$ ) ja neutraloidaan natriumhydroksidilla (NaOH) tai kalkilla. Koko käsittely vähentää lietteen hajuhaittoja ja liete hygienisoituu. Happo-hapetusmenetelmällä käsiteltyä lietettä on käytetty sellaisenaan maatalouskäytössä maanparannusaineena tai se on lisäksi kompostoitu ja käytetty sen jälkeen maatalouskäytössä orgaanisena maanparannusaineena. (ProAgria 2013, 33.)

### **3.3 Aerobinen käsittely – kompostointi**

Puhdistamolietteen aerobinen käsittely kompostoimalla perustuu aerobisten bakteerien toimintaan. Kompostoituminen on happea vaativa biologinen prosessi, jossa orgaaninen aine hajoaa ja muuntuu. Biologisen hajoamisen tuloksena vapautuu vettä, hiilidioksidia, orgaaniseen ainekseen sidottuja ravinteita ja lämpöenergiaa. Kompostoinnissa pyritään luonnossa melko hidasta hajoamista nopeuttamaan lämpöeristyksellä ja takaamaan mikrobeilla riittävä hiilen, ravinteiden, veden ja hapen saanti. (Lohiniva et al. 2001, 44.)

Noin puolet orgaanisesta aineesta hajoaa kompostoinnin aikana ja massan määrä pienenee noin kolmanneksella. Lopputuotteena syntyy kompostia, jossa orgaaninen aine on pääosin hitaasti hajoavana humuksena ja mikrobibiomassana. Kompostointi tehdään yleensä mekaanisesti kuivatulle tai mädätetylle ja mekaanisesti kuivatulle lietteelle aumassa tai reaktorissa joko taivasalla, katetussa tilassa tai laitosrakennuksessa. (ProAgria 2013, 30.)

Kompostointi on kaksivaiheinen prosessi. Ensimmäisessä vaiheessa, ns. aktiivivaiheessa, kompostoituvan massan lämpötila kasvaa ja pysyy korkeana (noin 55–60 °C), jolloin komposti hygienisoituu. Toisessa vaiheessa, ns. jälkikypsytyksessä, komposti jäähtyy ja kompostin liukoinen ammoniumtyppi muuttuu nitraatiksi ja orgaaninen aine hitaasti hajoavaksi

humukseksi. Puhdistamolietettä kompostoitaessa on käytettävä tukiainetta (seosainetta) lietteen seassa. Tukiaineena voidaan käyttää esimerkiksi puu- ja oksahaketta tai turvetta. Tukiaineen ja lietteen sekoituksella varmistetaan riittävä ilman pääsy kompostoituvaan massaan. Ilman pääsyä massaan voidaan parantaa myös koneellisesti puhaltamalla auman läpi ilmaa tai sekoittamalla massaa ja kääntämällä aumaa. Tukiaine tasapainottaa myös lietteen hiilityppisuhdetta (C/N-suhde) ja osallistuu hiilipitoisena aineena kompostointiprosessiin. (ProAgraria 2013, 30.) Aumakompostointiajaksi on suositeltu noin 20–30 päivää ja reaktorikompostointiajaksi muutamia viikkoja. Usein reaktorikompostoinnissa tarvitaan vielä jälkikypsytyks aumassa. Aumakompostoinnilla saavutetaan noin 40 %:n vähenemä orgaanisessa aineessa, kun reaktorikompostoinnilla vähenemä on noin 15–20 %. Aumakompostointia käytetään pienillä ja keskisuurilla yhdyskuntajäteveden puhdistamoilla ja reaktorikompostointia suurilla ja keskisuurilla yhdyskuntajäteveden puhdistamoilla (Lohiniva et al. 2001, 46–49.)

Kompostointilaitokset eivät tuota laitoksen ulkopuolella hyödynnettävää energiaa, mutta kompostointiprosessi on lämpöomavarainen. Energiaa kompostoinnissa kuluu työkoneissa ja materiaalien käsittelyssä sähköenergiana. Kompostointilaitoksen sähköenergiankulutus on noin 40–60 kWh<sub>el</sub>/t TS. (Motiva 2018b, 5.) Kompostoinnin etuina ovat yksinkertaisuus ja edullisuus. Haittapuolina ovat mahdolliset hajuhaitat (pienemmät reaktorikompostoinnissa kuin aumakompostoinnissa), tukiaineen suuri tarve ja kompostoinnin suuri tilantarve sekä lopputuotteen (kompostin) laadunvaihtelut. Lopputuotetta on käytetty viherrakentamisessa tai sitä voidaan kuljettaa sellaisenaan loppusijoitukseen kaatopaikalle. (Lohiniva et al. 2001, 46.) Kompostia on käytetty myös maatalouskäytössä orgaanisena maanparannusaineena, mutta kompostin maatalouskäytön yhteydessä tarvitaan aina kompostointilaitokselta laitoshyväksyntä (Motiva 2018b, 4).

### **3.4 Anaerobinen käsittely – mädätys**

Puhdistamolietteen anaerobinen käsittely mädättämällä perustuu hapettomissa oloissa toimivien bakteerien toimintaan. Mädätys tehdään suljetuissa biokaasureaktoreissa joko märkämädätyksenä tai kuivamädätyksenä. Märkämädätyksessä käytetään kuiva-ainepitoisuudeltaan maksimissaan 15 %:sta lietettä, kun taas kuivamädätyksessä syötettävä liete on kuiva-

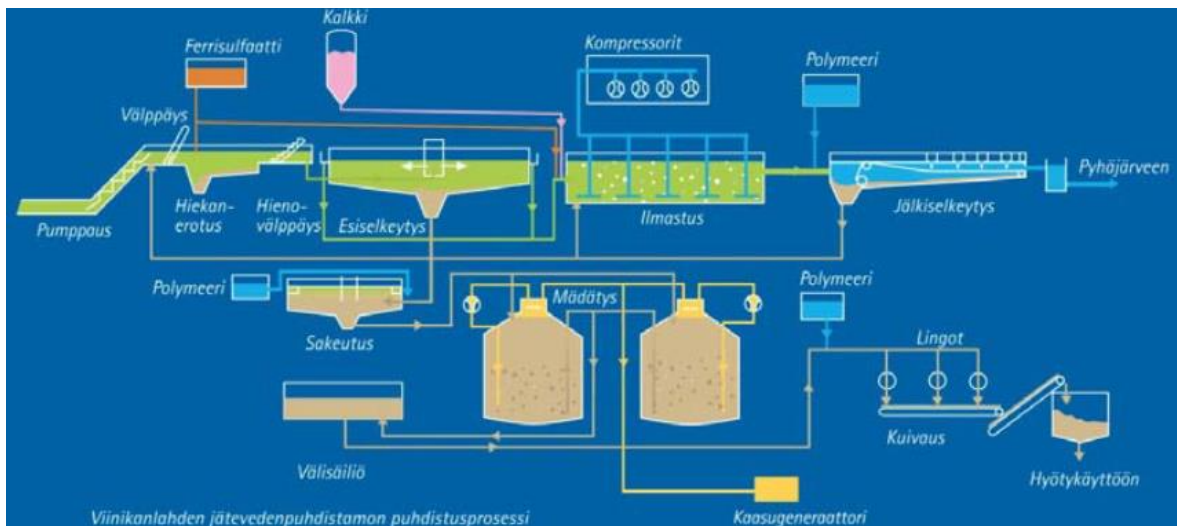
ainepitoisuudeltaan noin 20–40 %. Märkämädätys on yleisempi puhdistamolietteen mädätysmenetelmäksi, kun taas kuivamädätystä käytetään lähinnä biojätteiden mädättämiseen. (ProAgria 2013, 31.)

Mädätyksessä lietteen orgaaninen aines muuttuu erilaisten hapetus-pelkistysreaktioiden seurauksena metaaniksi ( $\text{CH}_4$ ), hiilidioksidiksi ( $\text{CO}_2$ ) ja mädätysjäännökseksi (Lohiniva et al. 2001, 40). Bakteeritoiminta hajottaa lietteen eloperäisen aineksen ensin sokereiksi, aminohapoiksi ja pitkäketjuisiksi rasvahapoiksi sekä edelleen etikkahapoksi ja vedyksi. Hajoamisketjun lopputuotteena syntyy pääosin metaania ja hiilidioksidia sisältävää biokaasua sekä kiinteätä mädätysjäännöstä. Mädätyksen aikana liete stabiloituu ja hygienisoituu. Normaalisti yli puolet lietteen eloperäisestä aineksesta muuttuu biokaasuksi, mutta lietteen tilavuus ei juuri muutu. Mädätysprosessi voi prosessin lämpötilasta riippuen olla joko mesofiilinen (35–42 °C) tai termofiilinen (50–55 °C). (ProAgria 2013, 32.)

Mädättämön toimiessa normaalisti lietteen orgaanisesta aineksesta noin 40 % muuttuu kaasuksi, 10 % liukenee rejektiveteen ja 50 % jää lietteeseen (mädätysjäännökseen). Kokonaisuudessaan lietteen kuiva-ainepitoisuus pienenee mädätyksen aikana noin 30–40 %. Lietteän viipymäaika mädättämössä on mädättämön koosta riippuen noin 10–20 päivää. Mädätyksessä syntyvä biokaasu (lämpöarvo noin 25 MJ/m<sup>3</sup>) voidaan käyttää energian tuotannossa polttamalla sitä joko poltin- ja kattilajärjestelmissä tai kaasumootoreissa. Näin lietteestä saadaan energiaa talteen lämpöenergiana ja/tai sähköenergiana, jotka voidaan käyttää suoraan jätevedenpuhdistamon omaan toimintaan. Noin muutaman kymmenen tuhannen asukkaan jätevedet puhdistavaa puhdistamo voidaan pitää energiaomavaraisena, jos puhdistamolla on lietteen mädätys. Pelkästään mädätyksessä energiaa kuluu mm. mädätysreaktorin ja biokaasusäiliön lämmitykseen sekä lietteen sekoittamiseen reaktorissa. (Lohiniva et al. 2001, 41–42.) Esimerkiksi termofiilinen mädätys kuluttaa sähköenergiaa noin 437 kWh<sub>el</sub>/t TS ja lämpöenergiaa noin 350 kWh<sub>th</sub>/t TS (Motiva 2018a, 7).

Tyypillisesti etenkin suurilla jätevedenpuhdistamoilla liete mädätetään puhdistamolla, kuivataan mekaanisesti ja kuljetetaan puhdistamolta jatkokäsittelyyn (yleensä kompostointiin). Liete voidaan myös ensin kuivata mekaanisesti puhdistamolla ja kuljettaa muualle mädätet-

täväksi. Mädetettyä lietettä on myös käytetty sellaisenaan ilman jatkokäsittelyä maanparannusaineena maatalouskäytössä, mutta mädätysprosessi ei välttämättä yksistään riitä lietteen hygienisointiin. Liete voidaan tällöin kuumentaa erillisessä hygienisointiyksikössä noin 70 °C:een. Hygienisointiyksikkö voi sijaita ennen tai jälkeen mädätysprosessin. (ProAgria 2013, 31–32.) Mädätysjäännöksen takia mädätystä ei voida pitää varsinaisena loppukäsittelymenetelmänä puhdistamolietteelle, koska mädetetty liete on käytännössä jatkokäsiteltävä. Mädetetty liete soveltuu käsiteltäväksi myös useammilla termisillä menetelmillä, joten mädätys ja jonkin termisen menetelmän yhdistelmä voi tulevaisuudessa yleistyä etenkin suurilla jätevedenpuhdistamoilla. Kuvassa 7 on esitettynä jätevedenpuhdistusprosessi, jonka yhteydessä on myös lietteen mädätys.



**Kuva 7.** Jätevedenpuhdistusprosessi lietteen mädätyksellä (ProAgria 2013, 29).

Etuina puhdistamolietteen mädätyksessä ovat hajuhaittojen vähyys, biokaasun tuotanto, lietemäärän pieneneminen mädätyksen aikana ja kompostointia pienempi tilantarve. Haitta-  
puolina ovat prosessin epävarmuus ja herkkyyks olosuhteiden muutoksille, korkeat investointikustannukset ja mädätysjäännös. Mädätys ei sovellu hyvin metsäteollisuuden lietteille, koska bakteerit eivät pysty hajottamaan puun ligniiniä. Mädätystä käytetään lähinnä suurilla ja keskisuurilla yhdyskuntajäteveden puhdistamoilla. (Lohiniva et al. 2001, 49.)

## 4 TERMISET KÄSITTELYMENETELMÄT LIETTEILLE

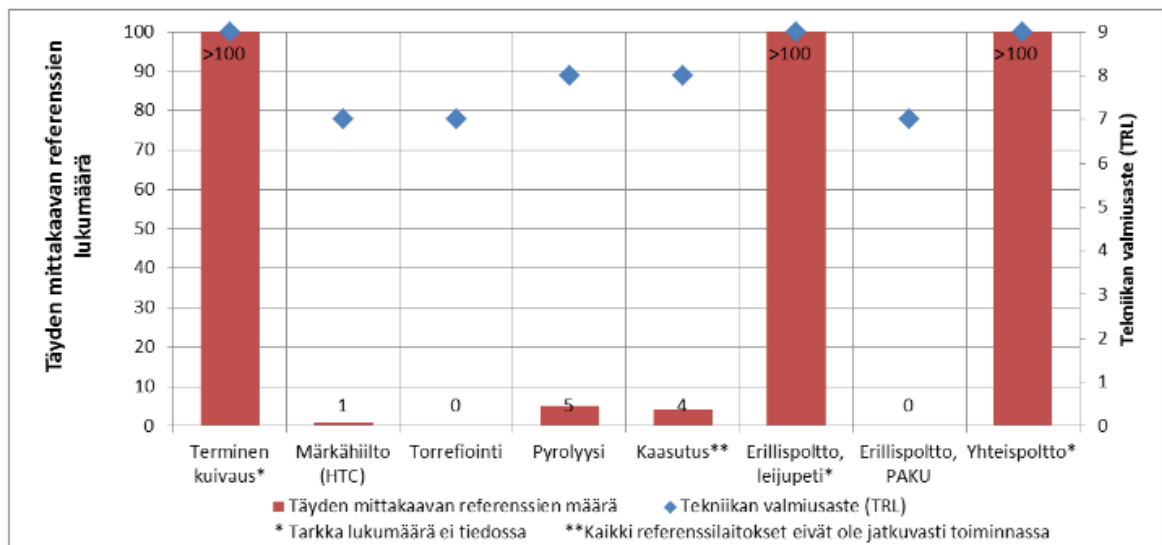
Puhdistamolietteiden termiset käsittelymenetelmät tarjoavat uusia mahdollisuuksia puhdistamolietteiden käsittelyyn konventionaalisten käsittelymenetelmien rinnalle tai tilalle. Termisillä menetelmillä puhdistamoliete käsitellään konventionaalisia käsittelymenetelmiä korkeammassa lämpötilassa, mikä edesauttaa orgaanisten haitta-aineiden, lääkejäämien ja mikromuovien tuhoutumista lietteen käsittelyssä. Etenkin konventionaalisten loppukäsittelymenetelmien eli kompostoinnin ja kemiallisen lietteenkäsittelyn tilalle useammat termiset käsittelymenetelmät tarjoavat paremman vaihtoehdon viitaten juuri haitta-aineiden, lääkejäämien ja mikromuovien tuhoutumiseen sekä energian ja ravinteiden talteenottoon lietteestä.

Energian ja ravinteiden talteenoton potentiaali sekä haitta-aineiden tuhoamisen tehokkuus riippuu tarkasteltavasta menetelmästä, eri termisten menetelmien välillä on suuriakin eroja niiden soveltuvuudessa puhdistamolietteen loppukäsittelyvaihtoehdoksi. Termisistä käsittelymenetelmistä poltto, kaasutus, pyrolyysi ja märkähiilto (HTC) ovat tällä hetkellä pisimmillä tekniikan valmiusasteella mitattuna. Poltto voidaan jakaa lietteen erillispolttoon ja yhteispolttoon muiden polttoaineiden kanssa. Myös termistä kuivausta on kehitetty paljon ja sitä käytetään esikäsittelymenetelmänä useammille muille termisille käsittelymenetelmille. Myös terminen hydrolyysi (THP) on jo pitkällä kehitetty menetelmä, mutta se on enemmänkin esikäsittelymenetelmä lietteen mädätykseen kuin varsinainen loppukäsittelymenetelmä. Näiden lisäksi on olemassa erilaisia kokeiluasteella olevia tekniikoita, kuten hydroterminen nesteytys (HTL) ja ylikriittinen vesikaasutus (SCWG). Jokaisesta tarkasteltavasta menetelmästä esitellään tekniikan pääpiirteet sekä tekniikan mahdollisuudet energian ja ravinteiden talteenottoon. Energian talteenotosta kiinnostavaa on myös, saadaanko energiaa tuotettua prosessin ulkopuolelle vai kuluuko kaikki energia prosessin tai prosessiketjun sisäiseen lämmöntarpeeseen. Työn lopusta liitteestä I löytyy taulukkomuotoisena yhteenvetona tärkeimmät käsitellyt termiset menetelmät.

Suomessa termisillä käsittelymenetelmillä ei ole tällä hetkellä suurta osuutta yhdyskuntalietteen käsittelyssä. Sen sijaan metsäteollisuuden puhdistamolietteitä käsitellään laajasti termisesti käsittelemällä. Suomessa 60 % metsäteollisuuden lietteistä poltetaan (Alakangas et al. 2016, 167). Metsäteollisuuden lietteitä poltetaan yleisesti voimalaitoskattiloissa muiden polttoaineiden seassa yhteispolttona teollisuuslaitosten yhteydessä olevilla voimalaitoksilla.



Poltteknikat ovat muualla Euroopassa, etenkin Keski-Euroopassa, yleinen myös yhdyskuntajäteveden puhdistamoilta saadun puhdistamolietteen käsittelymenetelmä. Lietteiden yhteispoltto on Euroopassa varsin yleistä ja myös erillispoltto on laajalti käytössä oleva tekniikka ja voimakkaasti yleistyvä tekniikka. Kuvassa 8 on esitettyä eri termisten käsittelymenetelmien täyden mittakaavan referenssien lukumäärä maailmalla vuonna 2019. Kuvassa 8 PAKU-nimellä viitataan Endev-teknologiaan ja torrefioinnilla viitataan pyrolyysin kaltaiseen tekniikkaan.



**Kuva 8.** Termisten käsittelymenetelmien yleisyyttä maailmalla vuonna 2019 (Pöyry Finland 2019, 88).

#### 4.1 Terminen kuivaus

Lietteen termisellä kuivauksella tarkoitetaan lietteen kosteuspitoisuuden alentamista (kuiva-ainepitoisuuden nostoa) lämmön avulla. Termistä kuivausta käytetään etenkin esikäsittelymenetelmänä muille termisille menetelmille parantamaan käsittelyjen toimintaa ja energiatehokkuutta. Termisesti kuivattua puhdistamolietettä voidaan käyttää kuivauksen jälkeen polttoaineena esimerkiksi poltossa, kaasutuksessa tai pyrolyysissä. Termisen kuivauksen tärkeimmät vaikutukset lietteen ominaisuuksiin ovat massan väheneminen, lämpöarvon paraneminen, lietteen stabilointi ja hygienisointi sekä parempi käsiteltävyys ja kuljetettavuus. Termistä kuivausta on käytetty myös itsenäisenä käsittelyprosessina, jossa termisesti kuivattu liete on jatkokäsitelty esimerkiksi rakeistamalla ja käytetty tämän jälkeen orgaanisena

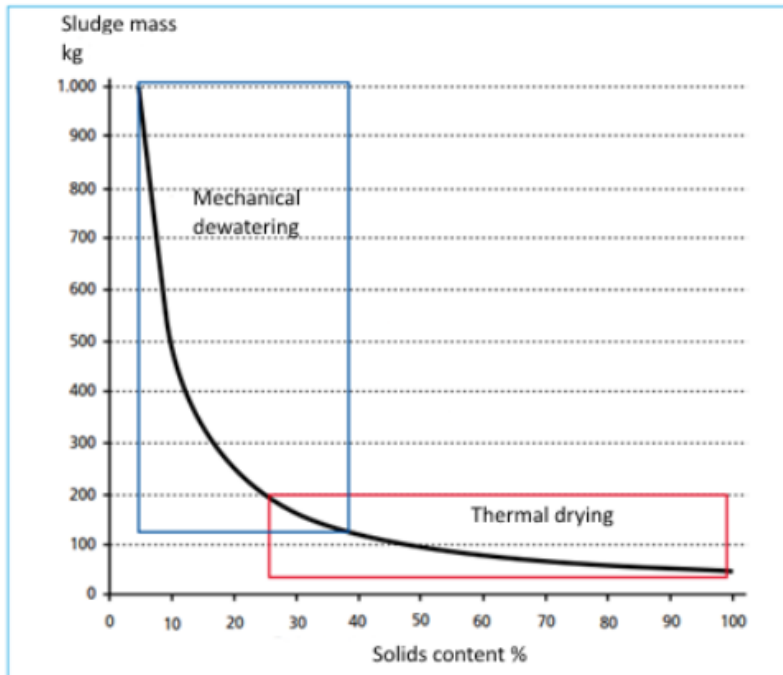
maanparannusaineena maataloudessa. (Pöyry Finland 2019, 25.) Terminen kuivaus ei kuitenkaan vaikuta merkittävästi lietteessä oleviin orgaanisten haitta-aineiden, lääkejäämien ja mikromuovien määrään (Pöyry Finland 2019, 81). Tästä syystä termistä kuivausta voidaan pitää vain esikäsittelymenetelmänä ennen varsinaista termistä käsittelyä.

Termistä kuivausta edeltää aina ensin lietteen mekaaninen kuivaus. Lietteessä oleva vesi on sitoutunut lietteeseen eri tavoin ja kuivaamalla liete vaihe vaiheelta ensin mekaanisesti ja sitten termisesti saadaan paras kuivaustulos. Lietteessä oleva vesi on sitoutunut lietteeseen seuraavasti:

- Vapaa vesi lietepartikkelien välissä sitoutumattomana (poistettavissa sakeutuksella ja tiivistyksellä)
- Vapaa kapillaarivesi sitoutuneena adheesiolla ja koheesiolla lietepartikkeleihin (poistettavissa mekaanisella kuivauksella)
- Osittain fysikaalisesti sitoutunut vesi sitoutuneena lietepartikkelien sisälle (poistettavissa osittain mekaanisesti polymeerien käytöllä)
- Fysikaalisesti kolloideihin sitoutunut vesi (poistettavissa osittain mekaanisesti polymeerien käytöllä)
- Kemiallisesti yhdisteisiin sitoutunut vesi (poistettavissa osittain mekaanisesti polymeerien käytöllä)
- Biologisesti solujen sisään sitoutunut vesi (poistettavissa vain rikkomalla solurakenteet lämmön avulla)

Liete voidaan kuivata termisesti joko osittain noin 40–50 % tai 60–85 % kuiva-ainepitoisuuden asti tai täysin noin 85–95 % kuiva-ainepitoisuuden asti. Haluttu kuiva-ainepitoisuus riippuu termisesti kuivatun lietteen jatkokäsittelystä. Käytännössä noin 15–40 % kuiva-ainepitoisuudella liete on pumpattavissa pumpuilla ja siirrettävissä ruuvi- tai hihnakuuljettimilla. Yli 70 % kuiva-ainepitoisuudella liete on jo kiinteää ja sitä voidaan siirtää ruuvi- tai hihnakuuljettimilla. Tärkeintä olisi välttää 50–60 % kuiva-ainepitoisuutta, koska silloin liete on tahmeaa ja liisterimäistä. Tällöin liete tarttuu helposti kiinni kuivauspintoihin ja on vaikeasti käsiteltävissä. Koko lietteen kuivauksen eri vaiheissa voidaan päästä seuraaviin kuiva-ainepitoisuuksiin: tiivistyksellä ja sakeutuksella noin 6 % TS asti, mekaanisella kuivauksella noin 38 % TS asti ja termisellä kuivauksella lähelle 100 % TS (Pöyry Finland

2019, 25–26). Kuvassa 9 on esitettyä saavutettavat kuiva-ainepitoisuudet (Solids content %) lietteen mekaanisella kuivauksella (Mechanical dewatering) ja termisellä kuivauksella (Thermal drying) ja lietteen massan pieneneminen kuivausvaiheiden aikana (Sludge mass kg).

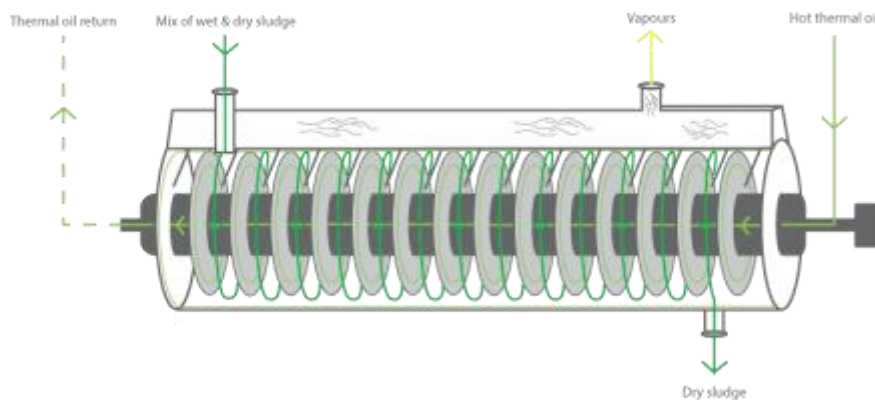


**Kuva 9.** Lietteä kuivauksella saavutettavat kuiva-ainepitoisuudet ja lietteen massan muutos (Pöyry Finland 2019, 26).

Pääperiaate termisessä kuivauksessa on lietteen saaminen kontaktiin kuumennetun materiaalin kanssa, jolloin lietteestä haihtuu vettä. Saavutettava kuiva-ainepitoisuus riippuu lämpötilasta, viipymääjasta, lämmönsiirrosta lietteen ja kuumennetun materiaalin välillä sekä lietteen sekoittumisesta ja ilmankosteudesta. Termisen kuivauksen lämpötila on noin 70–180 °C riippuen tekniikasta ja lämmönlähteestä. Tyypillinen lietteen viipymääika kuivauksessa on noin 30–120 min, matalammilla lämpötiloilla kuivaus on tehottomampaa ja viipymääika on pidempi. (Pöyry Finland 2019, 26.)

Termisen kuivauksen teknologioita on useita ja yleisimmin käytetyt tekniikat voidaan jakaa kontaktikuivaukseen ja konvektiokuivaukseen. Myös passiivista aurinkokuivausta on kehitetty. Kontaktikuivauksessa liete on kontaktissa kuumennettuun pintaan, jota lämmitetään epäsuorasti lämmönsiirtoaineen, esimerkiksi höyryn, ilman, palokaasujen tai öljyn, avulla.

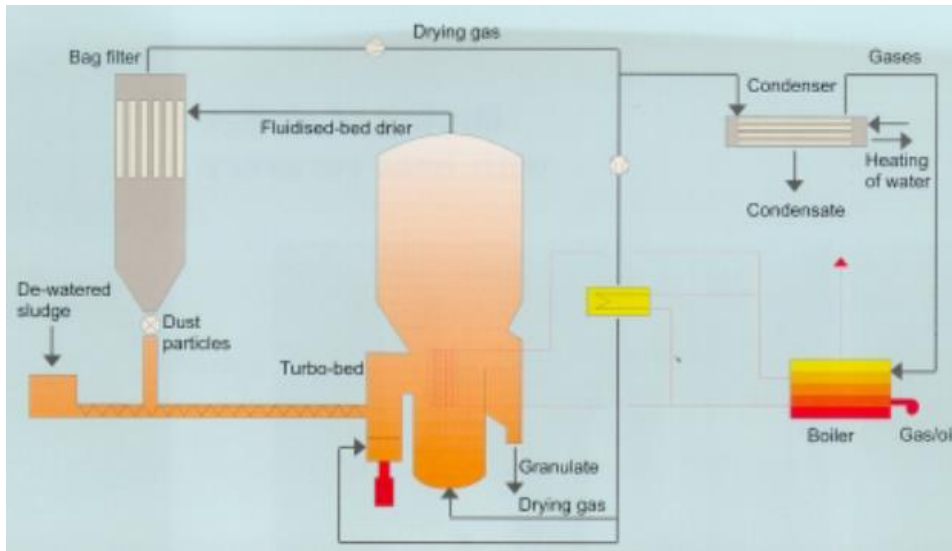
Lietteen ohi ohjataan ilmaa, joka poistaa lietteestä haihtuvaa vettä höyrynä. Kontaktikuivaustekniikoista yleisin on kiekkokuivaus, jossa liete on kosketuksissa kuumennettujen pyörivien kiekkojen kanssa. Kiekot kuumennetaan epäsuorasti ohjaamalla lämmönsiirtoaine kiekkojen sisällä oleviin kanaviin (Pöyry Finland 2019, 26.) Kontaktikuivauksen etuina ovat poistokaasujen pieni määrä ja energiatehokkuus. Haittapuolena on taas lietteen epätasainen kuumentuminen. (Lohiniva et al. 2001, 68.) Kuvassa 10 on esitettyä kiekkokuivain lietteelle.



**Kuva 10.** Kiekkokuivain (Waterleau 2014).

Konvektiokuivauksessa kuumennettu kaasu, esimerkiksi ilma, johdetaan suoraan kontaktiin lietteen kanssa. Konvektiokuivaustekniikoita ovat mm. rumpukuivaus, nauhakuivaus ja leijupetikuivaus. Rumpukuivauksessa liete kuivataan pyörivässä rummussa johtamalla sinne kuivausilmaa. Nauhakuivauksessa liete levitetään kuivausviiralle ja lietteen läpi johdetaan kuivauskaasua lietekerroksen läpi (Pöyry Finland 2019, 26.) Leijupetikuivauksessa lietettä leijutetaan johtamalla kuumaa leijutuskaasua kuivaimeen pedin alta. Leijutuskaasu toimii samalla kuivauskaasuna ja osa lietteestä kulkeutuu kaasun mukana ulos leijupedistä. Leijutuksessa muodostuvat hienot hiukkaset erotetaan syklonissa tai kuitusuodattimessa ja palautetaan takaisin leijupetiin märän lietteen sekaan. Osa kuivauskaasusta ohjataan hiukkaserotuksen jälkeen takaisin leijupetiin lämmityksen kautta ja osa johdetaan lauhduttimelle, jossa vesi ja kaasut erottuvat. Kaasut voidaan polttaa energian tuottamiseksi kuivauskaasun lämmitykseen. Leijupedin pohjalta saadaan kuivattua lietettä granulaatteina. (Lohiniva et al.

2001, 66.) Konvektiokuivauksen etuna on korkea saavutettava kuiva-ainepitoisuus. Haittapuolina ovat suuri pölymäärä ja pölyräjähdysriski sekä poistokaasujen suuri määrä (Lohiniva et al. 2001, 68). Kuvassa 11 on esitettyä leijupetikuivain.



**Kuva 11.** Leijupetikuivain (Lohiniva et al. 2001, 66).

Terminen kuivaus vie lämpöenergiaa haihdutettua vesimäärää kohden noin 0,7–1.0 kWh/kg H<sub>2</sub>O, mikä vastaa noin 500–700 kWh<sub>th</sub>/t lietettä (kuivaus 30 % → 90 % TS). Sähköenergiaa kuluu esimerkiksi puhaltimiin ja kuljettimiin noin 20–50 kWh<sub>el</sub>/t lietettä (30 % → 90 % TS). (Pöryy Finland 2019, 31.) Kuiva-ainetta kohden energiankulutus on noin 100–300 kWh<sub>el</sub>/t TS ja 1800–2200 kWh<sub>th</sub>/t TS (Durdevic et al. 2019, 11). Termisessä kuivauksessa syntyy poistokaasuseos, johon lietteestä haihtuva vesi ja vapautuvat kaasut ovat sitoutuneet. Poistokaasu sisältää suuria määriä epäpuhtauksia, kuten orgaanista ainetta, kiintoainetta, typpiyhdisteitä ja pölyä. Poistokaasuja syntyy noin 5 500–7 500 m<sup>3</sup>/t lietettä ja ne on käsiteltävä haju- ja hiukkaspäästöjen minimoimiseksi. (Pöryy Finland 2019, 32.) Kokonaiskustannukset termiselle kuivaukselle ovat noin 45–60 €/t (30 % TS) (Pöryy Finland 2019, 92).

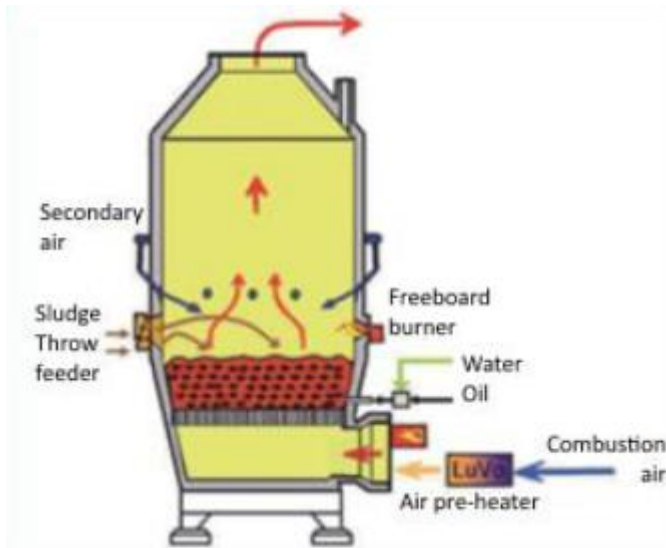
Termisen kuivauksen etuina ovat tekniikan soveltuvuus myös pieneen kokoluokkaan ja mahdollisuudet hukkalämmön hyödyntämiseen alhaisen prosessilämpötilan ansiosta. Haittapuolina ovat korkea energiankulutus, paloriskit, hajuhaitat, poistokaasujen käsittelytarve sekä lietteen haitta-aineiden ja mikromuovien säilyminen lietteessä. (Pöryy Finland 2019, 110.)

## 4.2 Poltto erillispolttona

Puhdistamolietettä voidaan termisen kuivauksen jälkeen polttaa erillispolttona. Erillispoltolla (engl. mono-incineration) tarkoitetaan lietteen polttamista erillispolttolaitoksessa, jossa ei polteta lietteen lisäksi muita polttoaineita. Suomessa lietteen erillispoltto on vielä harvinaista, mutta etenkin Keski-Euroopassa poltto on muodostunut yleiseksi lietteen loppukäsittelymenetelmäksi. Aikaisemmin lähtökohtana polton yleistymisessä on ollut tarve vähentää lietteen määrää. Sittemmin myös positiiviset vaikutukset lietteessä olevien haitta-aineiden tuhoutumisessa ovat nostaneet polton kehityimmäksi termiseksi lietteen loppukäsittelymenetelmäksi. Polton aikana lietteen sisältämät orgaaniset haitta-aineet, lääkeaineet ja mikro-  
muovit tuhoutuvat täysin, samoin myös lietteen mikrobit (Pöyry Finland 2019, 62). Viime vuosina myös ravinteiden talteenoton mahdollisuudet ovat myötävaikuttaneet vahvasti etenkin lietteen erillispoltton kehitykseen ja referensseihin.

Erillispoltossa liete poltetaan hapellisissa olosuhteissa noin 850–950 °C lämpötilassa, viipymäaika poltossa on hyvin lyhyt, noin 2–10 sekuntia. Alle 850 °C lämpötilassa voi aiheutua hajuhaittoja ja yli 950 °C lämpötilassa puolestaan tuhkan sintrautumista. Polton lämpötilaan vaikuttaa etenkin lietteen lämpöarvo sekä palamiseen tarvittavan ilman määrä ja happipitoisuus. Liete on erillispolttoa varten kuivattava ensin termisesti, jotta saavutetaan riittävä kuiva-ainepitoisuus ja lämpöarvo. Keskeisiä ominaisuuksia lietteen poltossa ovat kuiva-ainepitoisuus, orgaanisen aineen (palavan aineen) osuus kuiva-aineesta, raaka- ja biolietteen suhteelliset osuudet koko puhdistamolietteestä sekä lietteeseen lisätyt ainekset (esimerkiksi kalkki jätevedenpuhdistuksessa). Polttoon johdettavan lietteen optimaalinen kuiva-ainepitoisuus on aina tapauskohtainen, käytännössä kuiva-ainepitoisuus riippuu polton energiata-  
seesta ja käytetystä polttotekniikasta. (Pöyry Finland 2019, 63–66.) Lietteiden poltto kuuluu jätteenpolttodirektiivin alle, jonka mukaan viipymääjan on oltava yli 2 sekuntia ja lämpötilan yli 850 °C.

Polttotekniikoita on useita, mutta lietteen erillispoltossa yleisimmin käytettyjä tekniikoita ovat leijupetikattilat. Leijupetikattilat voivat olla kerrosleijupeti- tai kierto-leijupetikattiloita. Muita käytettäviä polttotekniikoita ovat mm. arinakattilat, sykloniunit, pyöröunit sekä pyörivät ja kuplaleijupetiuunit. (Pöyry Finland 2019, 63.) Kuvassa 12 on esitettyä lietteen polttoon käytetty kerrosleijupetikattila.



**Kuva 12.** Kerrosleijupetikattila (Pöyry Finland 2019, 64).

Leijupetikattiloita käytetään etenkin biomassan polttoon ja myös lietteen polttoon ne soveltuvat hyvin. Euroopan unionin alueella yli 90 % lietteen erillispolttolaitoksista toimii leijupetiteknikalla. Leijupetikattilassa muodostetaan leijutushiekasta ja poltettavasta materiaalista peti, jota leijutetaan alapuolelta johdettavan ilman avulla. (Pöyry Finland 2019, 63.) Leijupetikattilaan johdettava liete on yleensä osittain kuivattua lietettä (40–50 tai 60–85 % TS), jota on pidetty taloudellisempana vaihtoehtona kuin täysin kuivattua lietettä. Leijupetissä liete kuivuu välittömästi kuumassa hiekkapedissä eikä monissa menetelmissä kuivata täydellisesti termisillä kuivauksella yli 85 % kuiva-ainepitoisuuteen asti. (Pöyry Finland 2019, 65–66.) Endev-teknologia on tässä poikkeus, siinä liete kuivataan termisesti yli 95 % kuiva-ainepitoisuuteen ennen leijupolttoa. Leijupetiteknikkaa on pidetty perinteisesti suurten laitosten (yli 40 000 t/a (30 % TS)) tekniikkana (Pöyry Finland 2019, 66). Keskisuuren ja pienen kokoluokan laitoksiin on käytetty arinapolttota. Endev-teknologia on myös tässä poikkeus, Endev-teknologian leijupetiteknikka on kehitetty myös pienen ja keskisuuren kokoluokan laitoksille.

Lietteen poltossa lietteen orgaanisen aineksen sisältämä kemiallinen energia vapautuu lämpöenergiana hyödynnettävään muotoon. Polton tuottamaa energiaa voidaan siirtää esimerkiksi höyryyn, jota voidaan hyödyntää sähkön ja/tai lämmön tuotannossa. Valtaosa tuotetusta energiasta kuluu kuitenkin lietteen termisen kuivauksen tarpeisiin (Pöyry Finland 2019, 63). Lietteen poltossa syntyy myös tuhkaa, johon lietteen poltossa reagoimaton kiintoaine,

raskasmetallit ja valtaosa fosforista sitoutuu. Tuhkaa saadaan prosessista pohjatuhkana kattilan pohjalta ja lentotuhkana savukaasuista erotettuna. Poltossa syntyvät savukaasut on käsiteltävä asianmukaisesti savukaasujen käsittelytekniikoilla ennen niiden johtamista laitoksesta ilmakehään. Käsittelytekniikoina käytetään tavallisia savukaasujen käsittelymenetelmiä, joita ovat mm. lentotuhkan poisto kuitu- tai sähkösuodattimella tai syklonilla, typen oksidien pelkistys ja rikkidioksidin sidonta esimerkiksi märkäpesurilla. Lisäksi lietteessä on raskasmetalleja ja elohopeaa, jolloin aktiivihiilisuodatusta voidaan tarvita (Pöyry Finland 2019, 69). Kokonaiskustannukset puhdistamolietteen erillispoltolle ovat noin 100–120 €/t (30 % TS) (Pöyry Finland 2019, 96).

Lietteen erillispoltossa saadaan lietteen lämpöarvon verran energiaa vapautettua jokaista poltettua lietekiloa kohden. Lietteen erillispolttoon syötettävän lietteen lämpöarvo on tyypillisesti noin 4,8–6,5 MJ/kg (Pöyry Finland 2019, 69). Lietteen lämpöarvon on oltava vähintään 3,5 MJ/kg, jotta palamisreaktio ja terminen kuivaus toimivat autonomisesti ilman muita polttoaineita. Polttoon voidaan ohjata myös mädätettyä lietettä. Lietteen mädätys pienentää aina lietteen lämpöarvoa, koska lietteen orgaanisen aineksen osuus pienenee mädätysprosessissa (Pöyry Finland 2019, 69). Tällöin varsinaisesta polttoprosessista ei saada niin paljoa energiaa talteen, mutta mädätyksen lopputuotteena syntyvästä biokaasusta saadaan energiaa talteen. Perinteisesti on katsottu, että mädätetyn lietteen polttoa ei pidetä kovin järkevänä lietteen jatkokäsittelynä etenkin huonon lämpöarvon takia (Lohiniva et al. 2001, 43). Mädätyksen ja polton yhdistelmässä myös investointikustannukset kasvavat.

Puhdistamolietteen kuiva-aineen lämpöarvot vaihtelevat välillä 14–18 MJ/kg TS (3,8–5,0 kWh/kg TS). Raakalietteellä lämpöarvo on noin 17–18 MJ/kg TS ja biolietteellä noin 14–16 MJ/kg TS, joten raaka- ja biolietteen suhteelliset osuudet vaikuttavat lietteen kuiva-aineen lämpöarvoon (tyypillisesti puhdistamolietteestä 60 % raakalietettä ja 40 % biolietettä). Mädätetyllä lietteellä kuiva-aineen lämpöarvo on noin 8–12 MJ/kg (2,2–3,3 kWh/kg TS), joten lämpöarvo putoaa noin kolmanneksen mädätyksen aikana. (Durdevic et al. 2019, 4.) Durdevic et al. (2019) esittää polton energiatehokkuuden määräytyvän poltossa vapautuvan energiamäärän ja termiseen kuivaukseen vaatiman energiamäärän energiataaseena. Mikäli energiataase on positiivinen (poltossa vapautuu enemmän energiaa kuin terminen vie kuivaus energiaa), saadaan poltolla energiaa talteen lämpöenergiana.



$$Q_{EB} = Q_{HR} - Q_{DE} \quad (1)$$

jossa  $Q_{EB}$  on polton energiatase [kWh/kg TS],  $Q_{HR}$  on poltosta talteen saatu energiamäärä [kWh/kg TS] ja  $Q_{DE}$  on kuivaukseen käytetty energiamäärä [kWh/kg TS].

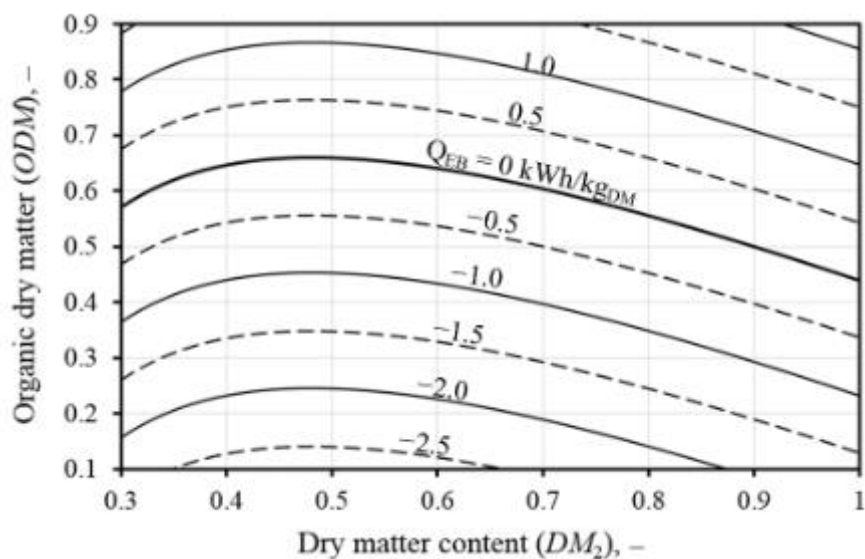
$$Q_{HR} = \eta q = \eta [6,0 \cdot ODM - 4,9(1 - DM_2)] \quad (2)$$

jossa  $\eta$  on energian talteenoton tehokkuus,  $q$  on lietteen alempi lämpöarvo,  $ODM$  on lietteen orgaanisen kuiva-aineen osuus ja  $DM_2$  lietteen kuiva-aineen osuus termisen kuivauksen jälkeen.

$$Q_{DE} = 0,9 \left( \frac{1}{DM_1} - \frac{1}{DM_2} \right) \quad (3)$$

jossa  $DM_1$  on lietteen kuiva-aineen osuus ennen termistä kuivausta.

Yhtälössä 2 esiintyvä lietteen alempi lämpöarvo ei tarvitse olla tiedossa, vaan yhtälö voidaan ratkaista arvioimalla lämpöarvo orgaanisen kuiva-aineen ( $ODM$ ) ja kuiva-aineen osuuden ( $DM_2$ ) perusteella. Kuvassa 13 on esitettyä lietteen orgaanisen aineen osuuden ja kuiva-aineen osuuden vaikutus polton energiataseeseen.



**Kuva 13.** Orgaanisen aineen ja kuiva-aineen vaikutus polton energiataseeseen (Durdevic et al. 2019, 13).

Kuvasta 13 nähdään, että polton energiatase on aina negatiivinen riippumatta termisen kuivauksen jälkeisestä kosteudesta, jos orgaanisen kuiva-aineen osuus on alle 0,44. Oletuksena on käytetty  $\eta = 0,8$  ja  $DM_1 = 30\%$ . Tämä on mahdollista etenkin mädätetylle lietteelle, jolla orgaanisen aineksen pitoisuus ja lämpöarvo (alle 2,6 kWh/kg TS) ovat alhaisia (Durdevic et al. 2019, 12). Kuvasta nähdään myös, että orgaanisen kuiva-aineen osuuden ollessa 0,57, polton energiatase olisi tasan nolla, vaikka lietettä ei kuivattaisi termisesti ollenkaan ( $DM_2 = DM_1 = 0,3$ ). Tällöin poltossa vapautuvaa energiaa käytetään täysin kuivaukseen. Teoriassa yli 0,57 % orgaanisella kuiva-aineen osuudella päästään energiataseessa positiiviselle puolelle eikä termistä kuivauksia tarvittaisi. Termisellä kuivauksella päästään kuitenkin 0,8–0,9 kuiva-ainepitoisuuksiin, jolloin polton energiatase kasvaa ja lietteestä saadaan enemmän energiaa talteen.

Lietteen poltossa syntyvää lämpöenergiaa otetaan talteen poltossa syntyvästä savukaasusta. Suuremmissa laitoksissa poltosta vapautuvalla lämpöenergialla voidaan tehdä höyryä, jota voidaan käyttää sähkön tuotantoon höyryturbiinilla. Höyryturbiinin jälkeen höyryn lämpöenergiaa hyödynnetään termiseen kuivaukseen ja osa voidaan käyttää esimerkiksi kaukolämmön tuotannossa. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto rajoittuu tyypillisesti vain suuriin laitoksiin, pienissä laitoksissa höyryn ja sähkön tuotanto ovat yleensä kannattamattomia. Pienissä laitoksissa energiaa saadaan talteen savukaasuista lämmittämällä esimerkiksi termöljyä, jota voidaan hyödyntää lämpöenergiana termisessä kuivauksessa ja kaukolämmön

tuotannossa. (Tsybina & Wuensch 2018, 8.) Taulukossa 4 on esitettyä muutamien eri kokoluokkien lietteenpolttolaitosten energiataseita.

**Taulukko 4.** Eri kokoluokan lietteenpolttolaitosten energiataseita (Tsybina & Wuensch 2018, 8).

Kapasiteetti	35 000 t/a TS ( $\approx 120\,000$ t/a 30 % TS)	4 000 t/a TS ( $\approx 14\,000$ t/a 30 % TS)	2 000 t/a TS ( $\approx 7\,000$ t/a 30 % TS)
Polttoaineteho	14,5 MW	1,9 MW	0,95 MW
Termiseen kuivaukseen käytetty lämpöteho	7 MW	0,7 MW	0,43 MW
Tuotettu sähköteho	1,4 MW	-	-
Sähkönkulutus	1 MW	0,11 MW	0,07 MW

Taulukosta 4 voidaan nähdä, että noin 120 000 t lietettä (30 % TS) vuodessa tuottavan jätevedenpuhdistamon lietteet käsittelevä polttolaitos tuottaisi lietteen palamisessa noin 14,5 MW polttoainetehon. Tyypillisesti noin 80 % polttoainetehosta saadaan talteen, joten noin 11,6 MW polttoainetehosta saataisiin lämpötehoksi hyödynnettävään muotoon höyryä. Höyrystä saadaan sähköä noin 1,4 MW, josta 1 MW kuluu laitoksen omaan käyttöön. Sähköntuotannon jälkeen 7 MW lämpöteho tarvitaan lietteen termiseen kuivaukseen, joten esimerkiksi kaukolämmön tuotannossa hyödynnettävä lämpöteho tämän kokoluokan laitoksessa olisi noin 3,2 MW<sub>th</sub>. Laitoksen ulkopuolelle myytävä sähköteho olisi noin 0,4 MW<sub>el</sub>. Tuotettuna energiana vuodessa nämä olisivat laitoksen käydessä vuoden ympäri katkeamattomasti noin 3 500 MWh<sub>el</sub>/a ja 28 000 MWh<sub>th</sub>/a. Tämän kokoluokan laitos on erittäin suuri, 120 000 t lietettä (30 % TS) vuodessa käsittelevä laitos vastaisi yli miljoonan ihmisen jätevesien käsittelystä syntyvää lietemäärää vuodessa.

Puhdistamolietteen erillispolton lopputuotteena syntyy tuhkaa, johon ravinteista fosfori on sitoutunut. Fosforin talteenotto tuhkasta on mahdollista erilaisin menetelmin, jotka perustuvat fosforin termiseen tai kemialliseen erottamiseen tuhkasta. Tuhkaa voitaisiin teoriassa käyttää sellaisenaan lannoitteena, mutta sen suorassa hyödyntämisessä haasteina ovat olleet tuhkan korkeat raskasmetallipitoisuudet. Fosforin talteenoton jälkeen jäljelle jää jäännöstuhka, joka voidaan hyödyntää muun tuhkan tavoin esimerkiksi asfaltin, sementin tai tiilien raaka-aineena tai maanrakentamisessa tai loppusijoittaa kaatopaikalle. (Pöyry Finland 2019, 66–67.) Kuvassa 14 on esitettyä lietetuhkan tyypillinen koostumus.

Piidioksidi	SiO <sub>2</sub>	35 - 40 %
Alumiinioksidi	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15 - 20 %
Ferrioksidi	FeO <sub>3</sub>	10 - 20 %
Kalsiumoksidi	CaO	15 - 25 %
Fosforioksidi	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10 - 23 %

**Kuva 14.** Lietetuhkan tyypillinen koostumus (Pöyry Finland 2019, 67).

Fosfori on tuhkassa fosforidioksidin muodossa. Lietetuhkassa fosforin pitoisuus koko tuhkasta on tyypillisesti noin 8–9 %. Poltossa fosfori päätyy kasveille huonommin soveltuvaan muotoon, joten sen talteenotto hyödynnettävään muotoon on tärkeää fosforin kierrätyksen mahdollistamiseksi. Teoriassa noin 90 % puhdistamolietteen sisältämästä fosforista olisi mahdollista saada talteen polttotuhkan käsittelyllä. Jos jätevedenpuhdistamolla poistetaan noin 90 % jäteveden sisältämästä fosforista, kokonaisuudessaan 80 % jäteveden sisältämästä fosforista olisi kierrätettävissä fosforin talteenotolla tuhkasta. (Tsybina & Wuensch 2018, 9–10.) Tällä hetkellä potentiaalisimpia menetelmiä fosforin talteenottoon ovat mm. EcoPhos, TetraPhos, Ash2Phos, Phos4Life ja Outotec ASH DEC -menetelmät (Pöyry Finland 2019, 67).

Ravinteista typpi menetetään poltossa typpikaasuksi savukaasujen mukana (Manninen & Laitinen 2016, 14). Typpiä on kuitenkin mahdollista saada talteen polttoa edeltävästä termisestä kuivauksesta. Termisessä kuivauksessa syntyvässä poistokaasussa on typpiä sisältävää ammoniakkia (NH<sub>3</sub>), joka on kuivauksen merkittävin hajupäästöjen aiheuttaja. Ammoniakkia voidaan poistaa happopesurilla, jonka tuotteena syntyy ammoniakkipitoista liuosta, kuten ammoniakkisulfaattia tai ammoniakkivettä. Liuosta voitaisiin käyttää esimerkiksi neste-mäisenä typpilannoitteena tai lannoiteteollisuuden raaka-aineena. Tällä hetkellä termisestä kuivauksesta saatavaa ammoniakkiliuosta ei kuitenkaan juurikaan käytetä matalan typpipitoisuuden, liuoksen epäpuhtauksien sekä kuljetus- ja levityskustannusten takia. Mikäli liuosta ei saada johdettua hyötykäyttöön, se yleensä joudutaan johtamaan viemäriin ja takaisin jätevedenpuhdistamolle. Esimerkiksi pitoisuudeltaan noin 20 % ammoniumsulfaattiliuosta syntyy noin 10–15 L/t lietettä (kuivaus 30 % → 90 % TS). (Pöyry Finland 2019, 31.)

Erillispoltton etuina ovat lietteen sisältämien haitta-aineiden ja mikromuovien tuhoutuminen sekä prosessin energiaomavaraisuus ja energian tuotanto laitoksen ulkopuolelle. Haittapuolina ovat etenkin leijupetitekniikalla suuri laitostekniikka (pois lukien Endev-teknologia), terminen kuivauksen vaatimus lietteelle ennen polttoa ja monesti tuhkan kelpaamattomuus sellaisenaan lannoitteeksi (ravinteiden talteenottokäsittely monesti pakollista). (Pöyry Finland 2019, 111.)

### 4.3 Poltto yhteispolttona

Puhdistamolietettä voidaan polttaa voimalaitoskattiloissa yhteispolttona (engl. co-incineration) erityyppisissä polttolaitoksissa yhdessä muiden polttoaineiden kanssa. Lietteen yhteispolttoa toteutetaan useimmiten tavanomaisissa voimalaitoksissa tai jätteenpolttolaitoksissa, jotka käyttävät polttoaineenaan mm. yhdyskuntajätettä, kivihiiltä, turvetta tai biomassaa. Soveltuvia polttokattiloita ovat mm. kiertoleiju-, kerrosleiju- ja pölypolttokattilat. Lietteen poltto yleensä pienentää koko polttoprosessin energiataloutta lietteen korkean kosteuspitoisuuden vuoksi. Lietteen poltto voi aiheuttaa myös kerrostumien muodostumista kattilan lämpöpinnoille sekä savukaasumäärän lisääntymistä ja korroosiota. Polttotekniikasta ja muusta polttoaineesta riippuen lietteen kuiva-ainepitoisuuden tulee olla vähintään 25–45 %, joten polttoaineeksi voi sopia tapauskohtaisesti myös vain mekaanisesti kuivattu liete. Joissakin tapauksissa tarvitaan kuitenkin jopa yli 85 % kuiva-ainepitoisuutta. Lietteen lämpöarvoksi yhteispoltossa riittää tyypillisesti vain noin 2,2–4,8 MJ/kg. Voimalaitoksissa lietteen osuus on tyypillisesti korkeintaan 5 % koko polttoaineseoksesta. Yhdyskuntajätettä polttavissa jätteenpolttolaitoksissa lietteen osuuden suositellaan olevan enintään 20 % koko polttoaineseoksesta. (Pöyry Finland 2019, 71–73.)

Lietettä voidaan polttaa myös sementtiuuneissa, jolloin voidaan vähentää fossiilisen polttoaineen käyttöä ja hyödyntää lietteen sisältämää mineraaliainesta sementin raaka-aineena. Sementtiuuneissa lietettä voidaan käyttää korkeintaan noin 15 % osuutena polttoaineesta, liiallinen lietteen lisääminen prosessiin voi heikentää sementin kestävyyttä liian korkeiden fosfori- ja rikkipitoisuuksien takia. (Pöyry Finland 2019, 73.)

Voimalaitoskattiloissa poltettaessa käsittelylämpötilat ovat erillispoltton tapaan noin 850–950 °C ja viipymäaika noin 2–10 sekuntia. Sementtiuunissa poltettaessa käsittelylämpötilat

ovat hieman korkeammat, noin 900–1 450 °C, ja viipymäaika noin 30 min (Pöyry Finland 2019, 78.) Lopputuloksena syntyy erillispolton tapaan tuhkaa, jota saadaan kattilasta pohja- ja lentotuhkana. Tuhkien käyttömahdollisuudet riippuvat muun polttoaineen laadusta ja tuhkaa voidaan hyödyntää esimerkiksi rakentamisen materiaalina tai se voidaan loppusijoittaa kaatopaikalle (Pöyry Finland 2019, 74.) Fosforin talteenotto tuhkasta on kuitenkin kannattavaa vain tuhille, joissa fosforipitoisuus on suuri. Lietteen erillispoltossa tuhkan fosforipitoisuudet ovat riittävän suuria fosforin talteenottoon, mutta yhteispoltossa fosfori menetetään tuhkan sekaan. Sementtiuunissa lietettä poltettaessa fosfori puolestaan menetetään sementin sekaan. (Durdevic et al. 2019, 4–5.) Kokonaiskustannukset lietteen yhteispoltolle ovat hieman erillispolttoa pienemmät, noin 50–100 €/t (30 % TS) (Pöyry Finland 2019, 96).

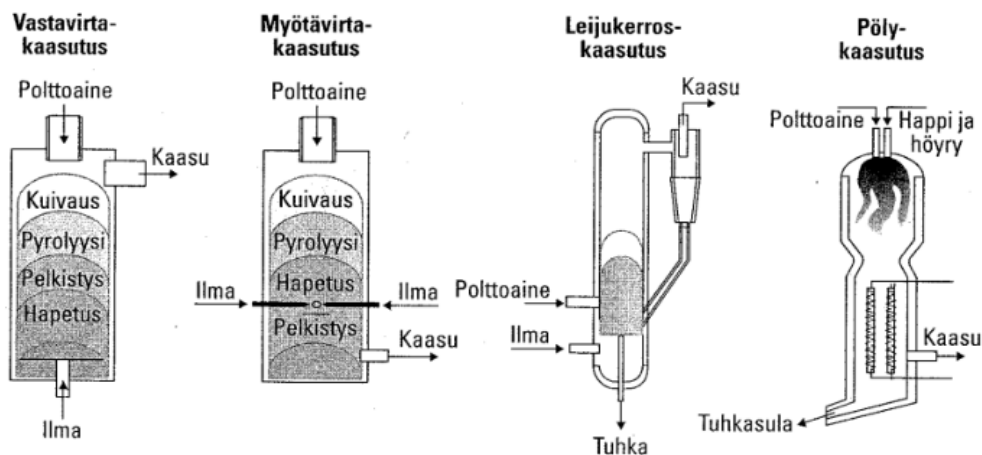
Yhteispolton etuina ovat haitta-aineiden ja mikromuovien tuhoutuminen, mahdollisuus hyödyntää jo olemassa olevia laitoksia sekä mineraalien hyötykäyttö ja fossiilisten polttoaineiden korvaaminen sementin valmistuksessa. Haittapuolina ovat taas olemassa olevien laitosten kapasiteettien niukkuus, haasteet laitoksen operoinnissa lietteen alhaisen lämpöarvon takia, monesti vaatimus lietteen termiselle kuivaukselle ennen polttoa sekä ravinteiden menetyt. (Pöyry Finland 2019, 111.)

#### **4.4 Kaasutus**

Puhdistamolietteen kaasutus on mahdollista samaan tapaan kuin biomassan kaasutus. Kaasutuksessa lietteestä tuotetaan energiapitoista kaasua vähähappisissa olosuhteissa. Kaasutus tapahtuu polton tapaan noin 800–900 °C lämpötilassa, mutta kaasutusreaktoriin syötetään vain noin 30 % teoreettisesta täydellisen polton vaatimasta happimäärästä. Viipymäaika on polton tapaan lyhyt, noin 2–10 sekuntia. Kaasutuksen vaiheita ovat kuivaus, pyrolyysi, pelkistys ja hapetus. Kaasutuksen lopputuotteena syntyy polttoainekäyttöön soveltuvaa tuotekaasua, jonka palava osuus koostuu hiilimonoksidista (CO), vetykaasusta (H<sub>2</sub>) sekä metaanista (CH<sub>4</sub>) ja muista kevyistä hiilivedyistä. Kaasutuksessa osa lietteen orgaanisesta aineesta palaa reaktoriin syötettävän ilman johdosta, jolla tuotetaan kaasutuksen vaatima lämpötila. Loppuosa orgaanisesta aineesta muuttuu kaasumaiseen muotoon suuren lämpötilan johdosta. Kaasu ei pala reaktorissa, koska happea syötetään reaktoriin alimääräisesti. Kaasutuksessa syntyy myös polttotuhkan kaltaista kiintoainetta, joka sisältää polton tapaan reagoimattonta kiintoainesta tuhkana, mutta polttotuhkasta poiketen myös hiiltä. Tuhkan osuus

jäännöskiintoaineesta on noin 55–75 % ja hiilipitoisuus vaihtelee tekniikasta riippuen 0,1 % ja 20 % välillä. (Pöyry Finland 2019, 55.) Orgaanisten haitta-aineiden, lääkejäämien ja mikromuovien tuhoutuminen on kaasutuksessa polton tapaan erittäin tehokasta korkean lämpötilan johdosta (Pöyry Finland 2019, 81).

Kaasutustekniikoita on useita ja niistä tärkeimmät ovat kiintopeti-, leijupeti- ja pölykaasutus. Kiintopetikaasutuksessa polttoaine tuodaan reaktoriin yläpuolelta ja on reaktorissa paikallaan. Tuhkaa poistetaan reaktorin alaosasta. Kiintopetikaasutus voidaan toteuttaa myötävirta-, vastavirta- tai ristivirtakaasutuksena riippuen ilman ja tuotekaasun virtaussuunnasta toisiinsa nähden. Kiintopetikaasutuksella saadaan noin 60–70 % lietteen sisältämästä energiasta vapautettua. Leijupetikaasutus on periaatteeltaan leijupetipolton kaltainen tekniikka, jossa polttoainetta leijutetaan kaasutusreaktorissa. Tuotekaasu poistetaan reaktorin yläpäästä ja tuhka reaktorin pohjalta. Tuhkapatikkeleita poistetaan myös syklonissa, johon tuotekaasu ohjataan reaktorista. Leijupetikaasutuksella voidaan vapauttaa noin 65–75 % lietteen energiasisällöstä. Pölykaasutuksessa polttoaine, happi ja höyry johdetaan reaktorin yläosaan ja kaasua saadaan reaktorin keskiosalta. Pölykaasutuksella voidaan vapauttaa noin 80 % lietteen energiasisällöstä, mutta se vaatii muita menetelmiä enemmän ulkoista energiaa. (Pöyry Finland 2019, 56.) Kuvassa 15 on esitettyä eri kaasutustekniikoiden periaatteet.



**Kuva 15.** Kaasutustekniikat (Pöyry Finland 2019, 56).

Lietteen kaasutuksessa yleisimmin käytetty tekniikka on leijupetikaasutus (leijukerroskaasutus) ja se on käytössä kaikissa täyden mittakaavan lietteen kaasutuslaitoksissa. Kaasutukseen

voidaan syöttää niin mädättämätöntä kuin mädätettyä lietettä, mutta mädätys vähentää tuotekaasun energiasisältöä. Liete on kuivattava termisesti ennen kaasutusta täysin noin 85–95 % kuiva-ainepitoisuuteen asti. (Pöyry Finland 2019, 56.) Kaasutuksen etu on, että syntyvä tuotekaasu voidaan polttaa korkeammassa lämpötilassa kuin liete, jolloin poltto on tehokkaampaa. Tuotekaasu voidaan polttaa polttokattilan lisäksi myös kaasumoottorissa, jolloin voidaan saavuttaa sähköntuotannossa korkeampia hyötysuhteita kuin lietteen poltolla. (Pöyry Finland 2019, 55.) Tuotekaasu täytyy kuitenkin puhdistaa partikkeleista ennen polttoa suodatuksella. Tuotekaasussa on myös tervamaisia öljyjä, jotka on poistettava esimerkiksi märkäpesurilla, mikäli kaasu poltetaan polttomoottorissa. Tuotekaasun puhdistuksessa muodostuu kiinteitä jätteitä suodatuksesta ja jätevesiä märkäpesurista. Kun tuotekaasu poltetaan, syntyy tästä savukaasuja, jotka on myös käsiteltävä poltossa syntyvien savukaasujen tapaan. Tuotekaasun poltosta syntyvät savukaasumäärät ovat kuitenkin lietteen polttoa pienemmät ja lentotuhkaa on vähemmän. (Pöyry Finland 2019, 57–58.)

Lietteen kaasutuksen referenssilaitokset ovat kokoluokaltaan noin 7 000–35 000 t/a (30 % TS) käsitteleviä laitoksia. Myös joitakin aivan pieniä, vain noin 1 700 t/a (30 % TS) kokoisia laitoksia on kehitetty. Kaasutuksella tuotetaan yleensä kaasumoottorille soveltuvaa tuotekaasua, jolloin laitoksen monimutkaisuus kasvaa tuotekaasun puhdistusvaatimusten takia. Taloudellisesti järkevän laitoksen kokoluokan arvioidaan olevan keskisuurten tai suurten laitosten kokoluokassa (yli 30 000 t/a (30 % TS)). (Pöyry Finland 2019, 57.) Kokonaiskustannukset lietteen kaasutukselle ovat noin 100–130 €/t (30 % TS) (Pöyry Finland 2019, 96).

Kaasutuksessa saadaan teoriassa vapautettua noin 60–80 % lietteen energiasisällöstä tuotekaasun muotoon. Tuotekaasun lämpöarvo on noin 2,5–5 MJ/m<sup>3</sup> riippuen lietteen lämpöarvosta ja kaasun tuotantomääräksi on raportoitu noin 1,7 m<sup>3</sup>/kg lietettä (Pöyry Finland 2019, 57). Kaasutuslaitoksen sähkönkulutuksen on arvioitu olevan noin 100–150 kWh<sub>el</sub>/t lietettä (20–30 % TS) (Pöyry Finland 2019, 96).

Ainoastaan muutamasta laitoksesta löytyy tietoa kirjallisuudesta. Esimerkiksi kokoluokaltaan noin 4 500 t/a TS (≈15 000 t/a (30 % TS)) laitoksen teoreettinen polttoaineteho on noin 2,3 MW. Laitos käyttää mädätettyä lietettä kaasutusprosessin polttoaineena. Laitoksessa tuo-



tekaasu käytetään kaasumoottorilla sähkön ja lämmön yhteistuotantoon, jolloin saadaan tuotettua sähköä noin  $0,6 \text{ MW}_{\text{el}}$  ja lämpöä noin  $0,8 \text{ MW}_{\text{th}}$ . Laitoksella katetaan kaasutuslaitoksen yhteydessä olevan jätevedenpuhdistamon mekaaninen ja terminen lietteen kuivaus sekä kaasutuksessa tarvittu energia. Laitoksen ulkopuolelle energiaa ei laitoksella pystytä tuottamaan. (Tsybina & Wuensch 2018, 8.)

Kaasutuksessa syntyvää kiintoainetta (tuhkaa) on mahdollista käsitellä polttotuhkan tapaan. Kaasutuksessa syntyvä tuhka voi kuitenkin sisältää haitallisia PAH-yhdisteitä, joita syntyy kaasutuksen alihapellisissa olosuhteissa. Kaasutuksen tuhka sisältää polton tuhkan tapaan raskasmetalleja, jolloin tuhkan suora hyötykäyttö ravinteena on hankalaa. Tuhkan käyttömahdollisuudet ovat käytännössä vastaavat kuin polttotuhkan eli tärkeimmät hyödyntämis-kohteet ovat maanrakennuksessa sekä esimerkiksi asfaltin, sementin ja tiilien valmistuksessa. Ravinteista fosforin hyödyntäminen tuhkasta vaatii fosforin talteenottoa, joka teoriassa voidaan toteuttaa samoilla menetelmillä kuin polttotuhkasta. (Pöyry Finland 2019, 114.)

Ravinteista typpi menetetään polton tapaan kaasutuksessa. Typpi on typpikaasun muodossa haihtuneena tuotekaasussa eikä sen talteenotto ole mahdollista (Tsybina & Wuensch 2018, 10). Typeä olisi kuitenkin mahdollista saada talteen kaasutusta edeltävän termisen kuivauksen poistokaasun käsittelystä syntyvästä ammoniakkipitoisesta liuoksesta.

Lietteen kaasutuksen etuina ovat haitta-aineiden ja mikromuovien tuhoutuminen sekä kaasumoottoriin soveltuvan kaasun tuottaminen (energian tuotanto hyvällä hyötysuhteella). Haittapuolina ovat termisen kuivauksen vaatimus, polttoa monimutkaisempi prosessi ja monesti tuhkan kelpaamattomuus sellaisenaan lannoitteeksi (ravinteiden talteenottokäsittely monesti tehtävä). (Pöyry Finland 2019, 111.)

## 4.5 Pyrolyysi

Pyrolyysillä tarkoitetaan termistä muuntamista kokonaan hapettomissa olosuhteissa. Pyrolyysiä voidaan käyttää kaikenlaisen orgaanisen massan käsittelyyn. Pyrolyysissä materiaali kuivuu täysin ja muuntuu termokemiallisten reaktioiden seurauksena kaasujakeeseen ja kiin-

teään jakeeseen sekä höyryihin, jotka jäähtyessään tiivistyvät pyrolyysiöljyksi. Puhdistamolietteen pyrolyysissä tavoitteena on tuottaa hyödynnettävää pyrolyysihiiltä, joka on pyrolyysissä syntyvää kiinteää jaetta. (Pöyry Finland 2019, 45.)

Pyrolyysissä liete kuumennetaan hapettomissa olosuhteissa noin 450–650 °C lämpötilassa ja viipymäaika on noin 15–30 min. Käsittelyn aikana liete ensin kuivuu kuivaksi noin 100 °C:ssa, minkä jälkeen lämpötila nousee noin 100–350 °C:een. Tällä lämpötila-alueella tapahtuvat varsinaiset pyrolyysi- eli hiiltymisreaktiot, jossa myös valtaosa pyrolyysikaasuista ja -öljyistä tuotetaan. Tämän jälkeen liete kuumenee edelleen vielä pyrolyysin maksimilämpötilaan ja hiiltyminen etenee edelleen. Kun haluttu viipymäaika on saavutettu, hiiltynyt materiaali poistetaan reaktorista jäähdytykseen. Lopuksi materiaali kostutetaan itsesyttymisvaaran vähentämiseksi. (Pöyry Finland 2019, 46.)

Pyrolyysissä syntyvien hiili-, höyry- ja kaasujakeiden suhteelliset osuudet riippuvat käytetystä lämpötilasta, korkeammassa lämpötilassa kaasumaisten aineiden osuus on suurempi ja nestemäisten ja kiinteän jakeen osuudet taas vastaavasti pienempiä. Kaasumaista jaetta kutsutaan pyrolyysikaasuksi, joka sisältää mm. vetyä, metaania, hiilimonoksidia ja hiilidioksidia. Höyryjaetta kutsutaan pyrolyysiöljyksi, joka tiivistyy lämpötilan laskiessa tervamaisiksi öljyiksi. Pyrolyysiöljy sisältää mm. etikkahappoa, asetonia, metanolia ja monimutkaisia happea sisältäviä hiilivetyjä. Kiinteä jae on pyrolyysihiiltä, joka sisältää mm. hiiltä, reagoimattomia materiaalia, raskasmetalleja ja muita haihtumattomia yhdisteitä. (Pöyry Finland 2019, 46.)

Pyrolyysissä lämpötila on selvästi polttoa ja kaasutusta matalampi, jonka johdosta lietteen haitta-aineiden tuhoutumista on tutkittu laajalti. Orgaanisten haitta-aineiden ja lääkeaineiden pitoisuudet ovat valtaosin todettu vähäisiksi yli 400 °C lämpötilassa. Valtaosa mikro-  
muoveista on myös todettu hajoavan alle 450 °C lämpötilassa. Suurempi lämpötila lisää prosessin energiantarvetta ja vähentää pyrolyysihiilen määrää. (Pöyry Finland 2019, 46.)

Ennen pyrolyysiä liete on kuivattava termisesti. Termisen käsittelytekniikan valinnalla voidaan vaikuttaa lietteen raekokoon ja siten pyrolyysin toimintaan. Itse pyrolyysi voidaan toteuttaa joko hitaalla tai nopealla pyrolyysillä. Useimmiten tavoitteena on hyödynnettävän

pyrolyysihiilen tuotanto, jonka vuoksi hidas pyrolyysi on lietteille käytetty tekniikka. Pyrolyysi voidaan toteuttaa panos- tai jatkuvatoimisella reaktorilla. Jatkuvatoimiset reaktorit ovat yleisimpiä ja niitä on markkinoilla kahta tyyppiä, ruuvikuljettimilla varustettuja reaktoreita ja pyöröuuneja. Tyypillisesti pyöröuunit ovat kapasiteetiltaan suuria ja ruuvikuljettimet pieniä. Reaktoria lämmitetään epäsuorasti lämmittämällä pyöröuunin tai ruuvikammion vaippaa tai itse ruuvia, joissakin yksiköissä lämmitys tapahtuu suoraan johtamalla palokaasuja pyrolyysireaktorin sisään tai sähköllä. (Pöry Finland 2019, 46–47.)

Pyrolyysin ja termisen kuivauksen lämmöntarve katetaan pyrolyysissä syntyvien höyryjen ja kaasujen poltosta vapautuvalla lämmöllä. Apupolttoaineena voidaan käyttää mm. maa-kaasua tai öljyä. (Pöry Finland 2019, 47.) Pyrolyysissä syntyvät höyryt voitaisiin teoriassa tiivistää pyrolyysiöljyksi ja myydä laitoksen ulkopuolelle mm. polttoaineeksi. Pyrolyysiöljyn tuotanto lisää kuitenkin laitoksen monimutkaisuutta eikä sitä ole olemassa olevissa laitoksissa toteutettu. Höyryjen ja kaasujen poltossa syntyy savukaasuja, jotka on käsiteltävä vaatimusten mukaisesti. Tyypillisesti tarvitaan ainakin partikkelien suodatus, happamien yhdisteiden ja typpiyhdisteiden käsittely sekä mahdollisesti myös aktiivihiilikäsittely. (Pöry Finland 2019, 49.)

Lietteiden pyrolyysitekniikan kokoluokkia ovat pienet, noin 5 000–15 000 t/a (30 % TS) käsittelevät ruuvitoimiset yksiköt, sekä suuremmat, yli 25 000 t/a (30 % TS) käsittelevät pyöröuuniyksiköt. Kannattavaksi suuruusluokaksi arvioidaan yli 15 000 t/a (30 % TS) (Pöry Finland 2019, 47.) Kokonaiskustannukset lietteen pyrolyysille ovat noin 55–75 €/t (30 % TS) (Pöry Finland 2019, 92).

Pyrolyysin energiatehokkuus muodostuu termisen kuivauksen, pyrolyysin ja kaasujen polton kokonaistehokkuudesta. On arvioitu, että linkokuivattua mädätettyä lietettä (30 % TS) käsiteltäessä pyrolyysissä tarvitaan ulkopuolista energiaa termisen kuivauksen tarpeisiin. Ulkopuolista energiaa voidaan lisätä prosessiin esimerkiksi lisäämällä lietteeseen puumateriaalia. (Pöry Finland 2019, 50.) Termisen kuivauksen lämmöntarve on noin 500–700 kWh<sub>th</sub>/t lietettä (30 % TS) ja itse pyrolyysi vaatii lämpöenergiaa noin 200–450 kWh<sub>th</sub>/t termisesti kuivattua lietettä (90 % TS) eli noin 70–150 kWh<sub>th</sub>/t (30 % TS). Näin kokonaisläm-

möntarve olisi noin 550–800 kWh<sub>th</sub>/t lietettä (30 % TS). Osa lämmöntarpeesta saadaan kaatettua lietteestä muodostuvan kaasun poltolla. Sähkönkulutuksen on arvioitu olevan noin 60–90 kWh<sub>el</sub>/t (30 % TS). (Pöyry Finland 2019, 50.)

Ainoastaan muutamasta lietteen pyrolyysilaitoksesta löytyy tietoa kirjallisuudesta. Esimerkiksi noin 1 000 t/a TS ( $\approx 3\,500$  t/a (30 % TS)) lietettä käsittelevässä laitoksessa liete kuivataan termisesti noin 65 % kuiva-ainepitoisuuteen ja käsitellään pyrolyysillä noin 600 °C lämpötilassa. Pyrolyysikaasut ja -höyryt poltetaan 1 100 °C lämpötilassa ja poltossa vapautuva energia käytetään termiseen kuivaukseen ja pyrolyysireaktorin lämmitykseen. Laitos on energiaomavarainen lämmön suhteen, mutta tarvitsee sähköä noin 7,5 kW<sub>el</sub>, joka tuodaan laitokseen ulkopuolelta. Laitos tuottaa noin 500 tonnia vuodessa biohiiltä (pyrolyysihiiltä). (Tsybina & Wuensch 2018, 9.)

Lämmön suhteen pyrolyysi ja terminen kuivaus voivat olla omavaraisia, mutta termiseen kuivaukseen saatetaan tarvita lämpöenergiaa myös laitoksen ulkopuolelta. Sähköä pyrolyysiyksiköillä ei tuoteta, joten ainakin sähköä prosessi tarvitsee laitoksen ulkopuolelta. Teoriassa pyrolyysikaasut ja -höyryt voitaisiin puhdistettuna käyttää sähkön ja lämmön yhteistuotannossa mm. kaasumootoreissa, mutta tämän vaikutusta energiataseeseen ja energiaomavaraisuuteen ei ole juurikaan tutkittu. (Tsybina & Wuensch 2018, 8–9.)

Lietteestä pyrolyysillä valmistettu pyrolyysihiili sisältää hiiltä ja fosforia, joiden takia hiilellä on hyödyllisiä maanparannus- ja lannoitevaikutuksia. Pyrolyysissä patogeenit tuhoutuvat ja saatava lieteperäinen hiili on hygieeniseltä laadultaan hyvää. Lietteestä suurin osa haihtuu termisessä kuivauksessa ja pyrolyysissä kaasuihin, mutta fosforista valtaosa sitoutuu lietehiileen. Pyrolyysin ei ole kuitenkaan todettu parantavan fosforin liukoisuutta kasveille lannoituskäytössä, mutta lietehiilellä voi olla biohiilen kaltaisia aineiden pidätysominaisuuksia. Nämä parantavat veden ja ravinteiden sitoutumista hiileen. Muita käyttökohteita hiilellä ovat mm. käyttö kompostoinnin lisäaineena, suodatinmateriaalina tai jätevesien käsitelyssä (Pöyry Finland 2019, 48.)

Haitta-aineiden ja muovien on todettu tuhoutuvan pyrolyysissä, mutta pyrolyysihiilen ongelmana lannoitekäytössä maanparannusaineena on raskasmetallien pitoisuudet. Haihtumattomat raskasmetallit konsentroituvat kiintoaineeseen pyrolyysissä, joskin joidenkin tutkimusten mukaan lietehiilen raskasmetallipitoisuudet ovat alittaneet lannoitetuotteille asetetut raja-arvot ainakin Suomessa tehdyissä tutkimuksissa. Pyrolyysissä myös PAH-yhdisteitä voi sitoutua lietehiileen. Suomessa tehdyissä tutkimuksissa todettu sekä suhteellisen korkeita (yli 20 mg/kuiva-ainetta) että matalia (1 mg/kuiva-ainetta) pitoisuuksia. Tällä hetkellä pyrolyysillä valmistetulla lietepohjaisella hiilellä ei ole vielä Euroopan Unionin tasolla hyväksyntää varsinaiseksi lannoitevalmisteksi. (Pöyry Finland 2019, 48.) Typeä olisi mahdollista saada talteen pyrolyysiä edeltävän termisen kuivauksen poistokaasun käsittelystä syntyvästä ammoniakkipitoisesta liuoksesta.

Pyrolyysin etuina ovat haitta-aineiden ja mikromuovien tuhoutuminen sekä hyödyllisen pyrolyysihiilen tuotanto. Haittapuolina ovat haitallisten metallien ja epäpuhtauksien konsentroituminen pyrolyysihiileen, termisen kuivauksen tarve ja pyrolyysihiilen epävarmat markkinat vielä tällä hetkellä (lainsäädäntöä tuotteen käytölle ei vielä ole). (Pöyry Finland 2019, 111.)

Pyrolyysin kaltainen tekniikka on myös torrefiointi, jossa lopputuotteet ovat pitkälti samat kuin pyrolyysissä. Torrefiointi on tekniikkana lähellä hidasta pyrolyysiä, mutta lämpötila on pyrolyysiä matalampi, noin 200–350 °C. Torrefioinnin lämpötilan riittävydestä lietteessä olevien haitta-aineiden tuhoutumiseen ole vielä juurikaan tietoa. Torrefiointia on tutkittu puhdistamolietteen käsittelyyn, mutta laitosmittakaavassa sitä ei ole toteutettu. (Pöyry Finland 2019, 39.)

#### **4.6 Märkähiilto (HTC)**

Märkähiilto (engl. Hydrothermal Carbonization, HTC) on prosessi, jossa kostea biopohjaista massaa käsitellään hapettomissa oloissa korkeassa paineessa noin 180–250 °C lämpötilassa. Märkähiiltoa on tutkittu lähinnä erilaisille biomassoille niiden poltto-, kuljetus- ja varastointiominaisuuksien parantamiseksi. Puhdistamolietteen käsittelyssä lähtökohta on ol-

lut lietteen mekaanisen kuivauksen parantaminen sekä lietteen käyttö polttoaineena. Märkähiillolla voidaan käsitellä niin mädätettyä kuin mädättämätöntä lietettä, mutta mädätetyn lietteen käyttö vaatii enemmän ulkoista energiaa prosessiin. (Pöyry Finland 2019, 34.)

Märkähiilto on kemiallisesti monimutkainen prosessi, jossa käsiteltävän massan orgaanista ainetta hydrolysoituu eli hajoaa pienemmiksi molekyyleiksi reaktiossa veden kanssa. Massasta poistuu myös vetyä ja happea, jolloin hiilidioksidia vapautuu. Prosessi tapahtuu reaktorissa, jonka tilavuus pysyy vakiona eikä reaktorista poisteta kaasua käsittelyn aikana. Reaktorissa kaasutila kyllästyy vesihöyryllä ja paine nousee noin 20–35 bar tasolle. Viipymäaika on tyypillisesti useita tunteja, noin 2–5 tuntia. Prosessi tuottaa lämpöä, mutta useimpien reaktoria on myös kuumennettava ulkoisella energialla, esimerkiksi termooiljyllä tai höyryllä. Märkähiilto ei vaadi syötteenä termisesti kuivattua lietettä, vaan liete syötetään prosessiin märkänä eli mekaanisesti kuivattuna tai pelkästään sakeutettuna noin 8–15 % kuiva-ainepitoisuudessa. Prosessin päätuote on kuivattu kiintoaine- eli hiilijae (lietehiili). Märkähiiltokäsittelyn jälkeen liete hiili jäähdytetään lämmönvaihtimilla ja märkähiillolla käsitelty liete voidaan kuivata tämän jälkeen mekaanisesti jopa noin 50–70 % kuiva-ainepitoisuuteen asti. Mekaanisesti kuivattu märkähiilletty liete voidaan pelletöidä varastoinnin ja käsittelyn parantamiseksi ilman kemikaalikäsittelyä. (Pöyry Finland 2019, 34–35.)

Kokonaisuudessaan lietteen kiintoaineesta noin 25 % poistuu prosessissa rejektiveteen ja kaasuihin. Rejektiveteen päätyy noin 5–20 % lietteen hiilestä ja noin puolet typestä. Rejektiveteessä on myös merkittävä määrä erilaisia orgaanisia ja epäorgaanisia yhdisteitä, jotka sisältävät mm. rikkiä ja vähän fosforia. Rejektiveteen johdetaan yleensä jäähdytyksen jälkeen takaisin puhdistamolle, mistä aiheutuu puhdistamolle lisäkuormitusta ja mahdollisia prosessiongelmia etenkin PAH-yhdisteiden takia. Kaasujae koostuu puolestaan valtaosin hiilidioksidista ja se sisältää noin 2–5 % lietteen hiilestä, mutta ei juurikaan typpeä eikä epäorgaanisia aineita. Kaasut ohjataan lauhdutus- ja vesipesurikäsitelyyn, jotka myös aiheuttavat jätevettä takaisin puhdistamolle. (Pöyry Finland 2019, 37–38.)

Orgaanisten haitta-aineiden, lääkejäämien ja mikromuovien tuhoutuminen märkähiiltoissa on vielä pitkälti hämärän peitossa vähäisen tutkimuksen vuoksi. Muutamien tutkimusten mukaan märkähiilto pienentää lietteen haitta-ainepitoisuuksia, mutta tiettyjen lääkeaineiden

poistossa tekniikka ei ole tehokas ja voi lisätä PAH-yhdisteiden määrää lopputuotteessa. Mikromuovien tuhoutumiselle märkähiillon lämpötila-alue on tutkimusten mukaan liian alhainen. (Pöyry Finland 2019, 37.) Märkähiilto on kehitetty etenkin polttoon ohjattavan lietteen esikäsittelymenetelmäksi termisen kuivauksen tilalle, joten varsinaisena lietteen loppukäsittelymenetelmänä märkähiiltoa ei välttämättä voida nähdä.

Maailmalla toteutetut märkähiiltoreaktorit ovat noin 7 000–25 000 t/a (30 % TS) kokoluokassa olevia reaktoreita. Arvioidaan, että taloudellisesti kannattava kokoluokka olisi vähintään 10 000 t/a lietettä (30 % TS) tai 30 000 t/a (10 % TS). Tekniikka perustuu määrän lietteen käsittelyyn, joten märkähiiltolaitoksen sijoittaminen puhdistamon yhteyteen on logistisesti edullista. (Pöyry Finland 2019, 35.) Kokonaiskustannukset lietteen märkähiillolle ovat noin 50–65 €/t (30 % TS) (Pöyry Finland 2019, 92).

Märkähiiltoprosessissa vapautuu lämpöä, mutta prosessi vaatii toimiakseen ulkoista energiaa. Mädätettyä lietettä käytettäessä ulkoisen energian tarve on suurempi. Märkähiiltolaitoksen tarvitseman ulkopuolisen lämmöntarpeen on arvioitu olevan noin 50–150 kWh<sub>th</sub>/t (30 % TS) ja sähköntarpeen noin 10–30 kWh<sub>el</sub>/t (30 % TS). (Pöyry Finland 2019, 92). Toisen tutkimuksen mukaan taas prosessin ulkopuolisen lämmön tarve on noin 50 kWh<sub>th</sub>/t (30 % TS) ja sähkönkulutus merkityksettömän pieni. Tekniikoita, jotka ovat lämpöenergian suhteen omavaraisia on myös raportoitu joiltakin valmistajilta. (Pöyry Finland 2019, 38.)

Valtaosa lietteen fosforista ja noin puolet typestä sitoutuu märkähiillossa syntyvään kuivaan hiilijakeeseen. Hiilijakeen käyttökelpoisuus sellaisenaan maanparannus- ja lannoituskäytössä on kuitenkin epävarmaa raskasmetallipitoisuuksien, haitta-aineiden ja mikromuovien epävarman tuhoutumisen ja PAH-yhdisteiden määrän takia. Märkähiillon yhteyteen on kuitenkin kehitetty erilaisia fosforin talteenottotekniikoita. Fosforia voitaisiin ottaa talteen esimerkiksi saostamalla valtaosa fosforista rejektiveteen, jolloin rejektivedestä fosfori saataisiin talteen kemikaalikäsittelyllä. Fosforia voitaisiin jalostaa myös märkähiillon lopputuotteena syntyvästä hiilijakeesta kemiallisesti, saostamalla ja suodattamalla. (Pöyry Finland 2019, 36–37.) Fosforin talteenottotekniikat märkähiillosta ovat kuitenkin vielä kehitys-

teella eikä niitä ole täydessä mittakaavassa toteutettu. (Pöyry Finland 2019, 34). Typpeä voitaisiin ehkä ottaa talteen typpipitoisesta rejektivedestä, johon puolet lietteen sisältämästä typestä sitoutuu.

Märkähiillon etuina ovat termisen kuivauksen tarpeettomuus, hukkalämmön hyödyntäminen prosessin lämmityksessä (matala prosessilämpötila) ja soveltuvuus pieneen kokoluokkaan. Haittapuolina ovat haitta-aineiden poiston epävarmuus, rejektivesien käsittely, hajuhaitat ja lopputuotteen (hiilijakeen) käyttökelpoisuuden niukkuus vielä tällä hetkellä (lainsäädäntöä tuotteen käytölle ei vielä ole). (Pöyry Finland 2019, 110.)

#### **4.7 Terminen hydrolyysi (THP)**

Terminen hydrolyysi (engl. Thermal Hydrolysis Process, THP) tarkoittaa biomassan tai lietteen käsittelyä noin 130–170 °C lämpötilassa ja noin 6–8 bar paineessa. THP-käsittelyä käytetään lietteelle ennen mädätystä lietteen hajoamisasteen parantamiseksi ja hygienisoinnin varmistamiseksi. (Pöyry Finland 2019, 98.) Termisessä hydrolyysissä viipymäaika on noin 20–30 min ja käsittelyn tuloksena liete steriloituu, kaikki taudinaiheuttajat kuolevat ja lietteen orgaaninen aines hydrolysoituu (ProAgria 2013, 33). Terminen hydrolyysi on ensisijaisesti puhdistamolietteelle vain esikäsittelytekniikka ennen mädätystä eikä varsinainen loppukäsittelytekniikka. Tekniikkaa on toteutettu täyden mittakaavan laitoksissa ja referenssilaitoksia on maailmalla yli 40. (Pöyry Finland 2019, 98.)

#### **4.8 Hydroterminen nesteytys (HTL)**

Hydroterminen nesteytys (engl. Hydrothermal Liquefaction, HTL) tapahtuu noin 1 000–2 500 bar paineessa ja noin 280–370 °C lämpötilassa. Puhdistamolietteen hydrotermisen nesteytyksen lopputuotteena syntyy bioöljyä. Bioöljyä voitaisiin polttaa sellaisenaan tai sitä voitaisiin jalostaa polttoaineeksi. Prosessissa syntyy lisäksi vesijae, kaasuja ja kiintoainejae. Kiintoainejakeesta on raportoitu olevan mahdollista ottaa ravinteita talteen. Hydroterminen nesteytys on vielä kehitysvaiheessa oleva tekniikka eikä sitä ole toteutettu kaupallisessa mittakaavassa. (Pöyry Finland 2019, 98.)



## 4.9 Ylikriittinen vesikaasutus (SCGW)

Ylikriittinen vesikaasutus (engl. Supercritical Water Gasification, SCGW) tapahtuu yli 450 °C lämpötilassa ja veden ylikriittisellä alueella yli 220 bar paineessa, tyypillisesti noin 300 bar paineessa. Puhdistamolietteen SCGW-käsittelyn lopputuotteena syntyy polttoaineeksi kelpaavaa kaasua, joka sisältää metaania, vetyä ja hiilidioksidia. Käsittelyssä voidaan käsitellä märkää lietettä ja tuottaa metaanipitoista biokaasua ilman biologista mädätysprosessia. Kaasu voitaisiin jalostaa biometaaniksi varsin pienellä energiankulutuksella PSA-tekniikalla (engl. Pressure Swing Adsorption, suom. paineenvaihteluadsorptio). (Pöyry Finland 2019, 98.)

Kaasun lisäksi prosessissa syntyy kiinteitä ja öljymäisiä jakeita. Ravinteet sitoutuvat prosessissa kiintoaineeseen, mutta ainakaan fosforin talteenottoa suoraan kiintoaineesta ei ole vielä ratkaistu. Kiintoaine voitaisiin myös polttaa ja käyttää tuhkalle soveltuvia talteenottoratkaisuja. SCGW-tekniikkaa ei ole vielä käytössä kaupallisessa mittakaavassa puhdistamolietteen käsittelyssä, mutta ensimmäinen koelaitos on rakennettu Sveitsiin. (Pöyry Finland 2019, 98.)

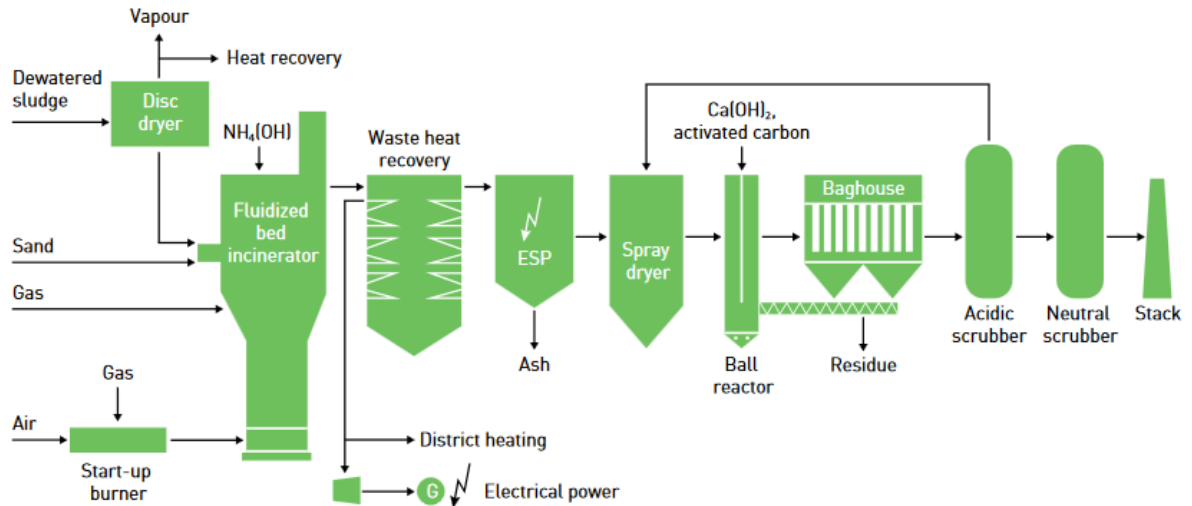
## 5 ESIMERKKEJÄ KEHITETYISTÄ TEKNOLOGIOISTA MAAILMALLA

Puhdistamolietteen erillispoltteknikat ovat selvästi muita termisiä teknologiota kehitetyimpiä ja erillispoltolle löytyykin useampia eri valmistajia etenkin Saksasta. Tässä luvussa on listattuna ja lyhyesti esiteltynä muutamia kehitettyjä termisiä lietteenkäsittelytekniikoita maailmalla, erillispolton lisäksi mukana on esimerkkejä myös kaasutuksesta, pyrolyysistä ja märkähiillosta (HTC). Tässä luvussa esitetään vain teknologioita, jotka ovat kehitetty ensisijaisesti puhdistamolietteen termiseen käsittelyyn. Maailmalla on myös joitakin referenssejä, joissa käytettyä teknologiaa ei välttämättä ole kehitetty ensisijaisesti puhdistamolietteen käsittelyyn. Tällaisia tapauksia ei sisällytetä tähän lukuun.

### 5.1 Outotec Sewage Sludge Incineration Plant

Outotec Oyj (nyk. Metso Outotec Oyj) on kehittänyt sekä yhdyskuntajäteveden puhdistuksesta että teollisten jätevesien puhdistuksessa syntyvän lietteen erillispolttoon soveltuvan laitosratkaisun. Toukokuussa 2020 Outotecin lietteenpoltteknikat ja referenssilaitokset myytiin saksalaiselle Küttner Martin Technology GmbH:lle, joka on Küttner Holding GmbH ja Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik -nimisten yhtiöiden vuonna 2018 perustama yhteisyritys (Küttner 2020). Yritys kehittää puhdistamolietteen erillispolttoa.

Outotecin lietteenpolttolaitoksesta löytyy kolme eri standardikokoluokkaa: Plant 100, Plant 50 ja Plant 30. Kokoluokkien nimet perustuvat laitoksilla käsiteltäviin lietemääriin, 100 000 t/a (22–30 % TS), 50 000 t/a (22–30 % TS) ja 30 000 t/a (22–30 % TS). Kaikissa kokoluokissa käytetään leijupetipolttoa lietteen polttotekniikkana (kerrosleijupetikattila) ja syötteenä mekaanisesti kuivattua lietettä. (Outotec 2015a, 2–3.) Suurimmassa kokoluokassa (Plant 100) käytetään lietteen termisenä kuivauksena kiekko-kuivainta ennen polttoa. Kiekko-kuivaimessa liete kuivataan noin 35–45 % kuiva-ainepitoisuuteen ennen syöttöä leijupetikattilaan. Lietteen poltossa syntyvillä savukaasuilla tuotetaan erillisessä lämmöntalteenotto-kattilassa höyryä. Höyry ohjataan höyryturbiiniin, jolla tuotetaan sähköä laitoksen omaan tarpeeseen. Höyryä käytetään myös lietteen termiseen kuivaukseen ja kaukolämmön tuotantoon. Lämpöä saadaan talteen myös termisessä kuivauksessa syntyvästä haihtuneesta vedestä. (Outotec 2016, 2.) Kuvassa 16 on esitettynä Plant 100 -kokoluokan prosessi.



**Kuva 16.** Outotec Sewage Sludge Incineration Plant 100 (Outotec 2015a, 2).

Pienemmän kokoluokan laitoksissa (Plant 50 ja 30) höyryä ei tuoteta lämmöntalteenottokattilassa, vaan lämpö otetaan talteen termooöljyä lämmittämällä. Termooöljyä käytetään lietteen termisessä kuivauksessa ja kaukolämmön tuotannossa. Pienemmän kokoluokan laitoksiin on kehitetty myös lietteen aurinkokuivausta termisenä kuivauksena. Kaikkien laitosten on markkinoitu toimivan vain lietteellä, ylimääräistä polttoainetta (maakaasua) tarvitaan vain käynnistysten yhteydessä. (Outotec 2015a, 2–3.)

Lämmöntalteenottokattilan jälkeen savukaasut ohjataan savukaasujen puhdistukseen, jossa mm. lentotuhka erotetaan savukaasuista. Fosforin talteenottoa tuhkaista mainostetaan Outotecin omalla ASH DEC -menetelmällä. (Outotec 2015a, 2.) ASH DEC -menetelmä on termokemiallinen prosessi, jossa tuhkan raskasmetallit höyrystetään ja ne korvataan alkalimetalleilla. Tuhka pelletoidaan ja pellettejä käsitellään noin 30 min ajan 1 000 °C lämpötilassa, jolloin valtaosa haitallisista metalleista höyrystyy. Käsittelyssä käytetään erilaisia kemikaaleja, jotta haitallisten aineiden erotus on mahdollisimman tehokasta. Menetelmän lopputuloksena syntyy lannoitekäyttöön kelpaavaa fosforipitoista tuhkaa. Tekniikkaa ei ole vielä käytetty täyden kokoluokan laitoksissa. (Pöyry Finland 2019, 68.)

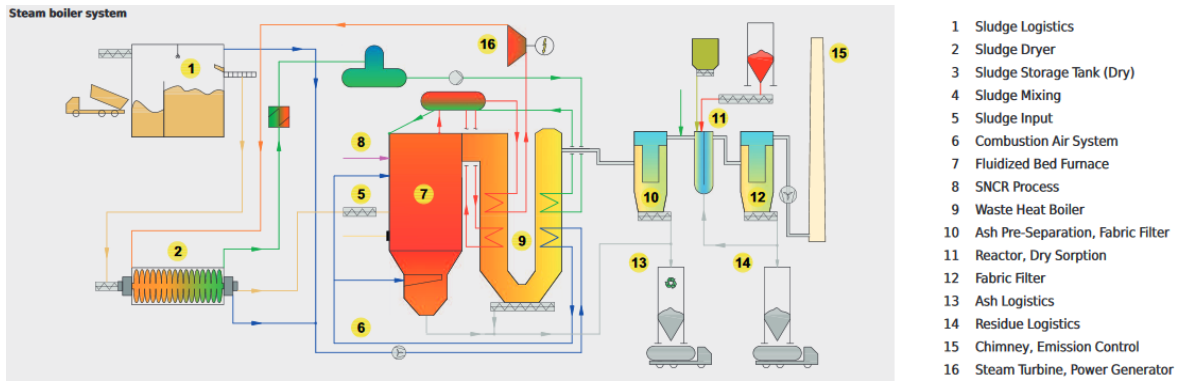
Referenssejä Outotecin lietteenpolttolaitoksella on kolme. Suurimman kokoluokan (Plant 100) laitos on toimitettu vuonna 2015 Zürichin Sveitsiin. Laitos tuottaa sähköä noin 900 kW<sub>e</sub> laitoksen omaan käyttöön ja kaukolämpöä noin 5 MW<sub>th</sub>. Laitokseen on pohdittu fosforin talteenottoa ASH DEC -menetelmällä, mutta siitä ei ole vielä päätöstä tehty. (Outotec

2016, 1–4.) Vuonna 2011 Outotec on toimittanut Plant 30-kokoluokan laitoksen Itävaltaan Grosswilfersdorfiin. Laitoksella liete kuivataan termisesti kiekkokuivaimella 75–80 % kuiva-ainepitoisuuteen ennen polttoa. Savukaasuista saadaan lämpöä talteen termoöljyn muodossa, joka käytetään lietteen termiseen kuivaukseen ja palamisilman esilämmitykseen. Termisen kuivauksen ja palamisilman esilämmityksen jälkeinen ylimääräinen 1,2 MW<sub>th</sub> lämpöteho myydään laitokselta viereiselle tuotantolaitokselle. (Outotec 2015b, 1–2). Outotec on toimittanut myös vuonna 2005 pienemmän 14 000 t/a (25 % TS) kokoluokan laitoksen Itävaltaan (Outotec 2015, 4).

## 5.2 Huber SE & WTE sludge2energy

Saksalaiset vesihuoltoon ja jätevedenpuhdistukseen erikoistuneet yhtiöt Huber SE ja WTE Group ovat perustaneet yhteisyritykseen nimeltään sludge2energy GmbH. Sludge2energy on myös kauppanimi tekniikalle, jossa liete poltetaan erillispolttona stationaarisessa leijupe-tikattilassa. Tekniikkaa mainostetaan yhdyskuntajäteveden puhdistuksessa syntyvän puhdistamolietteen termiseen käsittelyyn ilman tarvetta ulkopuoliselle energialle, lukuun ottamatta käynnistysvaihetta. Liette kuivataan termisesti ennen sen syöttöä polttoon.

Tekniikasta ei löydy valmistajalta tiettyjä standardikokoluokkia, mutta ainakin kaksi eri-laista menetelmää on kehitetty. Toinen on suuremman kokoluokan sovelluksiin tarkoitettu höyrykattilajärjestelmässä, jossa vettä höyrystetään jätelämpökattilassa (lämmöntalteenotto-kattilassa) lietteen poltossa syntyvillä savukaasuilla. Höyryä käytetään tuottamaan sähköä höyryturbiinin avulla sekä termisen kuivauksen ja kaukolämmön tarpeisiin. Höyrykattilajär-jestelmässä liete kuivataan termisesti ennen polttoa kiekkokuivaimella. Toinen menetelmä on kuumavesikattilajärjestelmä, joka on tarkoitettu pienempään kokoluokkaan. Siinä lämpö otetaan talteen kuuman veden muodossa lämmöntalteenottokattilasta. Kuumaa vettä käyte-tään termiseen kuivaukseen ja sitä voidaan käyttää myös kaukolämmön tuotantoon. Kuuma-vesikattilajärjestelmässä liete kuivataan termisesti ennen polttoa nauhakuivaimella. Jäteläm-pökattilan jälkeen savukaasut ohjataan savukaasujen puhdistukseen, jossa mm. lentotuhka erotetaan savukaasuista. Tekniikassa syntyvän tuhkan mainostetaan olevan fosforirikasta tuhkaa, jossa on mahdollisuus fosforin talteenottoon (Sludge2energy 2018, 4–6.) Kuvassa 17 on esitettyinä höyrykattilajärjestelmän prosessi.



**Kuva 17.** Sludge2Energy höyrykattilajärjestelmä (Sludge2energy 2018, 5).

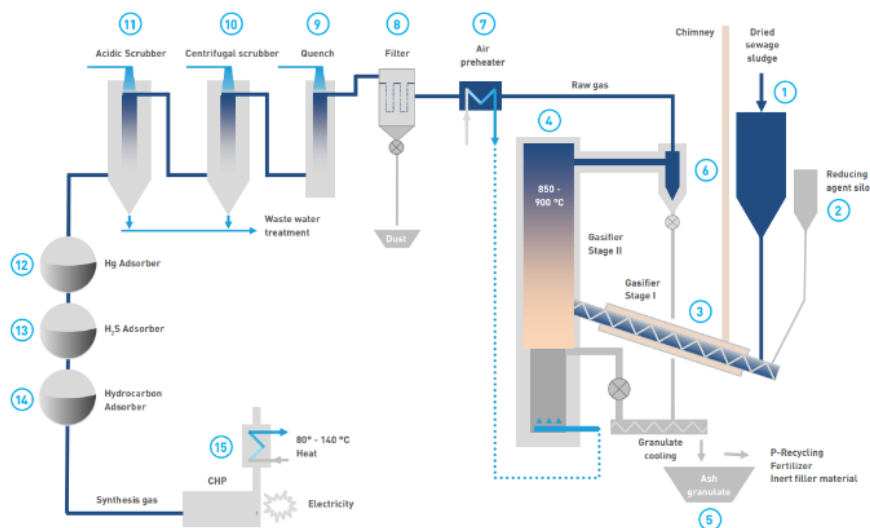
Referenssejä sludge2energy-tekniikalla on muutamia, mutta niistä moni on vielä rakennusvaiheessa. Vuodelle 2021 päivitettyjä tietoja valmiista referensseistä ei vaikuta olevan saatavilla. Ainakin viisi referenssilaitosta on tarkoitus ottaa käyttöön vuosien 2019–2024 väli- senä aikana. Näistä kaksi on suuren kokoluokan laitoksia, jotka on mitoitettu yli 100 000 t/a (20–30 % TS) lietemäärälle. Kaksi on noin 20 000–30 000 t/a (20–30 % TS) kokoluokan laitoksia ja yksi on pienen kokoluokan 10 000 t/a (20–30 % TS) laitos. Näistä pienen koko- luokan laitoksen on ilmoitettu olevan kuumavesikattilajärjestelmän laitos ja muut höyrykat- tilajärjestelmän laitoksia. Pienen kokoluokan laitos sijaitsee Liettuassa ja suuremmista kolme Saksassa ja yksi Itävallassa. (Sludge2energy 2021.)

### 5.3 Sülzle KOPF SynGas sewage plant

Saksalainen Sülzle Group tarjoaa puhdistamolietteen kaasutusteknologiaa. Sülzle KOPF SynGas on leijupetiteknikalla toteutettu kaasutustekniikka lietteille. Prosessi perustuu joko yksi- tai kaksivaiheiseen kaasutukseen. Kaksivaiheisen kaasutuksen ensi vaiheessa liete kä- sitellään pyrolyysiyksikössä, josta tuote ohjataan leijupetikaasutukseen. Tuotekaasu jäähdy- tetään ja käsitellään suodattimilla, pesureilla ja aktiivihiihisuodattimilla ennen polttoa. Yritys tarjoaa laitoksia noin 500–5 000 t/a TS eli noin 2 000–17 000 t/a (30 % TS) kokoluokkaan. (Pöyry Finland 2019, 60.)

Tekniikkaa on tarjolla kolmella erilaisella moduulilla, jotka ovat SynGas CHP Module, Syn- Gas Heat Module ja SynGas Auxiliary Firing Module. SynGas CHP Module tähtää sähkön ja lämmön yhteistuotantoon (CHP, engl. Combined Heat and Power) polttamalla tuotekaasu

kaasumootorissa. Sähköä saadaan kaasutukseen omiin tarpeisiin ja ylimääräistä sähköä voidaan syöttää jätevedenpuhdistamolle, lämpö puolestaan käytetään lietteen termiseen kuivaukseen. Koko järjestelmän mainostetaan olevan lämmön suhteen energiaomavarainen myös yhdistettynä lietteen mädätyksen kanssa, jos myös termisen kuivauksen hukkalämpö otetaan talteen. (KOPF SynGas 2021a.) Muista tarjolla olevista moduuleista SynGas Heat Module tähtää pelkästään lämmön tuotantoon polttamalla tuotekaasu polttokammiossa (KOPF SynGas 2021b). SynGas Auxiliary Firing Module on suunniteltu lietteen kaasutukseen ja tuotekaasun polttoon muiden polttoaineiden seassa yhteispolttona esimerkiksi sementintuotannossa (KOPF SynGas 2020a). Kaikkien moduulien lopputuotteena syntyvästä granulaattimuotoisesta tuhkasta olisi mahdollista ottaa fosforia talteen. Kuvassa 18 on esitettyä SynGas CHP -moduulin prosessi.



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

**Kuva 18.** SynGas CHP Module (Pöyry Finland 2019, 60).

Tällä hetkellä referenssilaitoksia Sülzle KOPF SynGas -tekniikalla on kolme kappaletta, jotka kaikki sijaitsevat Saksassa. Balingenin laitos oli valmistuessaan vuonna 2001 ensimmäinen lietteen kaasutuslaitos. Laitoksen kapasiteetti on noin 7 000 t/a (30 % TS) lietettä, joka kuivataan termisesti nauhakuivaimella ennen kaasutusta. Tuotekaasun polttoaineteho

on 720 kW ja se poltetaan CHP-laitoksessa. Sähköä saadaan tuotettua 75 kW<sub>el</sub>, josta 15 kW<sub>el</sub> kuluu laitoksen omiin tarpeisiin. (KOPF SynGas 2020b).

Mannheimin laitos valmistui vuonna 2011 ja sen kapasiteetti on noin 17 000 t/a (30 % TS). Mannheimin laitoksella polttoaineteholtaan 1,5 MW tuotekaasu poltetaan polttokammiossa ja savukaasujen lämpö käytetään rumpukuivaimessa lietteen termiseen kuivaukseen. (KOPF SynGas 2020c). Uusimman käyttöönottoaiheessa olevan Koblenzin laitoksen kapasiteetti on noin 13 000 t/a (30 % TS). Laitoksella liete kuivataan termisesti nauhakuivaimella ennen kaasutusta. Laitoksella syntyvän tuotekaasun polttoainetehto on 1,8 MW ja se käytetään CHP-tuotannossa. CHP-tuotannon sähköteho on 425 kW<sub>el</sub> ja lämpöteho on 535 kW<sub>th</sub>. (KOPF SynGas 2020d).

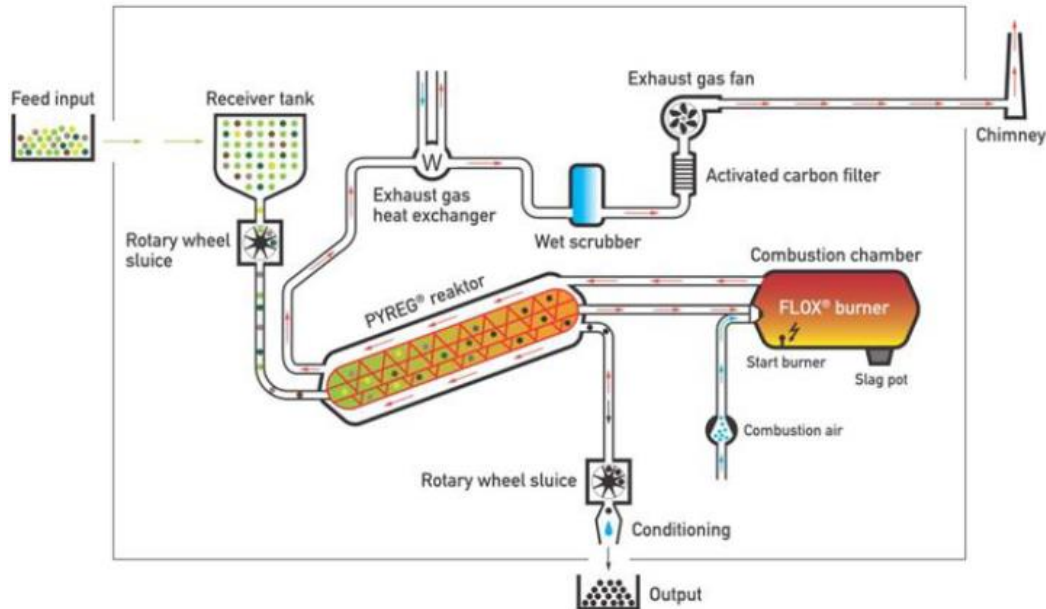
#### **5.4 PYREG®**

Saksalainen PYREG GmbH on kehittänyt pyrolyysimenetelmän, jonka kauppanimi on PYREG®. Tekniikkaa mainostetaan soveltuvaksi niin biomassan käsittelyyn biohiilen tuotantoon kuin puhdistamolietteidensä käsittelyyn fosforipitoisen lannoitekäyttöön sopivan hiilen tuotantoon. Tekniikasta on olemassa kaksi eri kokoluokkaa, jotka ovat nimillä PYREG® P-500 ja PYREG P-1500.

P-500 yksikön polttoainetehto on 500 kW ja sillä voidaan käsitellä maksimissaan 1 100 t/a TS (≈4000 t/a (30 % TS)) puhdistamolietettä. Lietteen lämpöarvon tulisi olla vähintään noin 10 MJ/kg, mikä vastaa likimain mädätetyn lietteen lämpöarvoa. Yksiköllä voidaan tuottaa noin 610 t/a pyrolyysihiiltä, jota voitaisiin käyttää lannoitekäytössä maanparannusaineena. Yksikkö tuottaa pyrolyysin ulkopuolella hyödynnettävää lämpöä 150 kW<sub>th</sub>, jota voidaan käyttää esimerkiksi lietteen termiseen kuivaukseen. Sähkönkulutukseksi on mainittu noin 18 kW<sub>el</sub>. (Pyreg 2020a.) Pyrolyysiyksikkö on ruuvikuljettimella varustettu yksikkö (Pöyry Finland 2019, 51).

Suuremman P-1500 yksikön polttoainetehto on 1 500 kW ja sen maksimikapasiteetti on 3 250 t/a TS (≈11 000 t/a (30 % TS)). Yksiköllä voidaan tuottaa noin 1 780 t/a maanparannuskäyttöön mainostettua pyrolyysihiiltä. Yksikkö tuottaa pyrolyysin ulkopuolella hyödynnettävää lämpöä 750 kW<sub>th</sub>, jota voidaan käyttää esimerkiksi lietteen termiseen kuivaukseen.

Sähkönkulutukseksi on mainittu 56 kW<sub>el</sub>. (Pyreg 2020b.) Kuvassa 19 on esitettyä PYREG®-tekniikan prosessi.



**Kuva 19.** PYREG® (Pöyry Finland 2019, 45).

Tällä hetkellä PYREG®-tekniikalla on referenssejä lietteiden käsittelyyn viisi kappaletta. Näistä kolme on Saksassa, yksi Tšekissä ja yksi Yhdysvalloissa. Näiden lisäksi yrityksellä on referenssejä biomassojen pyrolyysikäsittelyyn yli 20. (Pyreg 2020c.) Tarkempia tietoja referenssien nykytilasta ei valmistajan sivuilta löydy. Ensimmäinen yksikkö on toimitettu vuonna 2015 Linz-Unkelin jätevedenpuhdistamon yhteyteen Saksassa. Yksikkö käsittelee noin 2 500 t/a (30 % TS) mädätettyä ja mekaanisesti lingoilla kuivattua lietettä. Liette kuivataan termisesti ennen pyrolyysiyksikköä nauhakuivaimella noin 85 % kuiva-ainepitoisuuteen. Laitos tuottaa maanparannustuotteeksi tarkoitettua hiiltä, mutta tuotteelle ei ole vielä saatu hyväksyntää Saksan viranomaisilta. Tutkimuksissa yksikössä tuotetun hiilen raskasmetallipitoisuudet ovat alittaneet EU:n lannoitelainsäädännön rajat, mutta PAH-yhdisteiden pitoisuuksia on analysoitu korkeaksi verrattuna suosituksiin lannoitteiden raja-arvoiksi. (Pöyry Finland 2019, 51.)

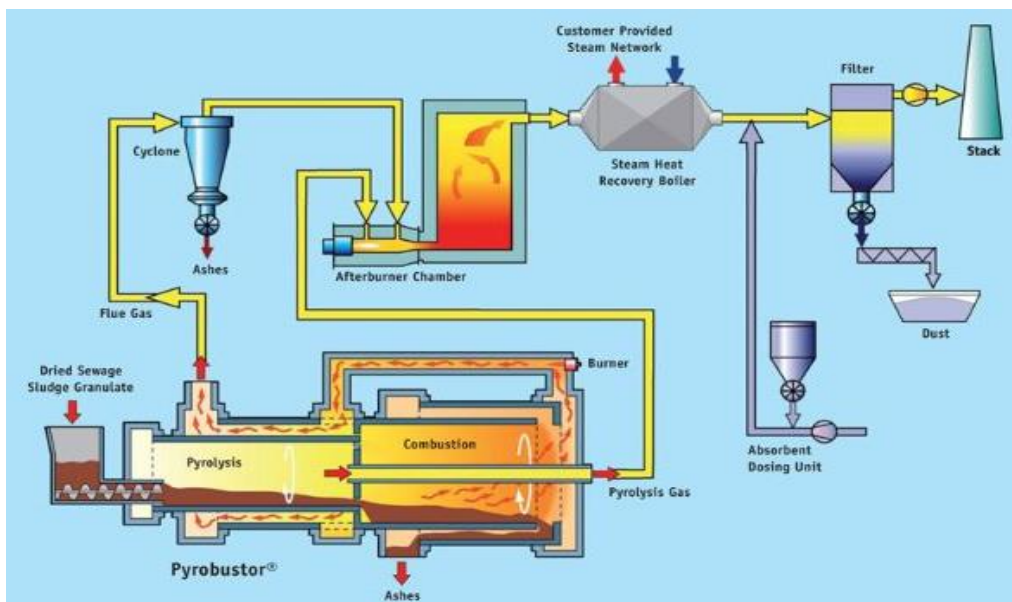
## 5.5 Eisenmann Pyrobustor®

Saksalainen Eisenmann GmbH on kehittänyt kauppanimeltään Pyrobustor®-nimisen tekniikan puhdistamolietteiden termiseen käsittelyyn. Pyrobustor®-tekniikka on pyrolyysin ja



polton yhdistelmä. Tekniikalla ei ole tarkoitus tuottaa tavallisen pyrolyysin tapaan kiinteää pyrolyysihiiltä, vaan pyrolyysihiili poltetaan myös prosessissa. Lopputuote on hiilen poltossa syntyvä tuhka.

Varsinainen pyrolyysi- ja polttoreaktori on pyöruunityyppinen. Pyrolyysi tapahtuu uunin alkuosassa hapettomissa olosuhteissa lämpötilan ollessa noin 200–350 °C. Lämpötila on tavalliseen pyrolyysiin nähden alhainen, joten siitä voitaisiin puhua myös torrefiointina. Pyrolyysivaiheen jälkeen liete siirtyy hapetus eli polttovaiheeseen, jossa lämpötila on noin 400–550 °C. Polttovaiheessa kiinteä hiiliaines palaa ja polton savukaasut ohjataan pyrolyysivaiheen lämmitykseen reaktorin vaipan sisään. Tämän jälkeen hiilipolton savukaasut ohjataan erilliseen polttokammioon, jossa pyrolyysivaiheessa syntyneet pyrolyysikaasut ja -höyryt poltetaan noin 850–900 °C lämpötilassa. (Pöyry Finland 2019, 53.) Polttokammion jälkeen savukaasut ohjataan lämmönvaihtimeen, jossa voidaan tuottaa joko höyryä tai kuumaa vettä tai lämmittää termoöljyä (Eisenmann 2017, 3). Prosessissa syntyvästä tuhkasta olisi teoriassa mahdollista ottaa ravinteista fosforia talteen polttotuhkan käsittelyllä. Kuvassa 20 on esitettyä Pyrobustor®-tekniikan prosessiä.



**Kuva 20.** Eisenmann Pyrobustor® (Eisenmann 2017, 4).

Tekniikan kerrotaan olevan soveltuva kokoluokkaan 400–1000 kg/h täysin kuivattua lietettä ( $\approx 10\,000\text{--}30\,000\text{ t/a}$  (30 % TS)) (Eisenmann 2021). Referenssejä tekniikalle on ainakin kaksi

kappaletta. Puskertalin jätevedenpuhdistamolla Italiassa puhdistamoliete käsitellään termisesti Pyrobustor®-tekniikalla. Puhdistamolla syntyy noin 17 000 t/a (20–22 % TS) puhdistamolietettä. Pyrobustor®-tekniikkaa edeltää lietteen terminen kuivaus nauhakuivaimella. Kuivain tuottaa suhteellisen pölytöntä ja rakeista lietetuotetta, jonka kuiva-ainepitoisuus on noin 90 %. Polttokammion jälkeen savukaasujen sisältämä lämpö otetaan talteen termooöljyä lämmittämällä. (Eisenmann 2017, 6.) Vuonna 2005 rakennetun laitoksen polttokammion tuottama lämpöteho on noin 2 MW<sub>th</sub>. Laitoksella poltetaan myös maakaasua lisäpolttoaineena pyrolyysikaasujen polton yhteydessä, maakaasun poltosta vapautuva lämpöteho on noin 220 kW<sub>th</sub>. Laitoksella polttokammioista vapautuvien savukaasujen lämmöllä saadaan katettua termisen kuivauksen vaatima lämpö (Tittesz & Neumann 2011, 813–815).

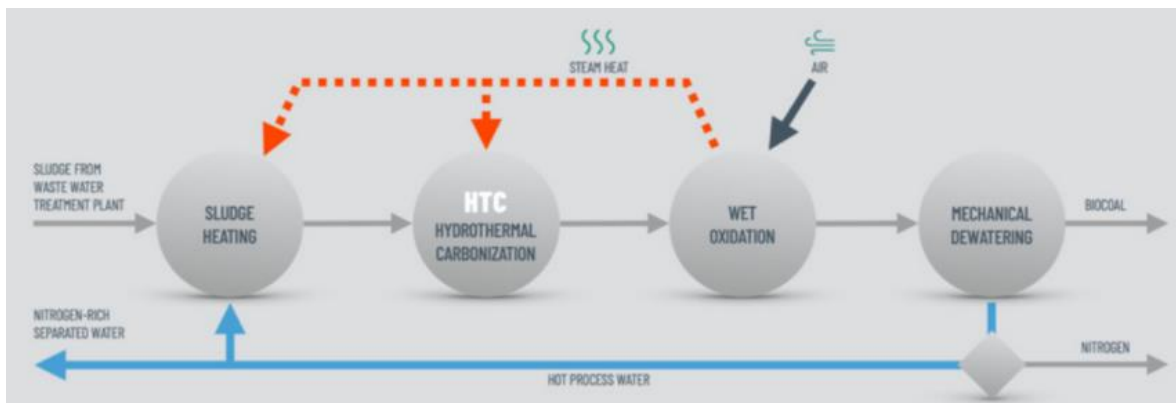
Toinen referenssi tekniikalle on Saksassa Crailsheimin kaupungissa. Vuonna 2008 valmistuneella laitoksella käsitellään noin 18 000–22 000 t/a (25 % TS) mekaanisesti kuivattua lietettä. Pyrobustor®-tekniikkaa edeltää lietteen terminen kuivaus, jolla lietteen kuiva-ainepitoisuus nostetaan 88 %:tiin. Tekniikka on yhdistetty biomassaa polttavaan voimalaitokseen, jonka tuottamalla lämmöllä saadaan katettua lietteen termisen kuivauksen lämmön tarve. Pyrobustor®-tekniikassa syntyvillä savukaasuilla tuotetaan höyryä, joka syötetään voimalaitoksen höyryverkkoon sähkön ja lämmön tuotantoon. (Eisenmann 2017, 4–5.)

## 5.6 C-Green OxyPower HTC™

Ruotsalainen C-Green Technology AB on kehittänyt puhdistamolietteiden märkähiiltoon perustuvan tekniikan kauppanimeltään OxyPower HTC™. Tekniikkaa mainostetaan soveltuvaksi niin mädätetylle kuin mädättämättömälle lietteelle sekä myös lannalle, elintarvikejätteelle ja maatalouden sivutuotteille. Prosessin lopputuotteena syntyy HTC-biohiiltä, jonka kerrotaan olevan kuivaa, steriiliä, hajutonta sekä helposti varastoitavaa ja pelletoitävää. Käyttökohteiksi biohiilelle on mainittu etenkin poltto ja siten energian tuotanto. Biohiili soveltuisi valmistajan mukaan käytettäväksi sellaisenaan myös lannoite- ja maanparannusaineena, mikäli tiettyjen haitta-aineiden raja-arvoja ei ylitetä. (C-Green 2020a.)

Prosessissa liete käsitellään HTC-reaktorissa noin tunnin ajan 200 °C lämpötilassa. Prosessissa muodostuu nestejäte (rejektivesi), jossa on orgaanista ja epäorgaanista ainesta sekä kiin-

tojae, joka on HTC-hiiltä. Nestejakeen orgaaninen osuus märkähapetetaan noin 240 °C lämpötilassa hiilidioksidiksi, hapeksi ja biohajoaviksi orgaanisiksi hapoiksi. Kemialliset reaktiot vapauttavat lämpöä ja prosessissa muodostuu höyryä paineen laskiessa. Höyryä kierrätetään takaisin reaktoriin, jolloin vältetään ulkopuolisen lämpöenergian tarve prosessissa. (C-Green 2020a.) C-Greenin tekniikka perustuukin juuri märkähapetukseen ja lämmön talteenottoon flash-höyrystimellä, jolloin ulkopuolista lämpöenergiaa ei tarvita. Sähkökulutuksen arvioidaan kuitenkin tällöin olevan korkeampi muihin HTC-tekniikoihin verrattuna. C-Green arvioi laitoksen sähkökulutukseksi noin 250 kWh/t TS eli noin 75 kWh/t lietettä (30 % TS), mikäli syötettävän lietteen kuiva-ainepitoisuus on 30 % ja käytetään nestemäistä happea. Mikäli happi tuotetaan laitoksessa PSA-tekniikalla, on sähkökulutus noin 450 kWh/t TS eli 135 kWh/t lietettä (30 % TS). (Pöyry Finland 2019, 38.) Kuvassa 21 on esitettyä OxyPower HTC™ -tekniikan prosessi.



**Kuva 21.** C-Green OxyPower HTC (C-Green 2020a).

Laitoksen kapasiteetin kerrotaan valmistajan mukaan olevan maksimissaan noin 30 000 t/a märkää lietettä. Mikäli tarvitaan suurempaa kapasiteettia, on tekniikan modulaarisuuden takia toisen yksikön lisäys vanhan yksikön viereen helppoa. (C-Green 2020b.) Tekniikan on mainittu tuhoavan lietteen patogeeneja tehokkaasti, koska liete steriloituu termisesti prosessin aikana. Myös ravinteiden talteenoton mahdollisuutta mainostetaan hyvin vahvasti. Fosforia olisi mahdollista ottaa talteen HTC-käsittelyn jälkeen, kun käsittelyssä syntynyt biohiili poltetaan. Fosforin talteenoton olisi mahdollista biohiilen poltossa syntyvästä tuhkasta. Typestä olisi mahdollista saada talteen jopa yli puolet lietteen sisältämästä typestä. Typen talteenoton

kerrotaan olevan mahdollista nestejakeesta (rejektivedestä), johon noin 60 % lietteen sisältämästä typestä päätyy käsittelyn aikana. Noin 90 % nestejakeen typestä olisi otettavissa talteen ammoniakkin strippauksella (engl. ammonium stripping). (C-Green 2020c.)

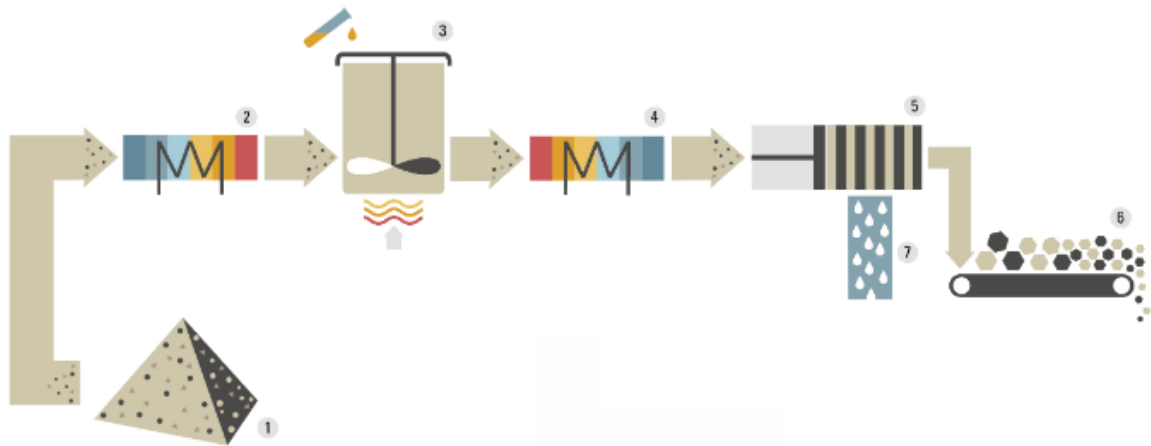
Referenssilaitoksia OxyPower HTC<sup>TM</sup> -tekniikalle löytyy tällä hetkellä yksi kappale. Suomessa Stora Enson Heinolan flutingtehtaalle on valmistunut vuonna 2020 lietteen märkähiililaitos. Laitoksen kapasiteetti on noin 25 000 t/a lietettä (30 % TS). Prosessissa on tarkoitus käsitellä massanvalmistuksessa syntyviä biolietteitä biohiileksi. Biohiiltä käytetään polttoaineena tehtaan voimalaitoksella korvaamaan turvetta. (Pöyry Finland 2019, 39.) Stora Enso selvittää laitoksessa miten paljon hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää käsittelemällä biolietettä polttoaineeksi HTC-prosessilla. Prosessissa syntyvän kuivan lietehiilen polttamiseen ei tarvita fossiilisia tai muita uusiutumattomia tukipolttoaineita. (Stora Enso 2019.)

## 5.7 TerraNova® Ultra

Saksalainen TerraNova Energy GmbH on kehittänyt TerraNova® Ultra -nimisen märkähiilitekniikan. Tekniikan kerrotaan soveltuvaksi puhdistamolietteiden käsittelyyn. Tekniikkaa mainostetaan etenkin kilpailevana vaihtoehtona lietteen termiselle kuivaukselle, tekniikan kerrotaan kuluttavan 70–80 % vähemmän energiaa kuin terminen kuivaus. Myös lietteen kuivaus HTC-käsittelyn jälkeen voidaan toteuttaa mekaanisesti noin 70 %:tiin TS asti. (Buttmann 2019, 5.)

Prosessissa mekaanisesti noin 5–30 % kuiva-ainepitoisuuteen kuivattu puhdistamoliete (1) hiillostetaan noin 200 °C lämpötilassa ja 20–35 bar paineessa. Liete pumpataan ensin lämmönvaihtimen läpi, jossa liete esilämmitetään (2). Sen jälkeen liete hiillostetaan reaktorissa katalyytin läsnä ollessa noin 3 tunnin käsittelyjakson aikana (3). Reaktoria lämmitetään ulkopuolisella energianlähteellä, joka voi olla esimerkiksi CHP-voimalaitoksen jätelämpöä. Reaktorin jälkeen hiillostunut liete jäädytetään lämmönvaihtimella (4), jossa siirtynyt lämpö hyödynnetään lietteen esilämmityksessä erillisen termoöljypiirin välityksellä. Lopuksi lietehiili kuivataan mekaanisesti suotonauhapuristimella noin 65–75 % kuiva-ainepitoisuuteen asti (5). Lietehiilen tilavuus on vain noin kolmannes verrattuna lietteen tilavuuteen ennen prosessia. Lietehiili voidaan tämän jälkeen ohjata loppukäsittelyyn (6). Mekaanisessa vedenerotuksessa hiilestä erotettu nestemäinen ravinnerikas suodos sisältää paljon

ravinteista typpeä ja fosforia (7). Suodos voitaisiin käyttää sellaisenaan nestemäisenä lannoitteena tai siitä voidaan ottaa ravinteet erikseen talteen. Suodosta voitaisiin käyttää myös biokaasun tuotannossa (lietteen mädätyksessä) sen sisältämän hiilen takia. Näin saataisiin biokaasun tuotantoa lisättyä noin 15 %. Hiili voitaisiin käyttää energiantuotannossa korvaamaan fossiilisia polttoaineita tai sillä voi olla suoria käyttökohteita myös maataloudessa. (Buttmann 2019, 1–2.) Kuvassa 22 on esitettyä TerraNova® Ultra -tekniikan prosessi.



**Kuva 22.** TerraNova® Ultra (Buttmann 2019, 2).

TerraNova Energy:n kehittämässä tekniikassa valtaosa lietteen fosforista saadaan sitoutumaan rejektivesivirtaan (suodokseen) säätämällä prosessin pH happamaksi (noin 1,5–3). Fosforia voitaisiin ottaa rejektivedestä talteen kalsiumfosfaattina lisäämällä siihen kalsiumsilikaattihydraattia. Raskasmetallipitoisuudet ovat tuotetussa lannoitetuotteessa matalia. Typeä ja kaliumia tuotteessa on vain vähän. Fosforin kokonaissaanto olisi prosessissa noin 60–80 %. (Pöyry Finland 2019, 37.)

Valmistajalta löytyy tekniikka kahdessa eri kokoluokassa, joista TerraNova® Ultra on tarkoitettu yli 5 000 t/a lietemäärälle ja pienempi TerraNova® Compact alle 5 000 t/a lietemäärälle (20–30 % TS) (TerraNova Energy 2015). Valmistajalta löytyy muutamia referenssejä, joissa tekniikkaa on pilotoitu. Tällä hetkellä ainoa täyden mittakaavan laitos on toiminnassa Jiningissä Kiinassa. Laitos on ollut toiminnassa vuodesta 2016 ja se käsittelee mekaanisesti lingoilla kuivattua lietettä noin 14 000 t/a (23 % TS). Laitoksen kapasiteettia on tarkoitus nostaa 40 000 t/a. (Pöyry Finland 2019, 39.) Yrityksen kehittämää fosforin talteenottotek-

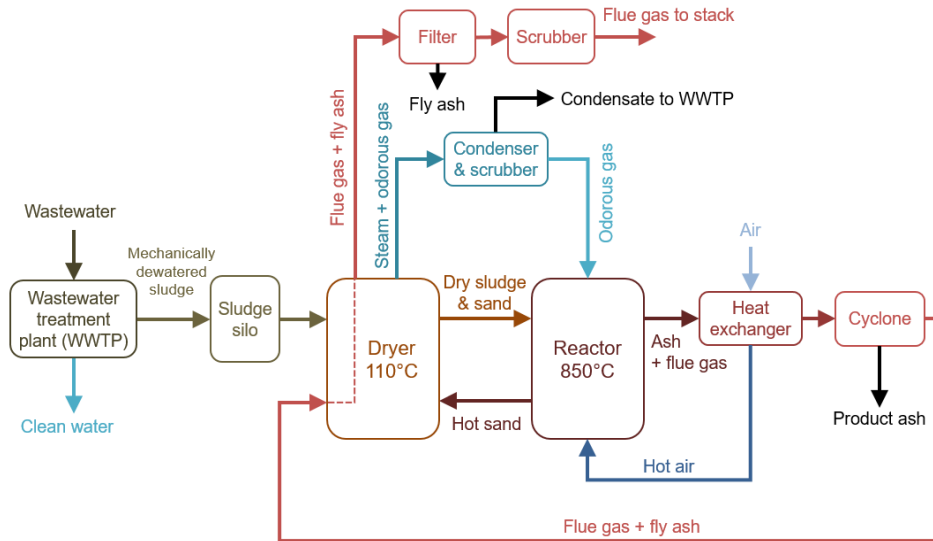
niikkaa ei ole vielä käytössä kyseisessä laitoksessa (Pöyry Finland 2019, 37). Tekniikan sähkönkulutuksen on kerrottu olevan  $18 \text{ kWh}_{el}/t$  (23 % TS) ja lämmönkulutuksen  $130 \text{ kWh}_{th}/t$  (23 % TS) (Buttmann 2019, 3).

## 6 ENDEV-TEKNOLOGIA

Suomalainen cleantech-yritys Endev Oy on kehittänyt puhdistamolietteen erillispolttoon soveltuvan tekniikan nimeltään Endev-teknologia (PAKU-teknologia). Tekniikkaa on kehitetty myös yhteistyössä Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston kanssa. Teknologia on kehitetty etenkin pienen kokoluokan sovelluksiin (10 000 t/a (30 % TS)), siinä missä suurin osa erillispolttotekniikoista on kehitetty suurempaan kokoluokkaan. Teknologian tavoitteet ovat lietteen sisältämän energian ja ravinteiden talteenotto sekä lietteen sisältämien haitta-aineiden ja mikromuovien täydellinen hävitys.

### 6.1 Prosessin esittely

Prosessitekniikaltaan Endev-teknologia poikkeaa yleisimmistä erillispolttomenetelmistä. Endev-teknologiassa käytetään ns. kiertomassakuivuria ja kiertomassareaktorin. Lieke kuivataan ensin termisesti hyvin kuivaksi (yli 95 % kuiva-ainepitoisuuteen) kiertomassakuivurissa, jonka jälkeen lieke poltetaan kiertomassareaktorissa. Kiertomassalla tarkoitetaan kuivurin ja polttoreaktorin välillä kierrätettävää kuumaa hiekkaa. Endev-teknologialla voidaan käsitellä sekä mädättämätöntä että mädätettyä yhdyskuntajäteveden puhdistuksessa syntyvää puhdistamolietettä. Tulevaisuudessa teknologiaa voidaan hyödyntää myös teollisuuden (esimerkiksi sellu- ja paperiteollisuuden) puhdistamolieteteille. Teknologia on tyypillisellä yhdyskuntalietteellä energiaomavarainen, kun syötettävän mekaanisesti kuivatun lietteen kuiva-ainepitoisuus on vähintään 20 %. Kuvassa 23 on esitettyä Endev-teknologian prosessi.



**Kuva 23.** Endev-tekniologian prosessi (Peltola et al. 2021).

Prosessin syötteenä käytetään mekaanisesti vähintään 20 % kuiva-ainepitoisuuden kuivattua puhdistamolietettä, joka varastoidaan lietsiiloon. Lietsiilo pitää yllä tasaista polttoainesyöttöä prosessiin, jos puhdistamolta tulevan lietteen syöttö katkeaa. Liette syötetään siilosta kiertomassakuivuriin, joka on tyypiltään kiertopetikuivain. Kuivaimessa liete sekoittuu kuumen hiekan sekaan, jota kierrätetään kuivaimen polttoreaktorista. Leijupetikuivaimen leijutuskaasuna käytetään vesihöyryä, jota saadaan kierrättämällä kuivurissa haihtunutta vettä takaisin kuivuriin puhaltimen avulla. Kuivurissa liete kuivuu hyvin nopeasti kuumen hiekkapedin seassa 110 °C lämpötilassa. Kuivuriin saadaan lämpöä sekä kuivuriin kierrätettävän kuumen hiekan mukana että lämmittämällä kuivuria poltosta syntyvillä savukaasuilla. Osa kuivurissa haihtuneesta vedestä lauhdutetaan nesteeksi lauhduttimessa ja lauhtunut vesi ohjataan takaisin jätevedenpuhdistamolle. Haihtuneen veden seassa on myös jonkin verran lauhtumattomia hajukaasuja, jotka jäävät lauhduttimessa kaasumaiseen muotoon.

Kuivurissa hyvin kuivaksi kuivunut liete ja lietteeseen kuivurissa sekoittunut hiekka ohjataan polttoreaktoriin. Polttoreaktori on tyypiltään kiertoleijupetikattila. Reaktorissa käytetään leijutuskaasuna ilmaa, joka toimii myös palamisilmana. Palamisilma esilämmitetään ennen reaktoria poltossa syntyvillä savukaasuilla. Reaktorissa hiekan seassa oleva liete palaa hyvin nopeasti 850 °C lämpötilassa tuhoten tehokkaasti lietteessä olevat orgaaniset haitta-aineet, lääkejäämät, mikromuovit, huumeet ja hormonit. Myös lauhduttimessa erotetut haju-



kaasut ohjataan polttoon. Polttoreaktorissa savukaasut ja kierrätettävä hiekka erotetaan toisistaan ja savukaasut jatkavat matkaa savukaasujen käsittelyyn ja kuuma hiekka takaisin kuivuriin lietteen kuivaukseen. Tuhkaa erotetaan savukaasuista savukaasukanavassa kaksivaiheisesti ja savukaasujen lämpöä otetaan talteen palamisilman ja kuivurin lämmitykseen. Ennen savukaasujen vapauttamista ympäristöön savupiipun kautta savukaasut puhdistetaan vielä rikkidioksidista (SO<sub>2</sub>) märkäpesurilla (engl. scrubber). Käynnistysten yhteydessä reaktorissa poltetaan myös polttoöljyä ja nestekaasua, mutta normaalissa ajossa reaktori toimii pelkällä kuivatulla lietteellä.

## 6.2 Energian ja ravinteiden talteenotto

Endev-teknologiasta energiaa saadaan talteen reaktorissa lietteen palamisessa vapautuvasta lämmöstä. Reaktorista vapautuvalla lämmöllä lämmitetään jäähdytysvettä reaktorin paluukanavassa, jossa hiekka palautetaan kuivuriin. Lämpöenergiaa vapautuu noin 1 MWh<sub>th</sub> / poltettu lietetonna. Kuumaa jäähdytysvettä voidaan käyttää esimerkiksi kaukolämmön tuotannossa ja/tai jätevedenpuhdistamon yhteydessä olevan mädätysprosessin lämmitykseen. Reaktorin jäähdytysveden lisäksi lämpöä saadaan talteen myös kuivurin lauhduttimesta, josta lämpöä saadaan talteen ns. latenttina lämpönä kuivurissa haihtuneen veden lauhtuessa nesteeksi. Lauhduttimesta saatava matalan lämpötilan lämpöenergia voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämmön tuotannossa kaukolämpöveden esilämmityksessä. Sähkön tuotanto Endev-teknologialla on myös tulevaisuudessa mahdollista.

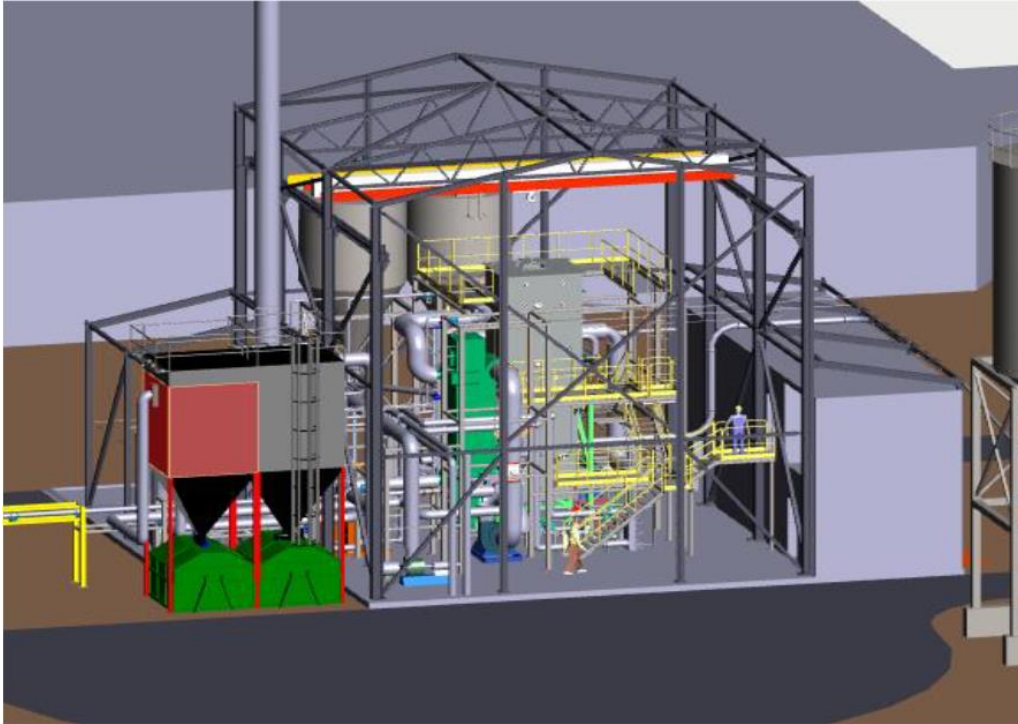
Ravinteiden talteenotto on Endev-teknologian tärkeimpiä ominaisuuksia. Fosforia voidaan ottaa talteen lietteen tuhkasta, josta suurin osa kulkeutuu reaktorista savukaasujen mukana. Yleisesti lietteen erillispolttomenetelmissä fosfori täytyy käsitellä tuhkasta erilleen erilaisilla termisillä ja kemiallisilla menetelmillä, mutta Endev-teknologia on tässä poikkeus. Savukaasujen mukana kulkevasta tuhkasta erotetaan erilleen ns. tuotetuhka (engl. product ash) ja lentotuhka (engl. fly ash). Syntyvästä tuhkasta noin 95 % on suurempaa tuotetuhkaa, jota saadaan erotettua savukaasuista keskipakovoimaisesti syklonin (engl. cyclone) avulla. Tuotetuhka on fosforirikkaana tuotteena käytettävissä sellaisenaan lannoitteena (metsälannoitteena, tulevaisuudessa ehkä myös peltolannoitteena) tai lannoitteen raaka-aineena. Raskasmetallit konsentroituvat pienempään lentotuhkajakeeseen, joka erotetaan savukaasuista tuo-

tetuhkan erotuksen jälkeen suodattimessa (engl. filter). Näin fosforia ei tarvitse jalostaa erillisen tuhkasta energiaa kuluttavin menetelmin, vaan fosforipitoinen tuhka ja raskasmetalleja sisältävä tuhka saadaan eroteltua prosessista omina jakeinaan. Tuotetuhkan hyödyntämisestä on tehty kokeita mm. Luonnonvarakeskuksen (LUKE), Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) ja Elintarviketurvallisuusviraston (EVIRA) (nyk. Ruokavirasto) kanssa. Tuotetuhkan hyödyntämismahdollisuus lannoitteena on varmistettu. Typen talteenottoa kuivurin lauhdevesistä on tutkittu, mutta käytännössä typen talteenottoa ei ole vielä testattu. Toistaiseksi aito markkinaehtoinen kysyntä talteenotetulle typelle puuttuu.

### **6.3 Rovaniemen laitos**

Endev-teknologiaa on pilotoitu aiemmin pienen mittakaavan koelaitoksissa Kotkassa ja Pyhtäällä. Ensimmäinen kaupallisen mittakaavan laitos aloitti toimintansa vuonna 2020 Rovaniemellä Napapiirin Energian ja Veden (NEVE) Alakorkalon jätevedenpuhdistamon yhteydessä. Laitoksen rakentaminen aloitettiin keväällä 2018 ja koekäytöt aloitettiin heinäkuussa 2019. Laitos on ensimmäinen puhdistamolietteen erillispolttoon suunniteltu laitos Suomessa. Aiemmin puhdistamolla syntynyt liete on kompostoitu Rovaniemellä tai kuljetettu sittemmin Ouluun mädätykseen. Laitoshanke valittiin toukokuussa 2017 yhdeksi Suomen hallituksen kärkihankkeista ravinnekierrätyksen osalta. Laitos oli noin 4,3 miljoonan euron investointi ja hankkeelle myönnettiin Ympäristöministeriön tukea 1,27 miljoonaa euroa. NEVE säästää vuodessa 100 000 euroa kuljetuskustannuksissa, kun lietettä ei tarvitse enää kuljettaa Ouluun käsiteltäväksi.

Alakorkalon lietteenpolttolaitokseksi nimetyn laitoksen kapasiteetti on 12 000 t/a linko-kuivattua lietettä (n. 20–25 % TS). Laitoksen lämpöteho on noin 1,2 MW<sub>th</sub> ja laitoksella tuotettu lämpöenergia hyödynnetään NEVE:n kaukolämpöverkon tarpeisiin. Laitoksella tuotettu kaukolämpö riittää noin 300–400 omakotitalon lämmitystarpeisiin. Lannoitteena hyödynnettävälle tuotetuhkalle on markkinakanavat NEVE:n kumppanin Ecolanin kautta. Kuvassa 24 on esitettyä havainnekuva Rovaniemen laitoksesta ja kuvassa 25 on valokuva valmistuneesta laitoksesta Alakorkalon jätevedenpuhdistamon yhteydessä.



**Kuva 24.** Havainnekuva Rovaniemen laitoksesta (Endev 2018).



**Kuva 25.** Valmistunut Rovaniemen laitos Alakorkalon jätevedenpuhdistamolla (NEVE 2019).

## 7 PROSESSIMALLI ENDEV-TEKNOLOGIASTA

Endev-teknologiasta tehdään prosessimalli käyttäen IPSEpro-ohjelmaa. Prosessimallia käytetään teknologian taseiden laskentaan, tarkemmin sanottuna prosessimalli on energia- ja massatasemalli Endev-teknologiasta. Mallilla saadaan ratkaistua perustapauksen lisäksi myös skaalaustarkastelun taseet, jossa prosessia tarkastellaan kahdessa perustapausta suuremmassa kokoluokassa. Mallilla voidaan myös tehdä herkkyystarkasteluita joillekin muuttujille, jotka vaikuttavat koko prosessin massa- ja energiataseisiin. Tässä työssä herkkyystarkasteluun valitut muuttujat ovat puhdistamolietteen kuiva-ainepitoisuus ja tuhkapitoisuus sekä lietteen orgaanisen aineksen koostumus.

Tässä työssä käytettävä IPSEpro-ohjelman versio on IPSEpro 7,0. Ohjelman on kehittänyt itävaltalainen SimTech GmbH. Ohjelman päämoduulit ovat PSE (engl. Process Simulation Environment) ja MDK (engl. Model Development Kit). PSE-moduuli on graafisella käyttöliittymällä varustettu prosessisimulointiin käytettävä työkalu. PSE-moduulissa käyttäjä voi rakentaa komponenteista erilaisia prosessikokonaisuuksia ja simuloida prosessin massa- ja energiataseita. Valmiita komponentteja on tarjolla erilaisista kirjastoista, tässä työssä käytetään Advanced Power Plant Library -nimistä komponenttikirjastoa. MDK-moduulin kautta käyttäjällä on mahdollisuus muokata valmiiden komponenttikirjastojen komponentteja ja luoda myös kokonaan uusia komponentteja käytettäväksi valmiiden komponenttien kanssa. Tässä työssä käytetään MDK-moduulia lietteen termiseen kuivaukseen käytettävän kuivurin luomiseen.

IPSEpro:n simulointi perustuu epälineaaristen yhtälöiden ratkaisuun. Epälineaariset yhtälöt jaetaan yhtälöryhmiin, jotka ratkaistaan jokainen peräkkäin ennalta määrättyssä järjestyksessä nk. Newton-Raphson menetelmällä. Jokainen kokonaisuuteen lisätty komponentti lisää yhtälöiden kokonais määrää ja käyttäjän on määritettävä kokonaisuuteen riittävästi alkuarvoja. Alkuarvojen valinnalla on suuri merkitys laskennan konvergoitumiseen, huonoilla alkuarvoilla laskenta ei välttämättä etene loppuun asti, vaan PSE keskeyttää laskennan ja antaa virheilmoituksen. Laskenta loppuu, kun jokin lopetuskriteereistä täyttyy. Kriteereitä ovat iteraatiokierrosten maksimimäärän saavuttaminen, jokainen muuttuja on muuttunut enintään tietyn määrän tai yhtälön vasemman ja oikean puolen ero on ennalta asetettu suuruus.

## 7.1 Energia- ja massataseet

Endev-tekniikan keskeisimpien komponenttien eli kuivurin ja reaktorin taseyhtälöt määritellään ennen prosessin mallintamista IPSEpro-ohjelmalla. Taseyhtälöitä ovat massa- ja energiataseet, jotka perustuvat kahteen keskeiseen lakiin: massan säilymiseen ja energian säilymiseen. Kuivurin yhteydessä esitetään myös kuivurin lauhduttimen taseet ja reaktorin yhteydessä esitetään myös palamisilman esilämmittimen taseet.

### 7.1.1 Kuivuri

Kuivurissa prosessiin syötettävä puhdistamoliete kuivataan termisesti ennen sen syöttöä polttoon. Kuivuria lämmitetään sekä reaktorista kuivuriin syötettävällä hiekalla että reaktorista syötettävillä savukaasuilla. Savukaasut eivät ole kosketuksissa lietteen ja hiekan kanssa, joten massataseessa savukaasupuolen ja liete-hiekkapuolen yhtälöt kirjoitetaan erikseen. Massataseissa yhtälön vasemmalla puolella on sisään tulevat massavirrat ja oikealla puolella uloslähtevät massavirrat.

$$\dot{m}_{sk2} = \dot{m}_{sk3} \quad (4)$$

jossa  $\dot{m}_{sk2}$  on kuivuriin tulevan savukaasun massavirta [kg/s] ja  $\dot{m}_{sk3}$  on kuivuriin tulevan savukaasun massavirta [kg/s].

$$\dot{m}_{hiekk} + \dot{m}_{liete1} = \dot{m}_{h1} + \dot{m}_{hiekk} + \dot{m}_{liete2} \quad (5)$$

jossa  $\dot{m}_{h1}$  on höyrystyneen veden massavirta lauhduttimeen [kg/s],  $\dot{m}_{hiekk}$  on hiekan massavirta kuivuriin [kg/s],  $\dot{m}_{liete1}$  on märän lietteen massavirta kuivuriin [kg/s] ja  $\dot{m}_{liete2}$  on kuivan lietteen massavirta ulos kuivurista.

Todellisuudessa kuivuriin syötettävä hiekka sekoitetaan lietteeseen kuivurin sisällä, mutta tässä työssä tehtävässä IPSEpro-mallissa hiekka sekoitetaan lietteeseen ennen kuivuria. Mallissa oleva kuivuri koostuu ainoastaan kuivurin lämmitettävästä osasta, jota lämmitetään savukaasuilla. Jos tarkastellaan vain kuivurin savukaasuilla lämmitettävää osaa, voidaan yhtälö 5 kirjoittaa uudelleen käsittämään koko liete-hiekkaseosta.

$$\dot{m}_{pa1} = \dot{m}_{h1} + \dot{m}_{pa2} \quad (6)$$

jossa  $\dot{m}_{pa1}$  on märän liete-hiekkaseoksen massavirta kuivurin lämmitysosaan [kg/s] ja  $\dot{m}_{pa2}$  on kuivan liete-hiekkaseoksen massavirta reaktoriin [kg/s].

Kuivurin energiatase voidaan muodostaa samalla periaatteella kuin massatase eli yhtälön vasemmalla puolella ovat kuivuriin tulevat energiavirrat, ja yhtälön oikealla puolella kuivurista lähtevät energiavirrat. Energiavirralla tarkoitetaan tietyn aineen massavirran ja ominaisentalpian tuloa. Kuivurista ei oleteta olevan lämpöhäviöitä ympäristöön eikä kuivurissa tehdä tai sinne viedä mekaanista työtä.

$$\dot{m}_{pa1}h_{pa1} + \dot{m}_{sk2}h_{sk2} = \dot{m}_{pa2}h_{pa2} + \dot{m}_{h1}h_{h1} + \dot{m}_{sk3}h_{sk3} \quad (7)$$

jossa  $h_{pa1}$  on kuivuriin menevän liete-hiekkaseoksen ominaisentalpia [kJ/kg],  $h_{sk2}$  on kuivuriin menevän savukaasun ominaisentalpia [kJ/kg],  $h_{pa2}$  on reaktoriin menevän liete-hiekkaseoksen ominaisentalpia [kJ/kg],  $h_{h1}$  on lauhduttimeen menevän höyrystyneen veden ominaisentalpia [kJ/kg] ja  $h_{sk3}$  on kuivurista lähtevän savukaasun ominaisentalpia [kJ/kg].

Savukaasut ja liete-hiekkaseos eivät ole kosketuksissa toisiinsa kuivurissa. Savukaasut luovuttavat lämpöenergiaa liete-hiekkaseokseen kuivurin lämmitysosan lämpöpinnan yli. Yhtälö 7 voidaan jaotella siten että savukaasupuoli on yhtälön vasemmalla puolella ja liete-hiekkaseos ja höyrystynyt vesi yhtälön oikealla puolella. Näin saadaan määritettyä yhtälöt kuivurin lämpöpinnan yli siirtyvälle lämpövirralle.

$$\dot{m}_{sk2}h_{sk2} - \dot{m}_{sk3}h_{sk3} = \dot{m}_{pa2}h_{pa2} + \dot{m}_{h1}h_{h1} - \dot{m}_{pa1}h_{pa1} \quad (8)$$

$$\Phi_k = \dot{m}_{sk2}h_{sk2} - \dot{m}_{sk3}h_{sk3} \quad (9)$$

jossa  $\Phi_k$  on kuivurin lämpöpinnan yli siirtynyt lämpöteho [kW].

$$\Phi_k = \dot{m}_{pa2}h_{pa2} + \dot{m}_{h1}h_{h1} - \dot{m}_{pa1}h_{pa1} \quad (10)$$

Lauhduttimen massataseet ja energiatase saadaan samalla periaatteella kuin kuivurinkin. Lauhduttimessa kuivurista syntynyt höyry lauhtuu nesteeksi ja luovuttaa lämpöenergiaa lauhduttimeen virtaavaan jäähdytysvedeen. Todellisessa prosessissa kaikki kuivurissa höyrystynyt vesi ei lauhdu lauhduttimessa, mutta tässä työssä oletetaan koko höyrymäärän lauhtuvan nesteeksi. Jäähdytysvesi ja kuivurista tuleva höyrystynyt vesi eivät ole kosketuksissa toisiinsa. Myöskään lauhduttimesta ei oleteta olevan lämpöhäviöitä eikä mekaanista työtä lauhduttimessa tehdä tai sinne viedä.

$$\dot{m}_{h1} = \dot{m}_{h2} \quad (11)$$

jossa  $\dot{m}_{v2}$  on lauhtuneen veden massavirta ulos lauhduttimesta [kg/s].

$$\dot{m}_{jv1} = \dot{m}_{jv2} \quad (12)$$

jossa  $\dot{m}_{jv1}$  on lauhduttimeen menevän jäähdytysveden massavirta [kg/s] ja  $\dot{m}_{jv2}$  on reaktoriin menevän jäähdytysveden massavirta [kg/s].

$$\dot{m}_{h1}h_{h1} + \dot{m}_{jv1}h_{jv1} = \dot{m}_{h2}h_{h2} + \dot{m}_{jv2}h_{jv2} \quad (13)$$

jossa  $h_{jv1}$  on lauhduttimeen menevän jäähdytysveden ominaisentalpia [kJ/kg],  $h_{h2}$  on lauhduttimesta ulos lähtevän lauhtuneen veden ominaisentalpia [kJ/kg] ja  $h_{jv2}$  on reaktoriin menevän jäähdytysveden ominaisentalpia [kJ/kg].

$$\dot{m}_{h1}h_{h1} - \dot{m}_{h2}h_{h2} = \dot{m}_{jv2}h_{jv2} - \dot{m}_{jv1}h_{jv1} \quad (14)$$

$$\Phi_l = \dot{m}_{h1}h_{h1} - \dot{m}_{h2}h_{h2} \quad (15)$$

jossa  $\Phi_l$  on lauhduttimen lämpöpinnan yli siirtynyt lämpöteho [kW].

$$\Phi_l = \dot{m}_{jv2}h_{jv2} - \dot{m}_{jv1}h_{jv1} \quad (16)$$

### 7.1.2 Reaktori

Kuivurin jälkeen liete-hiekkaseos menee reaktoriin, jossa liete palaa muodostaen savukaasuja. Reaktoriin syötetään palamisilmaa, joka lämmitetään ennen reaktoria palamisilman esilämmittimessä. Reaktoria jäähdytetään jäähdytysvedellä ja jäähdytysvesi ei ole kosketuksissa varsinaisen polttoprosessiin menevien aineiden eikä poltosta syntyvien savukaasujen kanssa. Todellisuudessa lauhdutinta ja reaktoria jäähdytetään eri jäähdytysvesikiertoilla, mutta tässä työssä oletetaan saman jäähdytysveden jäähdyttävän ensin lauhdutinta ja sitten reaktoria. Reaktorin massataseet ja energiatase voidaan muodostaa samalla periaatteella kuin kuivurin ja lauhduttimen taseet. Todellisessa prosessissa reaktoriin tuodaan myös kuivurista lauhtumattomat hajukaasut, mutta tässä työssä ei oteta hajukaasuja huomioon. Reaktorissa tapahtuvan palamisen oletetaan tässä työssä olevan täydellistä eli palamattomien polttoainepartikkelien häviöitä ei oteta huomioon. Reaktorista ei oleteta olevan lämpöhäviöitä eikä reaktorissa tehdä tai sinne viedä mekaanista työtä.

$$\dot{m}_{jv2} = \dot{m}_{jv3} \quad (17)$$

jossa  $\dot{m}_{jv3}$  on jäähdytysveden massavirta ulos reaktorista [kg/s].

$$\dot{m}_{pa2} + \dot{m}_{i2} = \dot{m}_{sk1} + \dot{m}_{hiekkka} + \dot{m}_{tuhka} \quad (18)$$

jossa  $\dot{m}_{i2}$  on palamisilman massavirta reaktoriin [kg/s],  $\dot{m}_{sk1}$  on savukaasujen massavirta palamisilman esilämmittimeen [kg/s] ja  $\dot{m}_{tuhka}$  on tuhkan massavirta ulos reaktorista [kg/s].

$$\dot{m}_{pa2}(h_{pa2} + q_{pa2}) + \dot{m}_{i2}h_{i2} + \dot{m}_{jv2}h_{jv2} = \dot{m}_{sk1}h_{sk1} + \dot{m}_{jv3}h_{jv3} + \dot{m}_{hiekkka}h_{hiekkka} + \dot{m}_{tuhka}h_{tuhka} \quad (19)$$

jossa  $h_{pa2}$  on reaktoriin menevän liete-hiekkaseoksen ominaisentalpia [kJ/kg],  $q_{pa2}$  on reaktoriin menevän liete-hiekkaseoksen lämpöarvo [kJ/kg],  $h_{i2}$  on reaktoriin menevän palamisilman ominaisentalpia [kJ/kg],  $h_{sk1}$  on palamisilman esilämmittimeen menevän savukaasun ominaisentalpia [kJ/kg],  $h_{jv3}$  on reaktorista lähtevän jäähdytysveden ominaisentalpia [kJ/kg],  $h_{hiekkka}$  on reaktorista lähtevän hiekan ominaisentalpia [kJ/kg] ja  $h_{tuhka}$  on reaktorista lähtevän tuhkan ominaisentalpia [kJ/kg].



$$\dot{m}_{pa2}(h_{pa2} + q_{pa2}) + \dot{m}_{i2}h_{i2} - \dot{m}_{sk1}h_{sk1} - \dot{m}_{hiekkka}h_{hiekkka} - \dot{m}_{tuhka}h_{tuhka} = \dot{m}_{jv3}h_{jv3} - \dot{m}_{jv2}h_{jv2} \quad (20)$$

$$\Phi_r = \dot{m}_{jv3}h_{jv3} - \dot{m}_{jv2}h_{jv2} \quad (21)$$

jossa  $\Phi_r$  on reaktorin lämpöpinnan yli siirtynyt lämpövirta [kW].

$$\Phi_r = \dot{m}_{pa2}(h_{pa2} + q_{pa2}) + \dot{m}_{i2}h_{i2} - \dot{m}_{sk1}h_{sk1} - \dot{m}_{hiekkka}h_{hiekkka} - \dot{m}_{tuhka}h_{tuhka} \quad (22)$$

Palamisilman esilämmittimen taseet saadaan myös samalla periaatteella kuin edellä määriteltyjen komponenttien taseet. Palamisilman esilämmittimessä lämmitetään savukaasuilla palamisilma ennen sen syöttöä reaktoriin. Palamisilma ja savukaasut eivät ole kosketuksissa toisiinsa. Palamisilman esilämmittimestä ei oleteta olevan lämpöhäviöitä eikä siinä tehdä tai siihen viedä mekaanista työtä.

$$\dot{m}_{sk1} = \dot{m}_{sk2} \quad (23)$$

$$\dot{m}_{i1} = \dot{m}_{i2} \quad (24)$$

jossa  $\dot{m}_{i1}$  on palamisilman massavirta esilämmittimeen [kg/s].

$$\dot{m}_{sk1}h_{sk1} + \dot{m}_{i1}h_{i1} = \dot{m}_{sk2}h_{sk2} + \dot{m}_{i2}h_{i2} \quad (25)$$

jossa  $h_{i1}$  on esilämmittimeen menevän palamisilman ominaisentalpia [kJ/kg].

$$\dot{m}_{sk1}h_{sk1} - \dot{m}_{sk2}h_{sk2} = \dot{m}_{i2}h_{i2} - \dot{m}_{i1}h_{i1} \quad (26)$$

$$\Phi_{pe} = \dot{m}_{sk1}h_{sk1} - \dot{m}_{sk2}h_{sk2} \quad (27)$$

jossa  $\Phi_{pe}$  on palamisilman esilämmittimen lämpöpinnan yli siirtynyt lämpövirta [kW].

$$\Phi_{pe} = \dot{m}_{i2}h_{i2} - \dot{m}_{i1}h_{i1} \quad (28)$$

## 7.2 IPSEpro-malli

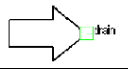
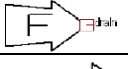

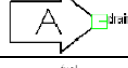
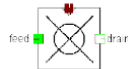
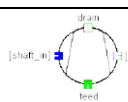
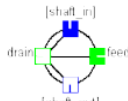
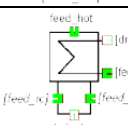
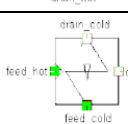

Endev-teknologiasta luodaan IPSEpro:lla prosessimalli, joka pyrkii jäljittelemään oikeaa prosessia mahdollisimman tarkasti niin komponenttien kuin alkuarvojenkin osalta. Mallin pohjana on käytetty Endev-teknologian Rovaniemen laitoksen todellisia prosessi-arvoja. Mallissa on tehty muutamia yksinkertaistuksia verrattuna todelliseen prosessiin johtuen osittain myös IPSEpro:n rajoituksista toiminnallisten prosessiratkaisujen suhteen. Tärkein yksinkertaistus on kuivurin lauhduttimessa syntyvien hajukaasujen jättäminen pois tarkastelusta. Todellisessa prosessissa hajukaasut erotetaan lauhduttimessa lauhtuvasta höyrystä ja viedään reaktoriin poltettavaksi. IPSEpro:n rajoittuneisuuden vuoksi hajukaasuja ei oleteta mallissa muodostuvan eikä reaktorissa ole hajukaasujen polttoa.

Toinen yksinkertaistus on varsinaisen hiekkakierron puuttuminen kokonaan polttoreaktorin ja kuivurin väliltä. IPSEpro:ssa ei ole määritelty valmiiden aineiden joukkoon ainetta nimeltään hiekka, joten hiekan lisäys lietteen sekaan on toteutettava muulla tavalla. Tässä työssä lietteeseen sekoitetaan tuhkaa, joka on polttoreaktorin lämpötilassa. Tuhka on IPSEpro:n valmiita aineita ja se on tässä tapauksessa määritelty polttoainevirraksi. Tuhkaksi määriteltyä polttoainevirtaa sekoitetaan mallissa toisen polttoainevirran eli lietteen sekaan kuivurin yhteydessä. Kuivurista liete-tuhkaseos matkaa polttoreaktoriin, jossa lietteen orgaaninen aines palaa muodostaen savukaasuja. Tuhka käyttäytyy samaan tapaan kuin hiekka polttokammiossa eli se ei epäorgaanisena aineena pala vaan ainoastaan lämpenee orgaanisen aineen palamisesta vapautuvan lämpöenergian avulla. Varsinaista tuhkan takaisinkiertoa polttoreaktorista kuivuriin ei mallissa ole, polttoreaktoriin syötettävän lietteen sisältämä tuhka miinustetaan reaktorin massataseesta pois polttokammio-nimisessä IPSEpro:n valmiissa komponentissa. Näin polttokammio-komponentista lähtevät savukaasut eivät sisällä tuhkaa ollelleenkaan, joten myöskään savukaasuista erotettavaa tuote- ja lentotuhkaa ei mallissa ole. Eli IPSEpro-mallissa polttokammio-komponentista miinustettava tuhkavirta pitää sisällään sekä todellisessa prosessissa reaktoriin menevän hiekan että todellisessa prosessissa lietteen sisältämän tuhkan (tuotetuhka + lentotuhka).

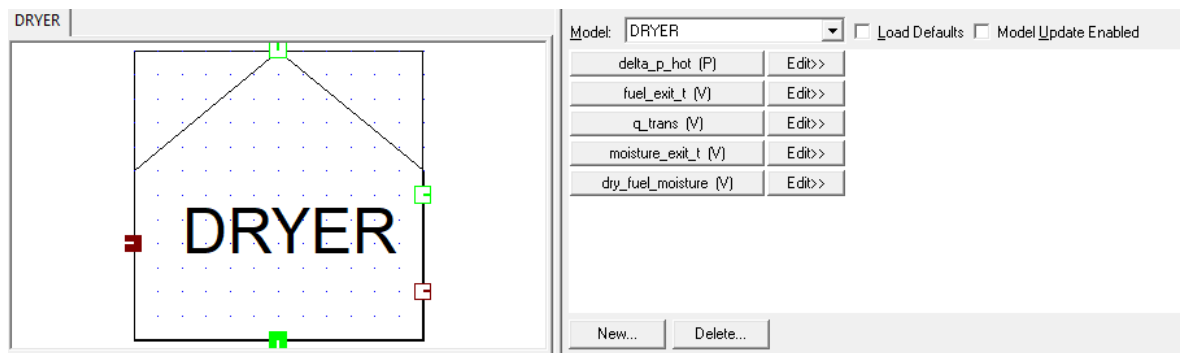
Muita yksinkertaistuksia ovat savukaasujärjestelmän puuttuminen eli savukaasut ohjataan mallissa kuivurin jälkeen ulos prosessista. Mallissa myös lauhduttimeen ja reaktoriin syötettävän jäähdytysveden oletetaan olevan suoraan kaukolämpövedä eli kaukolämpövesi esilämmitetään ensin lauhduttimessa. Lauhduttimen jälkeen kaukolämpövesi siirtyy reaktorin jäähdytyspiiriin, jossa se lämpenee lopulliseen prosessista ulos johdettavaan lämpötilaansa jäähdyttäen samalla reaktoria.

Malli on rakennettu IPSEpro:n PSE-moduulissa ja sen rakentamisessa on käytetty mahdollisimman paljon valmiita komponentteja suoraan komponenttikirjastosta. Valmiit komponentit ovat saatavilla Advanced Power Plant Library -nimisestä komponenttikirjastosta. Taulukossa 5 on esitetty mallissa käytettyjen valmiiden komponenttien nimet.

**Taulukko 5.** Prosessimallissa käytettyjen komponenttien nimet.

	source (prosessiin tulo)
	fuel source (polttoaineen tulo prosessiin)
	sink (poistuminen prosessista)
	ambient source (ilman tulo prosessiin ympäristön tilassa)
	combustor (polttokammio)
	compressor (kompessorori)
	pump (pumppu)
	condenser (lauhdutin)
	htex counter (vastavirtalämmönsiirrin)
	mixer (sekoittaja)

Kiinteän polttoaineen kuivain -tyyppistä komponenttia ei ole saatavilla työssä käytetystä Advanced Power Plant Library -komponenttikirjastosta. Jotta voitaisiin mallintaa myös lietteen kuivaukseen käytettävää kuivurin prosessia, on kuivuri luotava manuaalisesti käyttäen IPSEpro:n MDK-moduulia. Kuivurin luominen MDK:ssa perustuu luvussa 7.1.1. määritelyihin massa- ja energiataseisiin kuivurista. Erilaisille komponenteille on mahdollistaa antaa käyttäjän määriteltäviä parametreja, jotka on aina annettava kullekin komponentille ennen simulointia. Parametrien lisäksi komponenteilla voi olla erilaisia muuttujia, joista osa on annettava alkuarvoiksi simulointia varten tapauskohtaisesti. Kuivurille määritellään parametriksi savukaasupuolen painehäviö  $\Delta p_{hot}$ , joka on pakollinen alkuarvo lähes kaikille eri tyyppisille lämmönsiirrinkomponenteille. Muuttujiksi määritellään kuivan polttoaineen (liete-hiekkaseoksen) loppulämpötila  $T_{fuel\_exit}$ , lämmönsiirto kuivurissa  $q_{trans}$ , lietteestä höyrystyneen veden loppulämpötila  $T_{moisture\_exit}$  ja kuivan polttoaineen (liete-hiekkaseoksen) loppukosteus  $dry\_fuel\_moisture$ . Kuivurille määriteltävät massataseet perustuvat yhtälöihin 4 ja 6 ja energiataseet yhtälöihin 9 ja 10. Parametrien, muuttujien sekä massa- ja energiataseiden lisäksi kuivurille on vielä määriteltävä yhtälöt, joilla se laskee kuivan polttoaineen eri ainesosien massaosuudet perustuen kostean polttoaineen eri ainesosien massaosuuksiin ja polttoaineesta haihdutetun veden määrään. Yhtälöt luodaan käyttäen apuna vanhemman samantapaisen polttoaineen kuivurin yhteydessä käytettyjä yhtälöitä. Myös kuivurista lähtevän höyryn koostumus määritellään kuivurissa. Kuvassa 26 on esitetynä luotu kuivuri MDK:ssa, sille määritetyt parametrit ja muuttujat sekä esimerkit kuivurin massataseista.

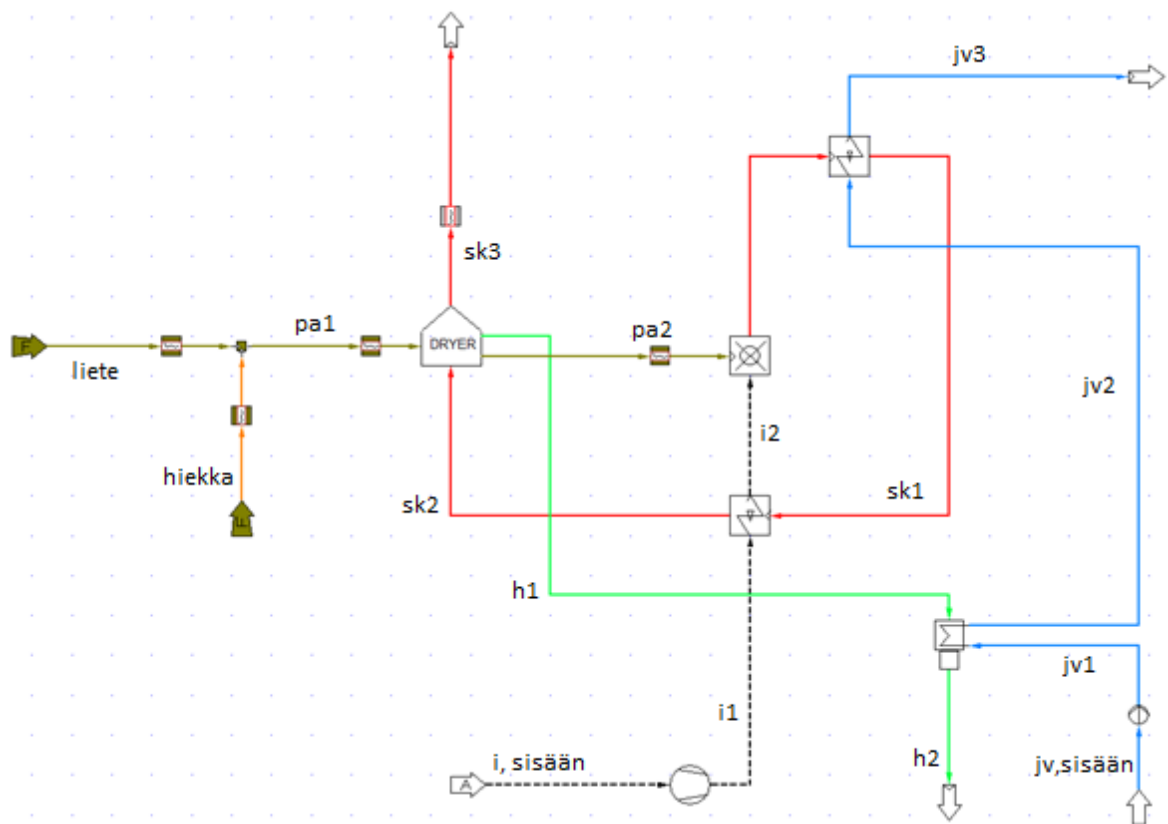


The screenshot shows the MDK software interface for a 'DRYER' component. On the left, there is a schematic diagram of a dryer with a gabled roof and a central 'DRYER' label. On the right, there is a control panel with a dropdown menu set to 'DRYER' and several 'Edit' buttons for parameters:  $\Delta p_{hot}$  (P),  $T_{fuel\_exit}$  (V),  $q_{trans}$  (V),  $T_{moisture\_exit}$  (V), and  $dry\_fuel\_moisture$  (V). Below the schematic, there is a code editor showing mass balance equations:

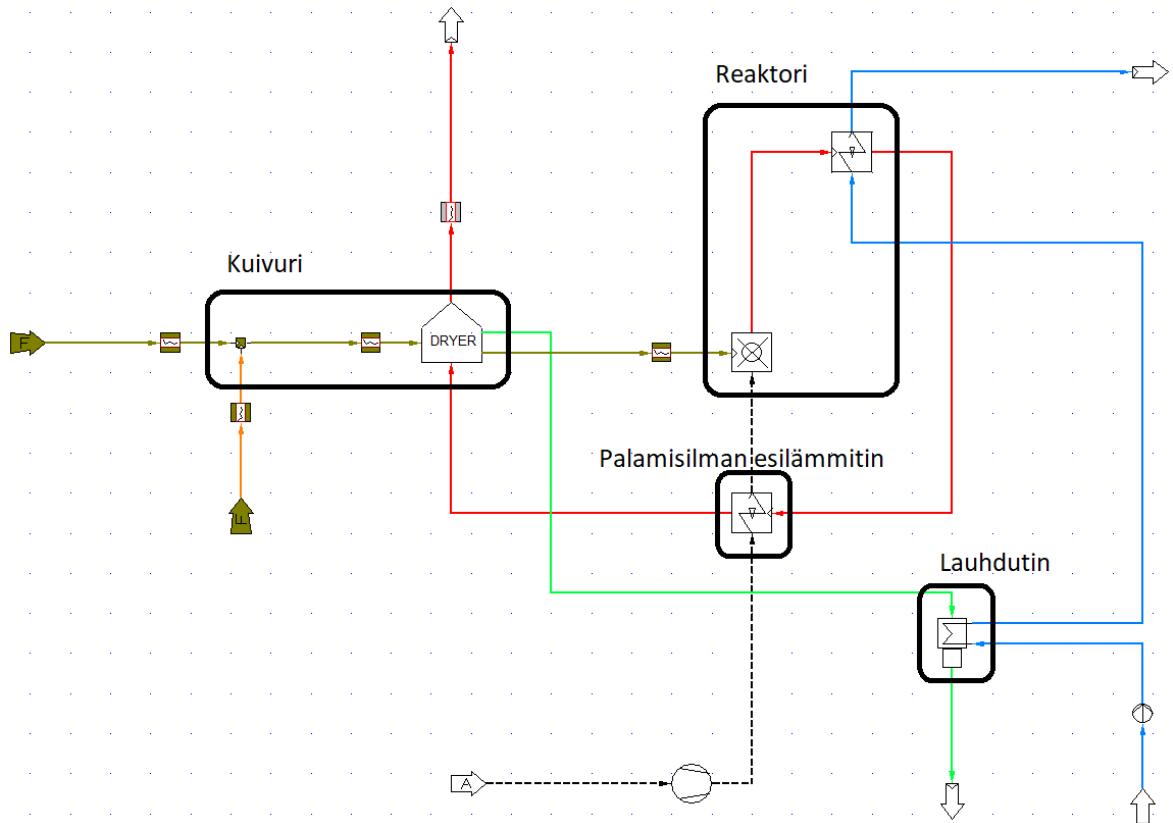
```
# Teemu Aatsinki 2021
# mass balances
f1: feed_fuel.mass = drain_fuel.mass+drain_moisture.mass;
f2: feed_hot.mass = drain_hot.mass;
f3: drain_moisture.mass = feed_fuel.mass*feed_fuel.FuelComposition.myWater-drain_fuel.mass*dry_fuel_moisture;
```

**Kuva 26.** Kuivuri MDK:ssa.

Kun kuivuri on luotu, voidaan malli rakentaa saatavilla olevista komponenteista. Mallissa on hyvä tehdä muutamia huomioita ennen sen simulointia ja tulosten tarkastelua. Polttokammio-komponentin jälkeen palamisessa syntyneet savukaasut ovat adiabaattisessa palamislämpötilassa eli polttokammiossa ei ole lämmönsiirtoa. Todellisen prosessin reaktori koostuu mallin polttokammio-komponentista ja lämmönvaihdin-komponentista. Lämmönvaihtimessa adiabaattisessa palamislämpötilassa olevat savukaasut jäädytetään reaktorin todelliseen lämpötilaan. Kuten aikaisemmin oli mainittu, hiekka sekoitetaan lietteeseen ennen kuivuria. Mallissa oleva kuivuri (dryer) on siis todellisessa prosessissa ainoastaan kuivurin lämmitetty osa, jota lämmitetään savukaasuilla. Mallissa on kompressori-komponentti, joka toimii puhaltimena puhaltuen palamisilmaa reaktoriin, IPSEpro:ssa ei ole erikseen valittavana puhallinta. Kuvassa 27 on esitettyä Endev-teknologiasta IPSEpro:lla tehty malli ja kuvassa 28 on esitettyä todellisen prosessin eri kokonaisuudet mallissa. Kuvissa ruskealla on polttoaineen virtaus, oranssilla hiekan virtaus, vihreällä kuivurissa höyrystyneen veden virtaus, punaisella savukaasujen virtaus, mustalla katkoviiivalla palamisilman virtaus ja sinisellä kaukolämpöveden virtaus.



**Kuva 27.** IPSEpro-malli Endev-teknologiasta.



**Kuva 28.** Todellisen prosessin eri kokonaisuudet mallissa.

### 7.3 Skaalaustarkastelu

Endev-teknologia voidaan prosessimallin avulla skaalata perustapauksesta kahteen suurempaan kokoluokkaan. Ennen skaalaustarkastelua malli on ratkaistava perustapauksessa, joka vastaa 10 000 t/a mekaanisesti kuivattua lietettä vuodessa. Lietteelle käytetään Endev-teknologiaan liittyvässä tarkastelussa 25 % kuiva-ainepitoisuutta (75 % kosteuspitoisuus) ja 30 % tuhkapitoisuutta (kuiva-aineessa). Lietteen koostumukselle käytetään myös hieman erilaista koostumusta kuin luvussa 2.2 esitetty lietteen koostumus. IPSEpro laskee suoraan annetulle koostumukselle alemman lämpöarvon. Taulukossa 6 on esitettyinä IPSEpro-mallissa käytetty lietteen koostumus ja IPSEpro:n laskema kuiva-aineen alempi lämpöarvo  $q$ .

**Taulukko 6.** IPSEpro-mallissa käytetty lietteen orgaanisen aineksen koostumus ja kuiva-aineen lämpöarvo.

Alkuaine	m-% kuiva-aineessa, tuhkaton
C	55,92
H	7,95
O	30,44
S	0,78
N	4,91
q	16 831 kJ/kg

Mallille täytyy antaa riittävästi alkuarvoja, jotta prosessin simuloiminen olisi mahdollista. Tärkeimpiä alkuarvoja ovat prosessiin tulevien virtojen massavirrat ja lämpötilat sekä eri komponenteille annettavat pakolliset alkuarvot ja parametrit. Myös joillekin prosessista poistuville virroille on annettava alkuarvoja, jotta alkuarvoja olisi riittävästi. Massavirrat annetaan prosessiin syötettävälle lietteelle ja hiekalle. IPSEpro:ssa massavirrat on annettava yksikössä kg/s, joten 10 000 t/a lietettä vastaa noin 0,361 kg/s. Hiekkaa lisätään lietteen sekaan 1,46 kertaisesti lietteen massavirtaan nähden eli tässä tapauksessa noin 0,527 kg/s. Prosessiin syötettävän lietteen lämpötilaksi asetetaan 28 °C. Lietteiden koostumus saadaan määriteltä taulukon 6 mukaisesti polttoaineen tulon jälkeen polttoainevirtaan. Kuten aikaisemmin on todettu, määritetään lietteiden kosteudeksi 75 % (25 % kuiva-ainepitoisuus, TS) ja lietteiden kuiva-aineen tuhkapitoisuudeksi 30 %. Lietteeseen sekoitettava hiekka määritellään tuhkaksi ja sen lämpötilaksi reaktorin lämpötila eli 855 °C. Sekä kuiva liete-hiekkaseos että höyrystynyt vesi poistuvat kuivurista 110 °C lämpötilassa, joka on kuivurin lämpötila. Kuivurista lähtevän höyryn paineen oletetaan olevan ilmanpaineessa eli 1,013 bar. Liete-hiekkaseoksen kuiva-ainepitoisuuden oletetaan olevan 99 % (kosteusprosentti 1 %) eli lietteiden kuiva-ainepitoisuus on tällöin noin 95 % TS.

Polttoaineille annetaan IPSEpro:ssa aina ominaislämpökapasiteetti  $c_p$ , tämän työn malliin ominaislämpökapasiteetti annetaan polttoaineen kuiva-aineelle. Polttoaineiden ominaislämpökapasiteetin laskentaa muutettiin MDK:ssa siten, että IPSEpro ottaa huomioon polttoaineen sisältämän veden ominaislämpökapasiteetin automaattisesti. Vedelle on käytetty ominaislämpökapasiteettina 4,2 kJ/kgK, lietteiden kuiva-aineelle 0,9 kJ/kgK ja hiekalle 0,92 kJ/kgK (Zhenshan 2016, 3). Liete-hiekkaseoksen kuiva-aineen ominaislämpökapasiteettina käytetään hiekan ominaislämpökapasiteettia, koska hiekan osuus koko seoksen kuiva-ai-

neesta on lietteen kuiva-aineeseen verrattuna huomattavasti suurempi. Myös reaktorin polttokammio-komponenttiin on asetettava polttoaineen sisältämän tuhkan ominaislämpökapasiteetti. Koska hiekka on määritelty IPSEpro:lle tuhkakksi ja sitä on liete-hiekkaseoksessa huomattavasti enemmän kuin varsinaista lietteen sisältämää tuhkaa, käytetään polttokammioilla tuhkan ominaislämpökapasiteettina hiekan ominaislämpökapasiteettia  $0,92 \text{ kJ/kgK}$ .

Komponenteille, joissa virtaa kaasumaista ja/tai nestemäistä ainetta annetaan painehäviöt  $\Delta p$  komponentin yli. Kaasumaisille virtauksille annetaan painehäviöksi  $0,01 \text{ bar}$  ja nestemäisille virtauksille (jähdytysvesi)  $0,1 \text{ bar}$ . Lauhduttimessa lauhtuvalle höyrylle asetetaan painehäviöksi  $0 \text{ bar}$ . Reaktorista lähtevän savukaasun lämpötila  $T_{sk1}$  annetaan myös alkuarvona, savukaasun oletetaan lähtevän reaktorista reaktorin lämpötilassa  $855 \text{ }^\circ\text{C}$ . Reaktorin lämpötilaksi on Endev-teknologian esittelyssä luvussa 6 ilmoitettu  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ , mutta todellisuudessa lämpötila on hivenen tätä suurempi, jotta jätteenpoltolle asetetut vaatimukset täytetään. Prosessiin syötettävä palamisilman oletetaan olevan ympäristön lämpötilassa ja paineessa ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1,013 \text{ bar}$ ) ja ilman suhteellisenä kosteutena  $\phi$  (engl. phi) käytetään IPSEpro:n oletusarvoa  $60 \%$ . Ilman koostumuksena käytetään IPSEpro:n oletuskoostumusta ympäristön olosuhteista tulevalle ilmalle, jossa kuiva ilma sisältää typen ja hapen lisäksi vähäisen määrän argonia. Jähdytysveden oletetaan olevan kaukolämpövedettä ja se on määritelty tulevan prosessiin  $55 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilassa ja  $11 \text{ bar}$  paineessa. Jähdytysvesi määritellään koostumukseltaan pelkäksi vedeksi. Palamisilman ja jähdytysveden massavirtoja ei anneta alkuarvoina vaan ne ovat ohjelman määriteltävänä. Reaktorin polttokammio-komponentille määritetään ilmakertoimeksi  $\lambda$  (engl. lambda)  $1,32$ .

Lopuksi määritellään vielä prosessin ulosmenojen alkuarvot. Jähdytysveden ulostuloksi asetetaan  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  ja  $17 \text{ bar}$ . Savukaasun oletetaan poistuvan kuivurin jälkeen prosessista  $135 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilassa, savukaasun loppulämpötilan täytyy olla riittävän suuri, jotta kuivuri saadaan pidettyä  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilassa ja liete kuivuu kunnolla. Savukaasun oletetaan poistuvan prosessista  $1,013 \text{ bar}$  paineessa. Lauhduttimen alijäähtymiseksi asetetaan  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  eli kuivurissa höyrystynyt vesi lauhtuu lauhduttimessa nesteeksi ja jäähtyy noin  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ :een, joka on lauhteen ulosmenolämpötila. Myös palamisilman kompressorille ja jähdytysjärjestelmän pumpulle on määritettävä hyötysuhteet, ensimmäiselle mekaaninen  $\eta_{m1}$  ja isentroppinen hyötysuhde  $\eta_{s1}$  ja toiselle pumpun hyötysuhde  $\eta_{m2}$  ja mekaaninen hyötysuhde. Mallissa



ei kuitenkaan tarkastella kyseisten komponenttien tehontarvetta, joten asetetuilla hyötysuhteilla ei ole lopputuloksen kanssa merkitystä. Hyötysuhteina käytetään IPSEpro:n oletushyötysuhteita kyseisille komponenteille. Taulukossa 7 on esitettyä koko prosessiin annettavat alkuarvot komponenteittain.

**Taulukko 7.** IPSEpro-mallin alkuarvot.

ALKUARVOT					
Taseraja	m_liete	0,361 kg/s	Lauhdutin	delta_T_sub	30 C
	T_liete	28 C		delta_p_hot	0 bar
				delta_p_cold	0,1 bar
	m_hiekka	0,527 kg/s	Reaktori	delta_p_air	0,01 bar
	T_hiekka	855 C		lambda	1,32
	T_jv,sisään	55 C		cp_ash	0,92 kJ/kgK
	p_jv,sisään	11 bar		T_sk1	855 C
	T_jv3	90 C	Palamisilman esilämmitin	delta_p_hot	0,01 bar
	p_jv3	17 bar		delta_p_cold	0,01 bar
	T_sk3	135 C			
	p_sk3	1,013 bar	Reaktorin lämmönvaihdin	delta_p_hot	0,01 bar
	T_i,sisään	20 C		delta_p_cold	0,1 bar
	p_i,sisään	1,013 bar	Pumppu, jv	eta_p	70 %
	phi_i,sisään	60 %		eta_m	90 %
Kuivuri	delta_p_hot	0,01 bar	Kompressorit, i	eta_m	97 %
	fuel_exit_T	110 C		eta_s	85 %
	moisture_exit_T	110 C			
	dry_fuel_moisture	1 %			

Malliin on mahdollista laittaa myös ennalta määrätyn liete-hiekkaseoksen loppukosteuden sijaan myös savukaasun lämpötila ennen kuivuria  $T_{sk2}$ . Tällöin voidaan tarkastella, mikä on liete-hiekkaseoksen loppukosteus, jos savukaasun sisääntulolämpötila kuivuriin on jokin tietty lämpötila. On myös hyvä huomata, että palamisilman lämpötila esilämmittimeen  $T_{i1}$  on hieman suurempi kuin palamisilman tulolämpötila prosessiin  $T_{i,sisään}$  sillä palamisilman painetta nostetaan kompressorilla ennen esilämmitintä ja kompressorin tekemä työ nostaa myös palamisilman lämpötilaa hieman. Sama pätee myös jäähdytysvedelle, jäähdytysveden tulolämpötila lauhduttimeen  $T_{jv1}$  on hieman suurempi kuin jäähdytysveden sisääntulolämpötila prosessiin  $T_{jv,sisään}$ .

Taulukossa 7 olevilla alkuarvoilla malli saadaan ratkaistua perustapauksessa eli 10 000 t/a lietettä (25 % TS). Kun malli skaalataan perustapauksesta suurempaan kokoluokkaan (20

000 ja 30 000 t/a), ainoastaan prosessiin syötettävän lietteen ja hiekan massavirrat on muutettava skaalaustarkastelua varten. 20 000 t/a lietettä vastaa noin 0,722 kg/s ja 30 000 t/a lietettä vastaa noin 1,083 kg/s. Hiekkaa syötetään aina 1,46 kertaisesti lietteen massavirtaan nähden, joten hiekan massavirrat ovat vastaavasti noin 1,054 kg/s (20 000 t/a) ja 1,581 kg/s (30 000 t/a). Mallista saatavia mielenkiintoisia tuloksia ovat prosessiarvojen lisäksi myös lämmönsiirron suuruus eri komponenteilla. Reaktorin lämmönvaihtimelta ja lauhduttimesta saadaan lämpövirtaa jäähdytysveteen (kaukolämpövedeen), jotka ovat prosessista ulos saatavaa tuotettua energiaa. Lisäksi reaktorin ja lauhduttimen lämpövirtoja voidaan käyttää kyseisten komponenttien mitoituksen lähtöarvoina. Näiden lisäksi mallista saadaan myös lämpövirrat palamisilman esilämmittimessä ja kuivurissa, nämä ovat mielenkiintoisia tietoja niinkään kuivurin lämpöpinnan ja palamisilman esilämmittimen mitoituksien kannalta. IPSEpro:ssa lämpövirtaa komponentin lämmönsiirtopinnan yli kuvataan  $q_{trans}$  termillä, jolla tarkoitetaan käytännössä luvussa 7.2 esitettyjä  $\Phi_k$ ,  $\Phi_r$ ,  $\Phi_l$  ja  $\Phi_{pe}$  -symboleja. Taulukossa 8 on esitettyä perustapauksen eli 10 000 t/a lietettä (25 % TS) saadut prosessiarvot ja lämpövirtojen suuruudet. Taulukossa 9 on simuloitujen prosessiarvot 20 000 t/a lietettä (25 % TS) tapauksessa ja taulukossa 10 on simuloitujen prosessiarvot 30 000 t/a lietettä (25 % TS) tapauksessa. Työn lopusta liitteestä II löytyy myös prosessiarvot suoraan IPSEpro-mallissa jokaisessa kolmessa kokoluokassa.

**Taulukko 8.** Endev-teknologia 10 000 t/a (25 % TS).

TULOKSET: 10 000 t/a (25 % TS), 30% tuhka (ka)						
Polttoaine	m_liete	0,361 kg/s	Savukaasu	m_sk1 = m_sk2 = m_sk3	0,7325 kg/s	
	h_liete	94,5 kJ/kg		h_sk1	998,89 kJ/kg	
	T_liete	28 C		T_sk1	855 C	
				p_sk1	1,033 bar	
	m_hiekka	0,527 kg/s				
	h_hiekka	786,6 kJ/kg		h_sk2	594,29 kJ/kg	
	T_hiekka	855 C		T_sk2	529,92 C	
				p_sk2	1,023 bar	
	m_pa1	0,888 kg/s		h_sk3	143,94 kJ/kg	
	h_pa1	505,2 kJ/kg		T_sk3	135 C	
				p_sk3	1,013 bar	
	m_pa2	0,6235 kg/s				
	h_pa2	104,8 kJ/kg				
	T_pa2	110 C	Palamisilma	m_i,sisään = m_i1 = m_i2	0,6631 kg/s	
Höyry	m_h1 = m_h2	0,2645 kg/s		h_i,sisään	20,246 kJ/kg	
	h_h1	2696,2 kJ/kg		T_i,sisään	20 C	
	T_h1	110 C		p_i,sisään	1,013 bar	
	p_h1 = p_h2	1,013 bar				
				h_i1	25,072 kJ/kg	
				T_i1	24,766 C	
	h_h2	292,94 kJ/kg		p_i1	1,063 bar	
	T_h2	69,967 C				
				h_i2	472,02 kJ/kg	
Jäähdytysvesi	m_jv,sisään = m_jv1 = m_jv2 = m_jv3	7,563 kg/s		T_i2	452,88 C	
	h_jv,sisään	231,16 kJ/kg		p_i2	1,053 bar	
	T_jv,sisään	55 C				
	p_jv,sisään	11 bar				
			KUIVURI	Ø_k	329,87 kW	
	h_jv1	232,07 kJ/kg	PALAMISILMAN ESILÄMMITIN	Ø_pe	296,36 kW	
	T_jv1	55,095 C				
	p_jv1	17,2 bar	REAKTORI	Ø_r	469,68 kW	
			LAUHDUTIN	Ø_l	635,69 kW	
h_jv2	316,12 kJ/kg					
T_jv2	75,189 C	Laitoksen lämpöteho (reaktori + lauhdutin)		1105,37 kW		
p_jv2	17,1 bar					
h_jv3	378,23 kJ/kg	Lietteen sisältämä tuhka ulos prosessista m_tuhka		0,0271 kg/s		
T_jv3	90 C			97,47 kg/h		
p_jv3	17 bar					

**Taulukko 9.** Endev-teknologia 20 000 t/a (25 % TS).

TULOKSET: 20 000 t/a (25 % TS), 30% tuhka (ka)						
Polttoaine	m_liete	0,722 kg/s	Savukaasu	m_sk1 = m_sk2 = m_sk3	1,465 kg/s	
	h_liete	94,5 kJ/kg		h_sk1	998,89 kJ/kg	
	T_liete	28 C		T_sk1	855 C	
				p_sk1	1,033 bar	
	m_hiekka	1,054 kg/s				
	h_hiekka	786,6 kJ/kg		h_sk2	594,29 kJ/kg	
	T_hiekka	855 C		T_sk2	529,92 C	
				p_sk2	1,023 bar	
	m_pa1	1,776 kg/s		h_sk3	143,94 kJ/kg	
	h_pa1	505,2 kJ/kg		T_sk3	135 C	
				p_sk3	1,013 bar	
	m_pa2	1,247 kg/s				
	h_pa2	104,8 kJ/kg				
	T_pa2	110 C	Palamisilma	m_i,sisään = m_i1 = m_i2	1,326 kg/s	
Höyry	m_h1 = m_h2	0,529 kg/s		h_i,sisään	20,246 kJ/kg	
	h_h1	2696,2 kJ/kg		T_i,sisään	20 C	
	T_h1	110 C		p_i,sisään	1,013 bar	
	p_h1 = p_h2	1,013 bar				
				h_i1	25,072 kJ/kg	
				T_i1	24,766 C	
	h_h2	292,94 kJ/kg		p_i1	1,063 bar	
	T_h2	69,967 C				
				h_i2	472,02 kJ/kg	
Jäähdytysvesi	m_jv,sisään = m_jv1 = m_jv2 = m_jv3	15,13 kg/s		T_i2	452,88 C	
	h_jv,sisään	231,16 kJ/kg		p_i2	1,053 bar	
	T_jv,sisään	55 C				
	p_jv,sisään	11 bar				
			KUIVURI	Ø_k	659,74 kW	
	h_jv1	232,07 kJ/kg	PALAMISILMAN ESILÄMMITIN	Ø_pe	592,72 kW	
	T_jv1	55,095 C				
	p_jv1	17,2 bar	REAKTORI	Ø_r	939,35 kW	
			LAUHDUTIN	Ø_l	1271,38 kW	
h_jv2	316,12 kJ/kg					
T_jv2	75,189 C	Laitoksen lämpöteho (reaktori + lauhdutin)		2210,73 kW		
p_jv2	17,1 bar					
h_jv3	378,23 kJ/kg	Lietteen sisältämä tuhka ulos prosessista m_tuhka		0,0542 kg/s		
T_jv3	90 C			194,94 kg/h		
p_jv3	17 bar					

**Taulukko 10.** Endev-teknologia 30 000 t/a (25 % TS).

TULOKSET: 30 000 t/a (25 % TS), 30% tuhka (ka)							
Polttoaine	m_liete	1,083 kg/s	Savukaasu	m_sk1 = m_sk2 = m_sk3	2,197 kg/s		
	h_liete	94,5 kJ/kg		h_sk1	998,89 kJ/kg		
	T_liete	28 C		T_sk1	855 C		
				p_sk1	1,033 bar		
	m_hiekka	1,581 kg/s					
	h_hiekka	786,6 kJ/kg		h_sk2	594,29 kJ/kg		
	T_hiekka	855 C		T_sk2	529,92 C		
				p_sk2	1,023 bar		
	m_pa1	2,664 kg/s		h_sk3	143,94 kJ/kg		
	h_pa1	505,2 kJ/kg		T_sk3	135 C		
				p_sk3	1,013 bar		
	m_pa2	1,87 kg/s					
	h_pa2	104,8 kJ/kg					
	T_pa2	110 C	Palamisilma	m_i,sisään = m_i1 = m_i2	1,989 kg/s		
Höyry	m_h1 = m_h2	0,7935 kg/s		h_i,sisään	20,246 kJ/kg		
	h_h1	2696,2 kJ/kg		T_i,sisään	20 C		
	T_h1	110 C		p_i,sisään	1,013 bar		
	p_h1 = p_h2	1,013 bar					
				h_i1	25,072 kJ/kg		
				T_i1	24,766 C		
		h_h2	292,94 kJ/kg		p_i1	1,063 bar	
		T_h2	69,967 C				
					h_i2	472,02 kJ/kg	
Jäähdytysvesi	m_jv,sisään = m_jv1 = m_jv2 = m_jv3	22,69 kg/s		T_i2	452,88 C		
	h_jv,sisään	231,16 kJ/kg		p_i2	1,053 bar		
	T_jv,sisään	55 C					
	p_jv,sisään	11 bar					
			KUIVURI	Ø_k	989,61 kW		
	h_jv1	232,07 kJ/kg	PALAMISILMAN ESILÄMMITIN	Ø_pe	889,08 kW		
	T_jv1	55,095 C					
	p_jv1	17,2 bar	REAKTORI	Ø_r	1409,03 kW		
			LAUHDUTIN	Ø_l	1907,07 kW		
	h_jv2	316,12 kJ/kg	Laitoksen lämpöteho (reaktori + lauhdutin)	3316,10 kW			
	T_jv2	75,189 C					
	p_jv2	17,1 bar					
	h_jv3	378,23 kJ/kg	Lietteen sisältämä tuhka ulos prosessista m_tuhka	0,0812 kg/s			
	T_jv3	90 C		292,41 kg/h			
	p_jv3	17 bar					

## 7.4 Herkkyystarkastelu

Herkkyystarkasteluun valitut muuttujat ovat prosessiin syötettävän lietteen kuiva-ainepitoisuus ja tuhkapitoisuus sekä lietteen orgaanisen aineksen koostumus. Herkkyystarkastelussa pyritään selvittämään valittujen muuttujien vaikutusta koko prosessin taseeseen, kun muuttujien arvoja muutetaan. Lietteiden koostumus on hyvin tapauskohtainen ja erilaisilla puhdistamolietteillä voidaan saavuttaa hyvinkin erilaisia tuloksia samasta prosessista. Myöskään prosessiin syötettävän puhdistamolietteen kuiva-ainepitoisuus ei välttämättä pysy vakiona, jos esimerkiksi lietteen mekaanisessa kuivauksessa tapahtuu häiriöitä. Valittujen muuttujien vaikutusta Endev-tekniikan prosessiin pystytään mallintamaan helposti muuttamalla IP-SEpro-malliin syötettävän polttoaineen koostumusta.

### 7.4.1 Lietteiden kuiva-ainepitoisuus

Lietteiden kuiva-ainepitoisuuden vaikutusta koko prosessin taseisiin mallinnetaan välillä 15–35 % TS. Perustapauksessa lietteiden kuiva-ainepitoisuus on 25 %, joten tähän tarkasteluun on valittu tästä jonkin verran pienempi ja jonkin verran suurempi kuiva-ainepitoisuus. Lietteiden orgaanisen aineksen koostumus ja kuiva-aineen tuhkapitoisuus pidetään samana kuin perustapauksessa eli orgaanisen aineksen koostumus on taulukon 6 mukainen ja tuhkapitoisuus on 30 % kuiva-aineessa.

Tarkastelussa kuiva-ainepitoisuus valitaan 5 prosentin välein eli 15 %, 20 %, 30 % ja 35 % TS. Kuiva-aineen herkkyystarkastelussa käytetään pääsääntöisesti samoja alkuarvoja kuin perustapauksen laskennassa, alkuarvot ovat nähtävissä taulukossa 7. Muutamia perustapauksen alkuarvoihin tehdään kuitenkin muutoksia herkkyystarkastelussa. Perustapauksessa määritettiin kuivurille loppukosteus, johon liete-hiekkaseos kuivataan ( $\text{dry\_fuel\_moisture} = 0,01 = 1 \%$ ). Kun tarkastellaan perustapauksista kostempaa polttoainetta (15 ja 20 % TS), ei voida olettaa, että liete-hiekkaseos pystytään kuivaamaan samaan kosteuspitoisuuteen asti kuin perustapauksessa. Sen sijaan voidaan olettaa, että kuivuriin tulevan savukaasun lämpötila on sama kuin perustapauksessa  $T_{sk2} \approx 530 \text{ °C}$  eli  $T_{sk2}$  annetaan alkuarvona. Tällöin liete-hiekkaseoksen loppukosteus  $\text{dry\_fuel\_moisture}$  jää ohjelman laskettavaksi 15 ja 20 % TS tapauksissa.

Kun tarkastellaan perustapausta kuivempaa polttoainetta (30 ja 35 % TS), voidaan taas olettaa liete-hiekkaseoksen loppukosteuden olevan perustapausta pienempi eli käytännössä hyvin lähellä 0 %. Savukaasun lämpötilan ennen kuivuria oletetaan olevan myös tässä tapauksessa  $T_{sk2} \approx 530$  °C, mutta polttoaineen loppukosteudeksi asetetaan alkuarvona 0 %. Polttoaine sisältää tässä tapauksessa vähemmän kosteutta kuin perustapauksessa, joten veden haihduttamiseen kuluu vähemmän energiaa. Savukaasun on kuitenkin jäädyttävä kuivurin yli samaan loppulämpötilaan kuin perustapauksessa eli  $T_{sk3} = 135$  °C. Jotta kuivurin lämpötila ei nouse liian suureksi ja savukaasu saadaan jäädytettyä riittävän alhaiseksi, muutetaan kuivuriin syötettävän hiekan määrää. Eli 30 ja 35 % TS tapauksissa alkuarvoiksi annetaan savukaasun lämpötila ennen kuivuria ja polttoaineen loppukosteus, mutta kuivuriin syötettävän hiekan massavirtaa ei anneta alkuarvona. Tällöin ohjelma laskee kuivuriin syötettävän hiekan määrän. Todellisessa prosessissa kuivurin lämpötilaa voidaan säätää kierrätettävän hiekan määrää muuttamalla, reaktori toimii ikään kuin varastona kuumalle hiekalle.

Alkuarvoista muutetaan myös prosessiin syötettävän ilman määrää. Perustapauksessa prosessiin syötettävän ilman massavirta lasketaan suoraan polttokammion ilmakertoimen perusteella ( $\lambda = 1,32$ ). Kun prosessiin syötetään kosteampaa polttoainetta (15 ja 20 % TS), ilman massavirran oletetaan olevan sama kuin perustapauksessa laskettu ilman massavirta. Näissä tapauksissa ilmakerroin kasvaa, koska prosessiin syötetään enemmän ilmaa pienenyneeseen kuiva-ainekseen nähden. Tällöin polttokammiolle ei anneta alkuarvona ilmakerrointa, vaan prosessiin syötettävän ilman massavirta annetaan alkuarvona  $m_{i, sisään} = 0,6631$  kg/s. Kun prosessiin syötetään perustapausta kuivempaa polttoainetta (30 ja 35 % TS), niin tällöin ilmakerroin annetaan alkuarvona polttokammiolle. Näissä tapauksissa ilman massavirta prosessiin kasvaa, koska lietteen kuiva-aineksen osuus kasvaa. Näissä tapauksissa ilmakertoimeksi annetaan sama kuin perustapauksessa eli  $\lambda = 1,32$ . Näin voidaan ajatella, että  $\lambda = 1,32$  on minimi-ilmakerroin, jota palamisprosessin hallintaan käytetään. Jos prosessiin tulee perustapausta kosteampaa polttoainetta, niin perustapauksen ilman massavirta pidetään edelleen vakiona ja tällöin ilmakerroin kasvaa.

Kun alkuarvot ovat selvillä jokaiselle lietteen kuiva-aineen herkkyytarkastelussa olevalle tapaukselle, voidaan ne asettaa IPSEpro-malliin ja simuloida prosessi erikseen jokaiselle eri tapaukselle. Taulukoissa 11 ja 12 on esitettyä simuloidut prosessiarvot 15 % ja 20 % kuiva-

ainepitoisuuksille. Taulukoissa 13 ja 14 on esitettyä simuloidut prosessi-arvot 30 % ja 35 % kuiva-ainepitoisuuksille. Näiden lisäksi kuvassa 29 on esitettyä kuvaajat prosessista saatava kokonaislämpötehosta, reaktorista saatava lämpötehosta ja lauhduttimesta saatava lämpötehosta eri tapauksissa.

**Taulukko 11.** Herkkyystarkastelu 15 % TS.

TULOKSET: 10 000 t/a (15 % TS), 30 % tuhka (ka)						
Polttoaine	m_liete	0,361 kg/s		Savukaasu	m_sk1 = m_sk2 = m_sk3	0,7431 kg/s
	h_liete	103,7 kJ/kg			h_sk1	2014,6 kJ/kg
	T_liete	28 C			T_sk1	855 C
					p_sk1	1,033 bar
	m_hiekka	0,527 kg/s				
	h_hiekka	786,6 kJ/kg			h_sk2	604,66 kJ/kg
	T_hiekka	855 C			T_sk2	530 C
					p_sk2	1,023 bar
	m_pa1	0,888 kg/s				
	h_pa1	509 kJ/kg			h_sk3	147,18 kJ/kg
					T_sk3	135 C
	m_pa2	0,6233 kg/s			p_sk3	1,013 bar
	h_pa2	125,6 kJ/kg				
	T_pa2	110 C		Palamisilma	m_i,sisään = m_i1 = m_i2	0,6631 kg/s
					h_i,sisään	20,246 kJ/kg
Höyry	m_h1 = m_h2	0,2647 kg/s			T_i,sisään	20 C
	h_h1	2696,2 kJ/kg			p_i,sisään	1,013 bar
	T_h1	110 C				
	p_h1 = p_h2	1,013 bar			h_i1	25,072 kJ/kg
					T_i1	24,765 C
	h_h2	292,94 kJ/kg			p_i1	1,063 bar
	T_h2	69,967 C				
					h_i2	484,47 kJ/kg
Jäähdytysvesi	m_jv,sisään = m_jv1 = m_jv2 = m_jv3	4,48 kg/s			T_i2	464,28 C
	h_jv,sisään	231,16 kJ/kg			p_i2	1,053 bar
	T_jv,sisään	55 C				
	p_jv,sisään	11 bar				
				KUIVURI	Ø_k	339,97 kW
h_jv1	232,07 kJ/kg			PALAMISILMAN ESILÄMMITIN	Ø_pe	304,62 kW
T_jv1	55,096 C					
p_jv1	17,2 bar			REAKTORI	Ø_r	18,66 kW
				LAUHDUTIN	Ø_l	636,13 kW
	h_jv2	374,06 kJ/kg				
	T_jv2	89,004 C			Laitoksen lämpöteho (reaktori + lauhdutin)	654,79 kW
	p_jv2	17,1 bar				
	h_jv3	378,23 kJ/kg			Lietteen sisältämä tuhka ulos prosessista m_tuhka	0,0162 kg/s
	T_jv3	90 C				58,482 kg/h
	p_jv3	17 bar				



**Taulukko 12.** Herkkyystarkastelu 20 % TS.

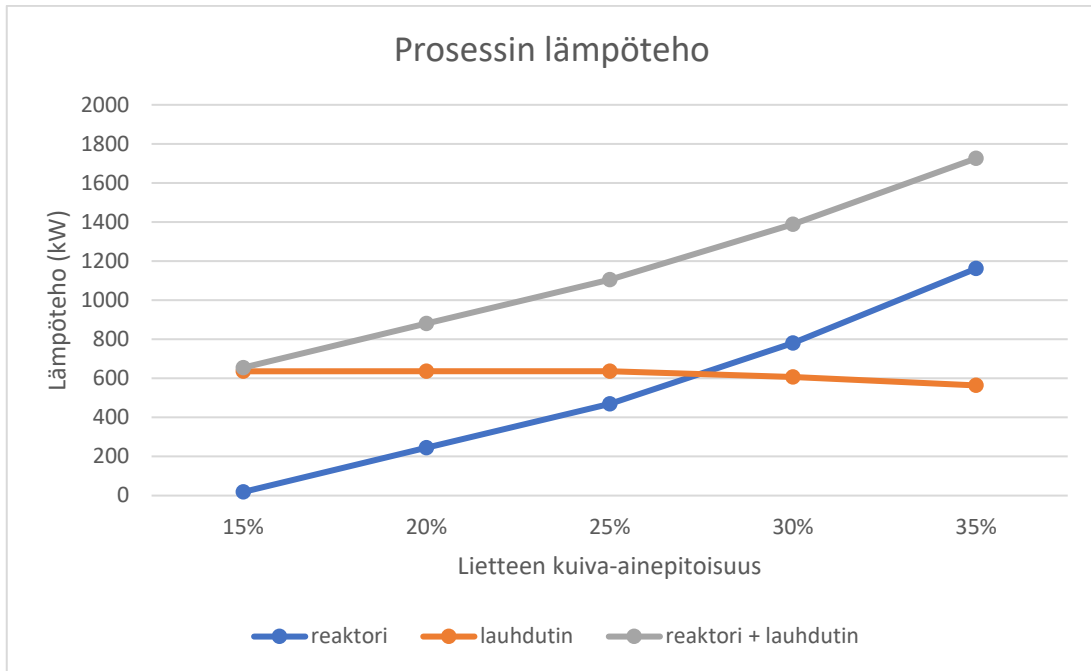
		TULOKSET: 10 000 t/a (20 % TS), 30 % tuhka (ka)						
Polttoaine	m_liete	0,361	kg/s	Savukaasu	m_sk1 = m_sk2 = m_sk3	0,7378	kg/s	
	h_liete	99,12	kJ/kg		h_sk1	1006,8	kJ/kg	
	T_liete	28	C		T_sk1	855	C	
					p_sk1	1,033	bar	
	m_hiekka	0,527	kg/s					
	h_hiekka	786,6	kJ/kg		h_sk2	599,55	kJ/kg	
	T_hiekka	855	C		T_sk2	530	C	
					p_sk2	1,023	bar	
	m_pa1	0,888	kg/s					
	h_pa1	507,1	kJ/kg		h_sk3	145,57	kJ/kg	
					T_sk3	135	C	
					p_sk3	1,013	bar	
			Palamisilma	m_i,sisään = m_i1 = m_i2	0,6631	kg/s		
				h_i,sisään	20,246	kJ/kg		
				T_i,sisään	20	C		
				p_i,sisään	1,013	bar		
Höyry	m_h1 = m_h2	0,2646		kg/s	h_i1	25,072	kJ/kg	
	h_h1	2696,2		kJ/kg	T_i1	24,765	C	
	T_h1	110		C	p_i1	1,063	bar	
	p_h1 = p_h2	1,013		bar				
					h_i2	478,18	kJ/kg	
	h_h2	292,94		kJ/kg	T_i2	458,52	C	
	T_h2	69,967		C	p_i2	1,053	bar	
	Jäähdytysvesi	m_jv,sisään = m_jv1 = m_jv2 = m_jv3	6,027	kg/s	KUIVURI	Ø_k	334,95	kW
		h_jv,sisään	231,16	kJ/kg	PALAMISILMAN ESILÄMMITIN	Ø_pe	300,46	kW
		T_jv,sisään	55	C				
		p_jv,sisään	11	bar	REAKTORI	Ø_r	244,90	kW
				LAUHUTIN	Ø_l	635,94	kW	
h_jv1		232,07	kJ/kg					
T_jv1		55,096	C	Laitoksen lämpöteho (reaktori + lauhdutin)		880,85	kW	
p_jv1		17,2	bar					
h_jv2		337,59	kJ/kg					
T_jv2		80,312	C					
p_jv2		17,1	bar					
h_jv3		378,23	kJ/kg	Lietteen sisältämä tuhka ulos prosessista m_tuhka		0,0217	kg/s	
T_jv3	90	C			77,976	kg/h		
p_jv3	17	bar						

**Taulukko 13.** Herkkyystarkastelu 30 % TS.

		TULOKSET: 10 000 t/a (30 % TS), 30 % tuhka (ka)						
Polttoaine	m_liete	0,361	kg/s	Savukaasu	m_sk1 = m_sk2 = m_sk3	0,8715	kg/s	
	h_liete	89,88	kJ/kg		h_sk1	992,11	kJ/kg	
	T_liete	28	C		T_sk1	855	C	
					p_sk1	1,033	bar	
	m_hiekka	0,3938	kg/s					
	h_hiekka	786,6	kJ/kg		h_sk2	590,45	kJ/kg	
	T_hiekka	855	C		T_sk2	530	C	
					p_sk2	1,023	bar	
	m_pa1	0,7548	kg/s					
	h_pa1	453,4	kJ/kg		h_sk3	143	kJ/kg	
					T_sk3	135	C	
					p_sk3	1,013	bar	
				Palamisilma	m_i,sisään = m_i1 = m_i2	0,7957	kg/s	
					h_i,sisään	20,246	kJ/kg	
					T_i,sisään	20	C	
Höyry	m_h1 = m_h2	0,2527	kg/s		p_i,sisään	1,013	bar	
	h_h1	2696,2	kJ/kg					
	T_h1	110	C		h_i1	25,072	kJ/kg	
	p_h1 = p_h2	1,013	bar		T_i1	24,765	C	
					p_i1	1,063	bar	
	h_h2	292,94	kJ/kg					
	T_h2	69,967	C		h_i2	464,99	kJ/kg	
					T_i2	446,42	C	
	Jäähdytysvesi	m_jv,sisään = m_jv1 = m_jv2 = m_jv3	9,498	kg/s		p_i2	1,053	bar
		h_jv,sisään	231,16	kJ/kg				
		T_jv,sisään	55	C				
		p_jv,sisään	11	bar				
				KUIVURI	Ø_k	389,95	kW	
h_jv1		232,07	kJ/kg	PALAMISILMAN ESILÄMMITIN	Ø_pe	350,04	kW	
T_jv1		55,096	C					
p_jv1		17,2	bar	REAKTORI	Ø_r	780,88	kW	
				LAUHUTIN	Ø_l	607,30	kW	
h_jv2		296,01	kJ/kg					
T_jv2		70,386	C	Laitoksen lämpöteho (reaktori + lauhdutin)		1388,17	kW	
p_jv2		17,1	bar					
h_jv3	378,23	kJ/kg	Lietteen sisältämä tuhka ulos prosessista m_tuhka		0,0325	kg/s		
T_jv3	90	C			116,964	kg/h		
p_jv3	17	bar						

**Taulukko 14.** Herkkyystarkastelu 35 % TS.

		TULOKSET: 10 000 t/a (35 % TS), 30 % tuhka (ka)					
Polttoaine	m_liete	0,361	kg/s	Savukaasu	m_sk1 = m_sk2 = m_sk3	1,017	kg/s
	h_liete	85,26	kJ/kg		h_sk1	992,11	kJ/kg
	T_liete	28	C		T_sk1	855	C
					p_sk1	1,033	bar
	m_hiekka	0,233	kg/s				
	h_hiekka	786,6	kJ/kg		h_sk2	590,45	kJ/kg
	T_hiekka	855	C		T_sk2	530	C
					p_sk2	1,023	bar
	m_pa1	0,594	kg/s				
	h_pa1	360,4	kJ/kg		h_sk3	143	kJ/kg
			T_sk3	135	C		
			p_sk3	1,013	bar		
			Palamisilma	m_i,sisään = m_i1 = m_i2	0,9283	kg/s	
				h_i,sisään	20,246	kJ/kg	
				T_i,sisään	20	C	
				p_i,sisään	1,013	bar	
Höyry	m_h1 = m_h2	0,2347		kg/s	h_i1	25,072	kJ/kg
	h_h1	2696,2		kJ/kg	T_i1	24,765	C
	T_h1	110		C	p_i1	1,063	bar
	p_h1 = p_h2	1,013		bar			
	h_h2	292,94		kJ/kg	h_i2	464,98	kJ/kg
	T_h2	69,967		C	T_i2	446,41	C
				p_i2	1,053	bar	
Jäähdytysvesi	m_jv,sisään = m_jv1 = m_jv2 = m_jv3	11,81	kg/s	KUIVURI	Ø_k	454,93	kW
	h_jv,sisään	231,16	kJ/kg	PALAMISILMAN ESILÄMMITIN	Ø_pe	408,38	kW
	T_jv,sisään	55	C				
	p_jv,sisään	11	bar	REAKTORI	Ø_r	1161,79	kW
				LAUHDUTIN	Ø_l	563,92	kW
	h_jv1	232,07	kJ/kg	Laitoksen lämpöteho (reaktori + lauhdutin)		1725,71	kW
	T_jv1	55,096	C				
	p_jv1	17,2	bar				
	h_jv2	279,83	kJ/kg				
	T_jv2	66,52	C				
p_jv2	17,1	bar					
h_jv3	378,23	kJ/kg	Lietteen sisältämä tuhka ulos prosessista m_tuhka		0,0379	kg/s	
T_jv3	90	C			136,458	kg/h	
p_jv3	17	bar					



**Kuva 29.** Prosessista saatava lämpöteho eri kuiva-ainepitoisuuksilla.

#### 7.4.2 Lietteen tuhkapitoisuus

Lietteen tuhkapitoisuuden vaikutusta prosessin taseisiin voidaan mallintaa samalla tavalla kuin lietteen kuiva-ainepitoisuuden vaikutusta. Tuhkapitoisuuden tarkastelussa lietteen kuiva-ainepitoisuus pidetään perustapauksen tasolla eli 25 % TS. Lietteen tuhkapitoisuudella tarkoitetaan lietteen kuiva-aineen tuhkapitoisuutta. Perustapauksessa tuhkapitoisuus on 30 % ja tähän tarkasteluun on valittu 25 %, 35 %, 40 % ja 45 % tuhkapitoisuudet.

Perustapauksen alkuarvoja muutetaan jonkin verran samalla periaatteella kuin lietteen kuiva-ainepitoisuuden tarkastelussa. Kaikkiin tapauksiin laitetaan alkuarvoksi perustapauksesta saatu savukaasun lämpötila ennen kuivuria  $T_{sk2} \approx 530$  °C. Kun tarkastellaan perustapausta pienempää tuhkapitoisuutta (25 %), liete sisältää enemmän palavaa orgaanista aineesta. Kun ilmakerroin pidetään samana kuin perustapauksessa ( $\lambda = 1,32$ ), prosessiin syötettävän ilman massavirta kasvaa lisääntyneen palavan aineksen johdosta. Lisääntynyt ilman massavirta myös lisää savukaasun massavirtaa prosessissa, tämän johdosta voidaan olettaa lietteen kuivuvan lähelle 0 % kosteuspitoisuutta. Kuivuriin asetetaan näin ollen alkuarvona liete-hiekkaseoksen loppukosteudeksi `dry_fuel_moisture` 0 %. Koska savukaasun lämpötila

ennen kuivuria ja liete-hiekkaseoksen loppukosteus annetaan alkuarvoina, annetaan ohjelman laskea tässä tapauksessa prosessiin syötettävän hiekan massavirta. Hiekan massavirta pienenee hivenen perustapauksen massavirrasta.

Kun tarkastellaan perustapausta suurempaa tuhkapitoisuutta (35 %, 40 % ja 45 %), alkuarvoina annetaan samat alkuarvot kuin tarkasteltaessa lietteen kuiva-ainepitoisuutta 15 % ja 20 % tapauksissa. Alkuarvoiksi annetaan siis tässä tapauksessa savukaasun lämpötila ennen kuivuria  $T_{sk2} \approx 530$  °C, perustapauksen hiekan massavirta ( $m_{hiekk} = 0,527$  kg/s) ja perustapauksen ilman massavirta ( $m_{i, sisään} = 0,6631$  kg/s). Myös näissä tapauksissa ilmakerrointa ei anneta alkuarvona, vaan ilman massavirta pidetään perustapauksesta lasketulla ilman massavirtana. Ilmakerroin on siis jonkin verran suurempi kuin perustapauksessa, koska palavaa ainesta menee polttokammioon vähemmän lisääntyneen tuhkapitoisuuden takia.

Kun alkuarvot ovat selvillä jokaiselle lietteen tuhkapitoisuuden herkkyytarkastelussa olevalle tapaukselle, voidaan ne asettaa IPSEpro-malliin ja simuloida prosessi erikseen jokaiselle eri tapaukselle. Taulukossa 15 on esitettyä simuloidut prosessiarvot 25 % tuhkapitoisuudelle. Taulukoissa 16, 17 ja 18 on esitettyä simuloidut prosessiarvot 35 %, 40 % ja 45 % tuhkapitoisuuksille. Näiden lisäksi kuvassa 30 on esitettyä kuvaajat prosessista saatava kokonaislämpötehosta, reaktorista saatava lämpötehosta ja lauhduttimesta saatava lämpötehosta eri tapauksissa.

**Taulukko 15.** Herkkystarkastelu 25 % tuhkapitoisuus kuiva-aineessa.

		TULOKSET: 10 000 t/a (25 % TS), 25 % tuhka (ka)					
Polttoaine	m_liete	0,361	kg/s	Savukaasu	m_sk1 = m_sk2 = m_sk3	0,7781	kg/s
	h_liete	94,5	kJ/kg		h_sk1	992,11	kJ/kg
	T_liete	28	C		T_sk1	855	C
					p_sk1	1,033	bar
	m_hiekka	0,5206	kg/s				
	h_hiekka	786,6	kJ/kg		h_sk2	590,45	kJ/kg
	T_hiekka	855	C		T_sk2	530	C
					p_sk2	1,023	bar
	m_pa1	0,8816	kg/s				
	h_pa1	503,2	kJ/kg		h_sk3	143	kJ/kg
					T_sk3	135	C
	m_pa2	0,6109	kg/s		p_sk3	1,013	bar
	h_pa2	101,2	kJ/kg				
	T_pa2	110	C	Palamisilma	m_i,sisään = m_i1 = m_i2	0,7105	kg/s
Höyry	m_h1 = m_h2	0,2707	kg/s		h_i,sisään	20,246	kJ/kg
	h_h1	2696,2	kJ/kg		T_i,sisään	20	C
	T_h1	110	C		p_i,sisään	1,013	bar
	p_h1 = p_h2	1,013	bar				
					h_i1	25,072	kJ/kg
					T_i1	24,765	C
	h_h2	292,94	kJ/kg		p_i1	1,063	bar
	T_h2	69,967	C				
					h_i2	464,99	kJ/kg
Jäähdytysvesi	m_jv,sisään = m_jv1 = m_jv2 = m_jv3	8,234	kg/s		T_i2	446,42	C
	h_jv,sisään	231,16	kJ/kg		p_i2	1,053	bar
	T_jv,sisään	55	C				
	p_jv,sisään	11	bar				
				KUIVURI	Ø_k	348,17	kW
	h_jv1	232,07	kJ/kg	PALAMISILMAN ESILÄMMITIN	Ø_pe	312,54	kW
	T_jv1	55,096	C				
	p_jv1	17,2	bar	REAKTORI	Ø_r	552,87	kW
				LAUHDUTIN	Ø_l	650,67	kW
h_jv2	311,09	kJ/kg					
T_jv2	73,987	C	Laitoksen lämpöteho (reaktori + lauhdutin)		1203,55	kW	
p_jv2	17,1	bar					
h_jv3	378,23	kJ/kg	Lietteen sisältämä tuhka ulos prosessista m_tuhka		0,0226	kg/s	
T_jv3	90	C			81,252	kg/h	
p_jv3	17	bar					

**Taulukko 16.** Herkkystarkastelu 35 % tuhkapitoisuus kuiva-aineessa.

TULOKSET: 10 000 t/a (25 % TS), 35 % tuhka (ka)					
Polttoaine	m_liete	0,361 kg/s	Savukaasu	m_sk1 = m_sk2 = m_sk3	0,729 kg/s
	h_liete	94,5 kJ/kg		h_sk1	995,99 kJ/kg
	T_liete	28 C		T_sk1	855 C
				p_sk1	1,033 bar
	m_hiekka	0,527 kg/s			
	h_hiekka	786,6 kJ/kg		h_sk2	592,91 kJ/kg
	T_hiekka	855 C		T_sk2	530 C
				p_sk2	1,023 bar
	m_pa1	0,888 kg/s		h_sk3	143,73 kJ/kg
	h_pa1	505,2 kJ/kg		T_sk3	135 C
	m_pa2	0,6246 kg/s		p_sk3	1,013 bar
	h_pa2	105,4 kJ/kg			
	T_pa2	110 C	Palamisilma	m_i,sisään = m_i1 = m_i2	0,6631 kg/s
Höyry	m_h1 = m_h2	0,2634 kg/s		h_i,sisään	20,246 kJ/kg
	h_h1	2696,2 kJ/kg		T_i,sisään	20 C
	T_h1	110 C		p_i,sisään	1,013 bar
	p_h1 = p_h2	1,013 bar			
				h_i1	25,072 kJ/kg
				T_i1	24,765 C
	h_h2	292,94 kJ/kg		p_i1	1,063 bar
	T_h2	69,967 C			
				h_i2	468,22 kJ/kg
Jäähdytysvesi	m_jv,sisään = m_jv1 = m_jv2 = m_jv3	7,024 kg/s		T_i2	449,39 C
	h_jv,sisään	231,16 kJ/kg		p_i2	1,053 bar
	T_jv,sisään	55 C			
	p_jv,sisään	11 bar			
			KUIVURI	Ø_k	327,47 kW
	h_jv1	232,07 kJ/kg	PALAMISILMAN ESILÄMMITIN	Ø_pe	293,85 kW
	T_jv1	55,096 C			
	p_jv1	17,2 bar	REAKTORI	Ø_r	393,57 kW
			LAUHDUTIN	Ø_l	633,11 kW
h_jv2	322,2 kJ/kg				
T_jv2	76,64 C	Laitoksen lämpöteho (reaktori + lauhdutin)		1026,67 kW	
p_jv2	17,1 bar				
h_jv3	378,23 kJ/kg	Lietteen sisältämä tuhka ulos prosessista m_tuhka		0,0316 kg/s	
T_jv3	90 C			113,652 kg/h	
p_jv3	17 bar				

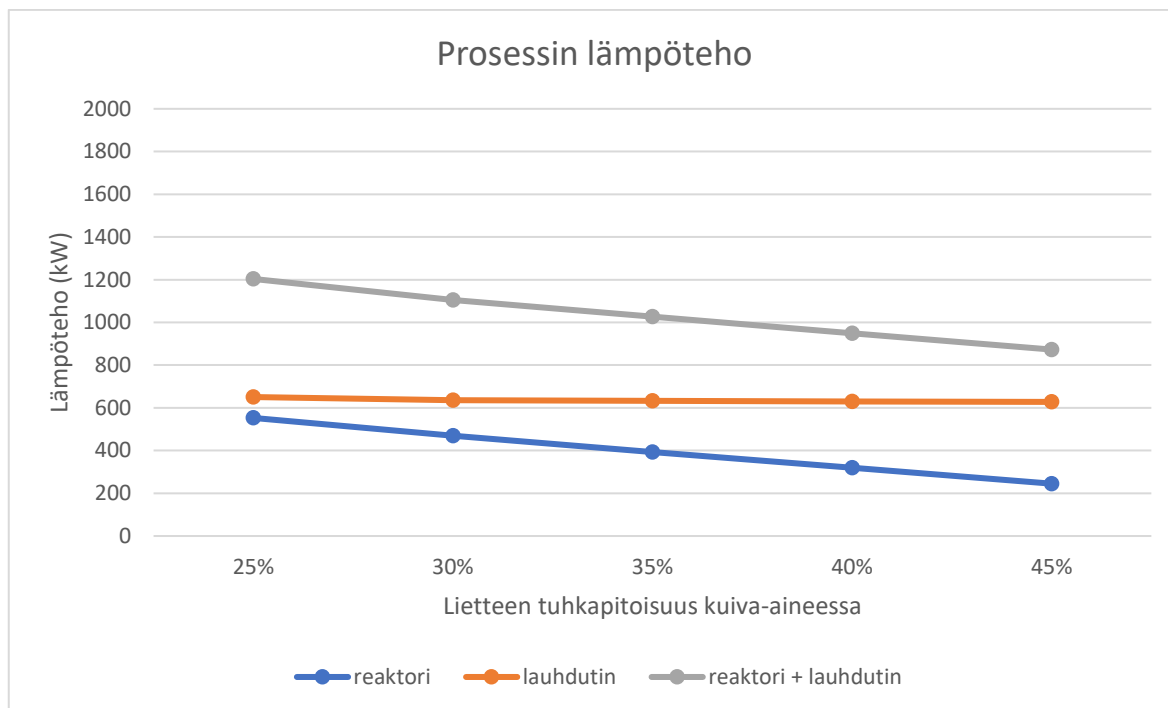
**Taulukko 17.** Herkkystarkastelu 40 % tuhkapitoisuus kuiva-aineessa.

TULOKSET: 10 000 t/a (25 % TS), 40 % tuhka (ka)							
Polttoaine	m_liete	0,361 kg/s	Savukaasu	m_sk1 = m_sk2 = m_sk3	0,7257 kg/s		
	h_liete	94,5 kJ/kg		h_sk1	993,02 kJ/kg		
	T_liete	28 C		T_sk1	855 C		
				p_sk1	1,033 bar		
	m_hiekka	0,527 kg/s					
	h_hiekka	786,6 kJ/kg		h_sk2	591,41 kJ/kg		
	T_hiekka	855 C		T_sk2	530 C		
				p_sk2	1,023 bar		
	m_pa1	0,888 kg/s					
	h_pa1	505,2 kJ/kg		h_sk3	143,51 kJ/kg		
				T_sk3	135 C		
				p_sk3	1,013 bar		
			Palamisilma	m_i,sisään = m_i1 = m_i2	0,6631 kg/s		
Höyry	m_h1 = m_h2	0,2623 kg/s		h_i,sisään	20,246 kJ/kg		
	h_h1	2696,2 kJ/kg		T_i,sisään	20 C		
	T_h1	110 C		p_i,sisään	1,013 bar		
	p_h1 = p_h2	1,013 bar					
				h_i1	25,072 kJ/kg		
				T_i1	24,765 C		
	h_h2	292,94 kJ/kg		p_i1	1,063 bar		
	T_h2	69,967 C					
				h_i2	464,57 kJ/kg		
	Jäähdytysvesi	m_jv,sisään = m_jv1 = m_jv2 = m_jv3	6,496 kg/s		T_i2	446,03 C	
		h_jv,sisään	231,16 kJ/kg		p_i2	1,053 bar	
		T_jv,sisään	55 C				
	p_jv,sisään	11 bar					
			KUIVURI	Ø_k	325,02 kW		
h_jv1	232,07 kJ/kg		PALAMISILMAN ESILÄMMITIN	Ø_pe	291,43 kW		
T_jv1	55,096 C						
p_jv1	17,2 bar		REAKTORI	Ø_r	319,01 kW		
			LAUHDUTIN	Ø_l	630,47 kW		
h_jv2	329,12 kJ/kg						
T_jv2	78,292 C		Laitoksen lämpöteho (reaktori + lauhdutin)		949,48 kW		
p_jv2	17,1 bar						
h_jv3	378,23 kJ/kg		Lietteen sisältämä tuhka ulos prosessista m_tuhka		0,0361 kg/s		
T_jv3	90 C				129,9557 kg/h		
p_jv3	17 bar						



**Taulukko 18.** Herkkystarkastelu 45 % tuhkapitoisuus kuiva-aineessa.

TULOKSET: 10 000 t/a (25 % TS), 45 % tuhka (ka)					
Polttoaine	m_liete	0,361 kg/s	Savukaasu	m_sk1 = m_sk2 = m_sk3	0,7222 kg/s
	h_liete	94,5 kJ/kg		h_sk1	990,08 kJ/kg
	T_liete	28 C		T_sk1	855 C
				p_sk1	1,033 bar
	m_hiekka	0,527 kg/s			
	h_hiekka	786,6 kJ/kg		h_sk2	589,92 kJ/kg
	T_hiekka	855 C		T_sk2	530 C
				p_sk2	1,023 bar
	m_pa1	0,888 kg/s			
h_pa1	505,2 kJ/kg		h_sk3	143,3 kJ/kg	
			T_sk3	135 C	
m_pa2	0,6268 kg/s		p_sk3	1,013 bar	
h_pa2	101,2 kJ/kg				
T_pa2	110 C	Palamisilma	m_i,sisään = m_i1 = m_i2	0,6631 kg/s	
Höyry	m_h1 = m_h2	0,2612 kg/s		h_i,sisään	20,246 kJ/kg
	h_h1	2696,2 kJ/kg		T_i,sisään	20 C
	T_h1	110 C		p_i,sisään	1,013 bar
	p_h1 = p_h2	1,013 bar			
				h_i1	25,072 kJ/kg
	h_h2	292,94 kJ/kg		T_i1	24,765 C
	T_h2	69,967 C		p_i1	1,063 bar
				h_i2	460,9 kJ/kg
	Jäähdytysvesi	m_jv,sisään = m_jv1 = m_jv2 = m_jv3	5,972 kg/s		T_i2
h_jv,sisään	231,16 kJ/kg		p_i2	1,053 bar	
T_jv,sisään	55 C				
p_jv,sisään	11 bar				
		KUIVURI	Ø_k	322,56 kW	
h_jv1	232,07 kJ/kg	PALAMISILMAN ESILÄMMITIN	Ø_pe	289,00 kW	
T_jv1	55,096 C				
p_jv1	17,2 bar	REAKTORI	Ø_r	245,09 kW	
		LAUHDUTIN	Ø_l	627,83 kW	
h_jv2	337,19 kJ/kg				
T_jv2	80,217 C	Laitoksen lämpöteho (reaktori + lauhdutin)		872,91 kW	
p_jv2	17,1 bar				
h_jv3	378,23 kJ/kg	Lietteen sisältämä tuhka ulos prosessista m_tuhka		0,0406 kg/s	
T_jv3	90 C			146,196 kg/h	
p_jv3	17 bar				



**Kuva 30.** Prosessista saatava lämpöteho eri lietteen tuhkapitoisuuksilla.

### 7.4.3 Lietteen orgaanisen aineksen koostumus

Lietteen orgaanisen aineksen koostumus vaihtelee suuresti, kun tarkastellaan erilaisista lähteistä saatuja puhdistamolietteitä. Lietteen orgaanisella aineksella tarkoitetaan kuiva-aineen tuhkatonta osuutta, jonka sisältämä hiili, vety ja rikki palavat prosessissa. Orgaanisen aineksen koostumus on siis suoraan kytköksissä myös kuiva-aineen lämpöarvoon. Lämpöarvo on määräävä tekijä Endev-tekniologian reaktorissa, jossa lietteen palaminen tapahtuu ja palamisesta vapautuvaa lämpöenergiaa saadaan talteen. Myös samalta puhdistamolta prosessiin tulevassa lietteessä saattaa olla suuriakin eroja riippuen puhdistamolla tulevan jäteveden koostumuksesta. Tässä tarkastelussa on oletettu, että lietteen kuiva-ainepitoisuus ja tuhkapitoisuus pysyvät samoina kuin perustapauksessa eli 25 % TS ja 30 % tuhkapitoisuus kuiva-aineessa.

Tähän tarkasteluun on valittu viisi erilaista koostumusta, jotka poikkeavat perustapauksen laskennassa käytetystä lietteen orgaanisen aineksen koostumuksesta (taulukko 6). Koostumus 1 on luvussa 2.2 taulukossa 1 esitetty lietteen orgaanisen aineksen koostumus. Koostumukset 2–5 ovat Phyllis2-nimisestä tietokannasta otettuja koostumuksia, jotka on analysoitu

aidoista puhdistamolietenäytteistä Keski-Euroopassa (TNO Biomass and Circular Technologies 2021). Koostumukset 1–4 ovat käsittelemättömän puhdistamolietteen koostumuksia ja koostumus 5 on mädätetyn puhdistamolietteen koostumus. Taulukoissa 19–23 on esitettyinä kaikki viisi koostumusta ja IPSEpro:lla lasketut koostumusten alemmat lämpöarvot  $q$ .

**Taulukko 19.** Koostumus 1

Alkuaine	m-% kuiva-aineessa, tuhkaton
C	52,50
H	7,35
O	31,3
S	2,05
N	6,8
$q$	15 714 kJ/kg

**Taulukko 20.** Koostumus 2.

Alkuaine	m-% kuiva-aineessa, tuhkaton
C	47,51
H	7,54
O	41,09
S	1,61
N	2,25
$q$	13 650 kJ/kg

**Taulukko 21.** Koostumus 3.

Alkuaine	m-% kuiva-aineessa, tuhkaton
C	58,20
H	8,00
O	22,70
S	2,10
N	9,00
$q$	18 282 kJ/kg

**Taulukko 22.** Koostumus 4.

Alkuaine	m-% kuiva-aineessa, tuhkaton
C	49,27
H	7,64
O	30,91
S	1,82
N	10,36
q	15 286 kJ/kg

**Taulukko 23.** Koostumus 5.

Alkuaine	m-% kuiva-aineessa, tuhkaton
C	39,19
H	6,27
O	49,42
S	1,28
N	3,84
q	10 203 kJ/kg

Lietteen orgaanisen aineen herkkyytarkastelussa noudatetaan samoja periaatteita kuin kuiva-ainepitoisuuden ja tuhkapitoisuuden tarkasteluissa. Kuivurille menevän savukaasun lämpötila  $T_{sk2} \approx 530$  °C määrätään alkuarvona suoraan perustapauksen laskennasta kaikkien koostumusten tarkasteluun. Koostumusten 1, 2, 4 ja 5 tarkasteluihin annetaan myös palamisilman massavirta ja syötettävän hiekan massavirta alkuarvoina suoraan perustapauksesta eli  $m_{hiekkä} = 0,527$  kg/s ja  $m_{i, sisään} = 0,6631$  kg/s. Koostumus 3 sisältää enemmän palavaa orgaanista ainesta kuin perustapaus, joten tälle koostumukselle ei anneta palamisilman massavirtaa alkuarvona vaan alkuarvona annetaan perustapauksen ilmakerroin  $\lambda = 1,32$ . Ilman massavirta tulee näin ollen olemaan perustapauستا suurempi tarkasteltaessa koostumusta 3, jotta polttokammioon saadaan riittävästi palamisilmaa. Lisääntyneen savukaasun massavirran johdosta voidaan olettaa lietteen kuivuvan lähelle 0 % kosteuspitoisuutta, jolloin kuivurille annetaan alkuarvona liete-hiekkaseoksen loppukosteus `dry_fuel_moisture` 0 % ja syötettävän hiekan massavirta jätetään koostumuksen 3 tarkastelussa antamatta alkuarvona. Hiekkaa tarvitaan tällöin hieman vähemmän kuin perustapauksessa. Taulukoissa 24–28 on esitettyä simuloitua prosessiä jokaiselle viidelle koostumukselle.



Taulukko 25. Herkkyystarkastelu koostumus 2.

TULOKSET: 10 000 t/a (25 % TS), 30 % tuhka (ka) KOOSTUMUS 2							
Polttoaine	m_liete	0,361 kg/s		Savukaasu	m_sk1 = m_sk2 = m_sk3	0,733 kg/s	
	h_liete	94,5 kJ/kg			h_sk1	994,32 kJ/kg	
	T_liete	28 C			T_sk1	855 C	
					p_sk1	1,033 bar	
	m_hiekka	0,527 kg/s					
	h_hiekka	786,6 kJ/kg			h_sk2	592,15 kJ/kg	
	T_hiekka	855 C			T_sk2	530 C	
					p_sk2	1,023 bar	
	m_pa1	0,888 kg/s					
	h_pa1	505,2 kJ/kg			h_sk3	143,68 kJ/kg	
					T_sk3	135 C	
					p_sk3	1,013 bar	
				Palamisilma	m_i,sisään = m_i1 = m_i2	0,6631 kg/s	
					h_i,sisään	20,246 kJ/kg	
					T_i,sisään	20 C	
Höyry	m_h1 = m_h2	0,264 kg/s			p_i,sisään	1,013 bar	
	h_h1	2696,2 kJ/kg					
	T_h1	110 C			h_i1	25,072 kJ/kg	
	p_h1 = p_h2	1,013 bar			T_i1	24,765 C	
					p_i1	1,063 bar	
	h_h2	292,94 kJ/kg					
	T_h2	69,967 C			h_i2	469,64 kJ/kg	
					T_i2	450,69 C	
	Jäähdytysvesi	m_jv,sisään = m_jv1 = m_jv2 = m_jv3	6,254 kg/s			p_i2	1,053 bar
		h_jv,sisään	231,16 kJ/kg				
		T_jv,sisään	55 C				
		p_jv,sisään	11 bar				
				KUIVURI	Ø_k	328,74 kW	
	h_jv1	232,07 kJ/kg		PALAMISILMAN ESILÄMMITIN	Ø_pe	294,79 kW	
	T_jv1	55,096 C					
	p_jv1	17,2 bar		REAKTORI	Ø_r	279,67 kW	
				LAUHUTIN	Ø_l	634,48 kW	
	h_jv2	333,51 kJ/kg					
	T_jv2	79,34 C		Laitoksen lämpöteho (reaktori + lauhdutin)		914,14 kW	
	p_jv2	17,1 bar					
	h_jv3	378,23 kJ/kg		Lietteen sisältämä tuhka ulos prosessista m_tuhka		0,0271 kg/s	
	T_jv3	90 C				97,452 kg/h	
	p_jv3	17 bar					

Taulukko 26. Herkkystarkastelu koostumus 3.

TULOKSET: 10 000 t/a (25 % TS), 30 % tuhka (ka) KOOSTUMUS 3					
Polttoaine	m_liete	0,361 kg/s	Savukaasu	m_sk1 = m_sk2 = m_sk3	0,7827 kg/s
	h_liete	94,5 kJ/kg		h_sk1	988,08 kJ/kg
	T_liete	28 C		T_sk1	855 C
				p_sk1	1,033 bar
	m_hiekka	0,5197 kg/s			
	h_hiekka	786,6 kJ/kg		h_sk2	588,23 kJ/kg
	T_hiekka	855 C		T_sk2	530 C
				p_sk2	1,023 bar
	m_pa1	0,8807 kg/s			
	h_pa1	502,9 kJ/kg		h_sk3	142,55 kJ/kg
				T_sk3	135 C
				p_sk3	1,013 bar
			Palamisilma	m_i,sisään = m_i1 = m_i2	0,7195 kg/s
				h_i,sisään	20,246 kJ/kg
				T_i,sisään	20 C
				p_i,sisään	1,013 bar
Höyry	m_h1 = m_h2	0,2707 kg/s		h_i1	25,072 kJ/kg
	h_h1	2696,2 kJ/kg		T_i1	24,765 C
	T_h1	110 C		p_i1	1,063 bar
	p_h1 = p_h2	1,013 bar			
	h_h2	292,94 kJ/kg		h_i2	460,02 kJ/kg
	T_h2	69,967 C		T_i2	441,85 C
				p_i2	1,053 bar
Jäähdytysvesi	m_jv,sisään = m_jv1 = m_jv2 = m_jv3	8,314 kg/s	KUIVURI	Ø_k	348,83 kW
	h_jv,sisään	231,16 kJ/kg	PALAMISILMAN ESILÄMMITIN	Ø_pe	312,96 kW
	T_jv,sisään	55 C			
	p_jv,sisään	11 bar			
			REAKTORI	Ø_r	564,53 kW
			LAUHUTIN	Ø_l	650,67 kW
			Laitoksen lämpöteho (reaktori + lauhdutin)		1215,21 kW
			Lietteen sisältämä tuhka ulos prosessista m_tuhka		0,0271 kg/s
				97,452 kg/h	

Taulukko 27. Herkkystarkastelu koostumus 4.

TULOKSET: 10 000 t/a (25 % TS), 30 % tuhka (ka) KOOSTUMUS 4							
Polttoaine	m_liete	0,361 kg/s	Savukaasu	m_sk1 = m_sk2 = m_sk3	0,7329 kg/s		
	h_liete	94,5 kJ/kg		h_sk1	995,64 kJ/kg		
	T_liete	28 C		T_sk1	855 C		
				p_sk1	1,033 bar		
	m_hiekka	0,527 kg/s					
	h_hiekka	786,6 kJ/kg		h_sk2	592,85 kJ/kg		
	T_hiekka	855 C		T_sk2	530 C		
				p_sk2	1,023 bar		
	m_pa1	0,888 kg/s					
	h_pa1	505,2 kJ/kg		h_sk3	143,81 kJ/kg		
				T_sk3	135 C		
				p_sk3	1,013 bar		
			Palamisilma	m_i,sisään = m_i1 = m_i2	0,6631 kg/s		
				h_i,sisään	20,246 kJ/kg		
Höyry	m_h1 = m_h2	0,2642 kg/s		T_i,sisään	20 C		
	h_h1	2696,2 kJ/kg		p_i,sisään	1,013 bar		
	T_h1	110 C					
	p_h1 = p_h2	1,013 bar		h_i1	25,072 kJ/kg		
				T_i1	24,765 C		
	h_h2	292,94 kJ/kg		p_i1	1,063 bar		
	T_h2	69,967 C					
				h_i2	470,23 kJ/kg		
	Jäähdytysvesi	m_jv,sisään = m_jv1 = m_jv2 = m_jv3	6,923 kg/s		T_i2	451,23 C	
		h_jv,sisään	231,16 kJ/kg		p_i2	1,053 bar	
		T_jv,sisään	55 C				
		p_jv,sisään	11 bar				
			KUIVURI	Ø_k	329,08 kW		
h_jv1	232,07 kJ/kg		PALAMISILMAN ESILÄMMITIN	Ø_pe	295,18 kW		
T_jv1	55,096 C						
p_jv1	17,2 bar		REAKTORI	Ø_r	376,97 kW		
			LAUHUTIN	Ø_l	634,84 kW		
h_jv2	323,78 kJ/kg						
T_jv2	77,016 C		Laitoksen lämpöteho (reaktori + lauhdutin)		1011,81 kW		
p_jv2	17,1 bar						
h_jv3	378,23 kJ/kg		Lietteen sisältämä tuhka ulos prosessista m_tuhka		0,0271 kg/s		
T_jv3	90 C				97,452 kg/h		
p_jv3	17 bar						



Taulukko 28. Herkkyystarkastelu koostumus 5.

TULOKSET: 10 000 t/a (25 % TS), 30 % tuhka (ka) KOOSTUMUS 5						
Polttoaine	m_liete	0,361 kg/s		Savukaasu	m_sk1 = m_sk2 = m_sk3	0,7341 kg/s
	h_liete	94,5 kJ/kg			h_sk1	985,04 kJ/kg
	T_liete	28 C			T_sk1	855 C
					p_sk1	1,033 bar
	m_hiekka	0,527 kg/s				
	h_hiekka	786,6 kJ/kg			h_sk2	587,22 kJ/kg
	T_hiekka	855 C			T_sk2	530 C
					p_sk2	1,023 bar
	m_pa1	0,888 kg/s				
	h_pa1	505,2 kJ/kg			h_sk3	142,78 kJ/kg
					T_sk3	135 C
					p_sk3	1,013 bar
				Palamisilma	m_i,sisään = m_i1 = m_i2	0,6631 kg/s
					h_i,sisään	20,246 kJ/kg
					T_i,sisään	20 C
					p_i,sisään	1,013 bar
Höyry	m_h1 = m_h2	0,2629 kg/s			h_i1	25,072 kJ/kg
	h_h1	2696,2 kJ/kg			T_i1	24,765 C
	T_h1	110 C			p_i1	1,063 bar
	p_h1 = p_h2	1,013 bar				
	h_h2	292,94 kJ/kg			h_i2	465,5 kJ/kg
	T_h2	69,967 C			T_i2	446,88 C
					p_i2	1,053 bar
Jäähdytysvesi	m_jv,sisään = m_jv1 = m_jv2 = m_jv3	4,846 kg/s				
	h_jv,sisään	231,16 kJ/kg				
	T_jv,sisään	55 C				
	p_jv,sisään	11 bar				
				KUIVURI	Ø_k	326,27 kW
	h_jv1	232,07 kJ/kg		PALAMISILMAN ESILÄMMITIN	Ø_pe	292,05 kW
	T_jv1	55,096 C				
	p_jv1	17,2 bar		REAKTORI	Ø_r	76,47 kW
				LAUHUTIN	Ø_l	631,82 kW
	h_jv2	362,45 kJ/kg				
	T_jv2	86,238 C		Laitoksen lämpöteho (reaktori + lauhdutin)		708,28 kW
	p_jv2	17,1 bar				
	h_jv3	378,23 kJ/kg		Lietteen sisältämä tuhka ulos prosessista m_tuhka		0,0271 kg/s
	T_jv3	90 C				97,452 kg/h
p_jv3	17 bar					

## 8 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn kahtena keskeisenä osa-alueena olivat kirjallisuuskatsaus puhdistamolietteen termisistä käsittelymenetelmistä ja Endev-teknologian tarkastelu käyttäen kehitettyä IPSEpro-mallia. Osa-alueet pidettiin työn aikana selkeästi eri kokonaisuuksinaan ja myös pohdinta ja johtopäätökset molemmista osioista esitellään erillisissä luvuissaan. Kirjallisuustarkastelu toteutettiin itsenäisesti kirjallisuudesta löytyvien aineistojen pohjalta. Endev-teknologian tarkastelu tehtiin sekä itsenäisenä tarkasteluna kehitetyn prosessimallin avulla että myös yhteistyössä Endev Oy:n kanssa.

### 8.1 Kirjallisuuskatsaus puhdistamolietteen termisistä käsittelymenetelmistä

Kirjallisuustarkastelu puhdistamolietteen termisistä käsittelymenetelmistä onnistui työssä hyvin. Kirjallisuustarkastelun pääpainona oli pohtia lietteenkäsittelymenetelmiä, jotka tarjoavat mahdollisuuksia erityisesti energian ja ravinteiden talteenottoon puhdistamolietteestä. Työn rajaukseksi valittiin lietteen termiset käsittelymenetelmät, joten kaikkia potentiaalisia menetelmiä etenkin ravinteiden talteenottoon ei työhön sisällytetty. Termiset käsittelymenetelmät antavat konventionaalisia menetelmiä paremmat mahdollisuudet myös puhdistamolietteissä olevien haitta-aineiden, mikromuovien ja lääkejäämien tuhoamiselle. Termisten käsittelymenetelmien välillä löydettiin kuitenkin olevan suuriakin eroja niiden kyvyssä tuhota lietteessä olevia haitta-aineita ja mikromuoveja.

Termisistä käsittelymenetelmistä lietteen poltto nousee selkeästi yleisimmäksi ja tutkituimmaksi termiseksi menetelmäksi. Poltolla liete pystytään hallitusti tuhoamaan, jolloin sekä liete että sen sisältämät haitta-aineet ja mikromuovit saadaan hävitettyä. Polton lopputuotteina syntyy sekä energiaa että polttotavasta riippuen myös ravinnearvoltaan arvokasta tuhkaa. Mielenkiintoisimpana huomiona polttoon liittyen voidaan todeta, että poltosta talteen saatu energia on suoraan riippuvainen orgaanisen aineksen määrästä kuiva-aineessa ja kuiva-aineen kokonaismäärästä lietteessä. Yhtälöt 1–3 ja kuva 13 esittivät näiden vaikutuksen koko prosessin energiataaseeseen, joka määrää saadaanko polton ja polttoa edeltävän termisen kuivauksen muodostamasta kokonaisuudesta energiaa talteen myös koko prosessin ulkopuolelle. Terminen kuivaus on käytännössä vaatimus lietteen poltolle ja poltettaessa esimerkiksi mädätettyä lietettä, jossa orgaanisen aineksen osuus on mädättämätöntä lietettä pienempi,

poltosta saatava energiaa saattaa riittää kattamaan ainoastaan termiseen kuivaukseen tarvittavan energian. Tällöin poltolla ei saada varsinaisesti tuotettua energiaa koko prosessin ulkopuolelle, mutta energiaa saadaan aina talteen vähintään lietteen termisen kuivauksen tarpeisiin.

Kirjallisuustarkastelusta saatiin myös polttoon liittyen selville, että polton lopputuotteena syntyvä tuhka ei monesti sellaisenaan sovellu ravinnekäyttöön raskasmetallipitoisuuksien takia. Tuhkan jatkokäsittely on lähes väistämättä tehtävä, jotta ravinteista arvokas fosfori saadaan otettua tuhkasta talteen. Tuhkan jatkokäsittely on toteutettava monesti energiaa ja kemikaaleja kuluttavin menetelmin, joten tällaisissa tapauksissa fosforin talteenoton tehokkuus riippuu saatavasta fosforimäärän arvosta ja talteenottoon kuluvien energian ja kemikaalien hinnasta. Mikäli tuhka pystyttäisiin käyttämään sellaisenaan hyödyksi ja raskasmetallipitoisuudet olisivat tuotetuhkassa alhaisia, olisi tilanne myös ravinteiden talteenoton kannalta paras mahdollinen. Tällaista konseptia edustaa työssä tarkemmin käsitelty Endev-teknologia. Työssä selvisi myös, että mikäli lietettä poltetaan yhteispolttona muiden polttoaineiden kanssa, vaikuttaa fosforin talteenotto tuhkasta olevan käytännössä taloudellisesti kannattamatonta vähäisten pitoisuuksien vuoksi. Liete olisi pystyttävä polttamaan erillis-polttona, jolloin fosforin määrä tuhkassa maksimoidaan. Polton tarkastelun yhteydessä selvisi myös, että tyypeä ei saada talteen varsinaisesta polttoprosessista, mutta osa siitä voitaisiin saada talteen poltto edeltävästä termisestä kuivauksesta.

Kirjallisuustarkastelusta selvisi, että muut termiset menetelmät ovat selkeästi vähäisemmässä asemassa tutkimuksen ja referenssien suhteen verrattuna polttoon. Kaasutus on muista termisistä menetelmistä selkeästi lähimpänä polttoa ja tuhoaa myös lietteen sisältämät haitta-aineet ja mikromuovit tehokkaasti. Kaasutuksesta syntyvästä tuhkasta olisi mahdollista ottaa samalla tavalla fosforia talteen kuin polton tuhkasta. Kaasutus myös kilpailee samasta kokoluokasta polton kanssa eli 10 000 t/a (30 % TS) lietemäärästä ylöspäin. Kaasutus on kuitenkin polttoa monimutkaisempi prosessi ja tuotekaasun puhdistus vaatii myös polttoa enemmän teknisiä ratkaisuja. Kaasutuksesta ei juurikaan löytynyt referenssejä, mutta siitä ei vaikuttaisi olevan mahdollista saada huomattavasti polttoa enemmän energiaa talteen. Myös tuhkan jatkojalostus on monesti tehtävä, jotta fosforia saataisiin tuhkasta talteen, minkä lisäksi tyyppi menetetään varsinaisessa kaasutusprosessista polton tapaan. Näin ollen voidaan

sanoa johtopäätöksenä, että kaasutus ei vaikuttaisi olevan polttoa potentiaalisempi teknologia suuremman monimutkaisuutensa ja häiriöherkkyytensä sekä samantyyppisen pakollisen tuhkan jatkojalostuksen vuoksi.

Muista termisistä menetelmistä käsiteltiin tarkemmin pyrolyysi ja märkähiilto. Nämä eroavat selkeämmin poltosta ja kaasutuksesta, molemmista syntyy hyödynnettävää kiintoainehiiltä lopputuotteena tuhkan sijaan. Nämä eroavat myös poltosta ja kaasutuksesta siten, että pyrolyysistä ja märkähiillosta vaikuttaisi olevan mahdollista ottaa energiaa talteen ainoastaan prosessin omaan käyttöön ja pyrolyysin tapauksessa myös edeltävään termiseen kiuvaukseen. Energian tuotanto koko prosessiketjun ulkopuolelle ei vaikuttaisi olevan mahdollista pelkästään pyrolyysillä tai märkähiillolla. Ainoastaan lopputuotteena syntyvän kiintoainehiilen poltolla voidaan saada energiaa tuotettua, mutta tämä vaatii taas erillisen poltto-prosessin pyrolyysin tai märkähiillon jatkeeksi.

Johtopäätöksinä voidaan pyrolyysistä todeta, että tekniikka kilpailee polttoa vastaan etenkin hyvin pienen kokoluokan sovelluksissa eli alle 10 000 t/a (30 % TS) lietemäärille. Poltto ei vaikuttaisi olevan enää kannattava alle 10 000 t/a (30 % TS) tapauksissa, tämä saattaa tarjota pyrolyysille mahdollisuuksia tällä saralla. Ongelmana pyrolyysillä ovat olleet lopputuotteena syntyvän kiintoainehiilen (pyrolyysihiilen) epävarmat markkinat tällä hetkellä, pyrolyysihiihtä on tutkittu maanparannusaineeksi sen fosfori- ja hiilipitoisuuden takia. Ongelmana ovat olleet hiilen korkeat haitta-ainepitoisuudet etenkin raskasmetallien ja PAH-yhdisteiden osalta, toisaalta tutkimustulokset pitoisuuksista ovat vaihdelleet hyvinkin paljon. Mikäli pyrolyysihiihi saadaan tuotteistettua ja sille löytyy käyttökohteita, joissa ravinteet saataisiin talteen, voisi pyrolyysi nousta polton rinnalle palvelen erityisesti polttoa pienemmän kokoluokan sovelluksia prosessin yksinkertaisuuden ansiosta.

Märkähiiltoa (HTC) on maailmalla pilotoitu myös jonkin verran pyrolyysin tapaan. Selkeänä erona pyrolyysiin on etenkin haitta-aineiden tuhoutumisen epävarmuus märkähiiltokäsittelyn aikana. Tästä syystä märkähiillon lopputuotteena syntyvällä kiintoainehiilellä ei ole pyrolyysihiilen kaltaista potentiaalia hyötykäytön suhteen. Kirjallisuustarkastelusta selvisi, että märkähiiltoa voidaan pitää enemmänkin vain lietteen esikäsittelymenetelmänä toisin kuin

loppukäsittelymenetelmänä polton, kaasutuksen ja pyrolyysin tapaan. Märkähiiltoa on pilotoitu etenkin termisen kuivauksen vaihtoehtona, joka kuivaisi lietteen polttoon sopivaksi kiintoainehiileksi, mutta veisi termistä kuivausta vähemmän energiaa. Työssä selvisi myös, että märkähiillolla olisi mahdollista ottaa ravinteista sekä typpi että fosfori talteen märkähiiltokäsittelyn aikana, aikaisemmissa termisissä menetelmissä typen talteenotto on vaikeampaa. Johtopäätöksenä märkähiiltoon liittyen voidaan todeta, että sillä voisi olla potentiaalia suuren kokoluokan sovelluksissa esimerkiksi suurissa asutuskeskuksissa, joissa sijaittisi suuri polttolaitos. Näin ravinteet voitaisiin ottaa talteen jo märkähiiltokäsittelyn aikana ja kuiva kiintoainehiili voitaisiin polttaa yhteispolttona esimerkiksi yhdyskuntajätteen polttolaitoksessa. Mitä lähempänä polttolaitos olisi märkähiiltokäsittelyä, sitä vähemmän syntyisi kuljetuskustannuksia.

Polton, kaasutuksen, pyrolyysin ja märkähiillon lisäksi työssä esiteltiin termisen kuivauksen peruseriaatteet sekä esiteltiin muutamia vielä konseptiasteella olevia termisiä menetelmiä, kuten hydroterminen nesteytys (HTL) ja ylikriittinen vesikaasutus (SCGW). Termistä kuivausta ei voida pitää loppukäsittelymenetelmänä, koska se ei tuhoa lietteessä olevia haitta-aineita ja mikromuoveja. Konseptiasteelta löytyy useita loppukäsittelymenetelmiä, mutta niiden potentiaalista nousta suurempaan rooliin tulevaisuudessa on vielä mahdotonta sanoa varmasti mitään. Lopullisena johtopäätöksenä koko kirjallisuuskatsauksesta voidaan sanoa, että termiset lietteenkäsittelymenetelmät nostavat varmasti rooliaan tulevaisuudessa, etenkin polton mahdollisuudet niin energian ja ravinteiden talteenottoon sekä haitta-aineiden ja mikromuovien tuhoamiseen ovat erittäin hyvät. On kuitenkin hyvä huomata, että työssä tarkasteltiin vain termisiä käsittelymenetelmiä. Näiden lisäksi on kehitetty ja pilotoitu erilaisia kemiallisia menetelmiä, jotka tarjoavat myös mahdollisuuksia etenkin ravinteiden talteenoton suhteen. Niiden tarjoamiin vaihtoehtoihin ja potentiaaleihin ei tämän työn kirjallisuuskatsauksessa saatu vastauksia. Näitä menetelmiä on jatkotutkimuksen kannalta hyvä selvittää.

## **8.2 Endev-teknologian tarkastelu**

Endev-teknologiasta kehitettiin tässä työssä prosessimalli, jolla prosessin massa- ja energia-taseita pyrittiin tarkastelemaan perustapausta poikkeavissa tilanteissa. Endev-teknologian

tarkastelussa osa-alueina olivat skaalaustarkastelu sekä muutamat herkkyystarkastelut. Perustapauksena pidettiin Endev-tekniikan ensimmäistä kaupallista laitosta Rovaniemellä, jonka kapasiteettina käytettiin laskennassa 10 000 t/a (25 % TS) lietettä.

Prosessimalli toteutettiin IPSEpro-nimisellä ohjelmalla. Mallin rakentamisessa oli vaikeuksia johtuen käytössä olevan IPSEpro:n komponenttikirjaston komponenttien suppeuden ja IPSEpro:n rajoitteiden takia sekä todellisen Endev-tekniikan prosessin omalaatuisuuden takia. Malliin jouduttiin luomaan polttoaineen eli lietteen kuivaukseen käytettävä kuivuri-komponentti, koska vastaavaa ei ollut saatavilla valmiista komponenteista. Kuivurin luominen sujui kohtalaisesti, apuna sen luomisessa käytettiin vanhan polttoainekuivurin mallia. Suurempia haasteita aiheutti kuitenkin koko prosessimallin luominen, koska Endev-tekniikassa keskeisenä osana olevaa hiekkakiertoa oli hankala toteuttaa IPSEpro:n rajoittuneisuuden takia. Lopulta hiekkakierto toteutettiin määrittelemällä lietteen sekaan sekoitettava hiekka tuhkaksi, jotta malliin saatiin toteutettua hiekan lisäystä muistuttava prosessivaihe. Varsinaista kiertoa ei kuitenkaan mallissa ollut, vaan hiekka syötetään lietteen sekaan ja polttoaineen sisältämä tuhka ja hiekka häviävät mallissa polttokammioista prosessin ulkopuolelle. Näin ollen malli ei vastaa todellista prosessia, jossa hiekkaa palautetaan reaktorista kuivuriin syötettävän lietteen sekaan.

Todellisessa prosessissa hiekka sekoitetaan lietteeseen vasta kuivurissa, mutta mallissa hiekka sekoitetaan lietteeseen jo ennen kuivuria. Kuuma hiekka tuo oman lämpöenergiansa kuivuriin veden höyrystämiseen lietteestä savukaasujen ohella. Mallista saatu kuivurin kuivausprosessi vastaa kuitenkin savukaasupuolen ja kuivurin lämmönsiirron osalta todellista Endev-tekniikan Rovaniemen laitoksen tasetta, joten tätä voidaan pitää positiivisena merkinä mallin toimivuudesta. Mallista ei kuitenkaan saatu aivan samaa prosessilla tuotettavaa lämpötehoa kuin mitä todellinen Rovaniemen laitos tuottaa. Perustapauksessa mallilla saatiin simuloitua reaktori ja kuivuri yhteenlaskettuna noin 1 105 kW lämpöteho, kun todellinen prosessi tuottaa samoilla lietemäärillä noin 1 200 kW lämpötehon. Eroa mallilla simuloitujen ja todellisen prosessin lämpötehojen välillä saattaa aiheuttaa todellisessa prosessissa kuivurin lauhduttimesta reaktoriin menevän hajukaasun ja höyryn massavirta. Todellisessa prosessissa lauhduttimessa ei saada lauhdutettua koko kuivurissa höyrystynyttä vesimäärää

vaan osa siitä kulkeutuu hajukaasujen mukana reaktoriin. Kun hajukaasujen kiertoa lauhdutimesta reaktoriin ei voitu IPSEpro:n rajoitteiden takia malliin toteuttaa, jäi perustapauksen laskennassa reaktorissa muodostuvien savukaasujen massavirta todennäköisesti pienemmäksi kuin todellisessa prosessissa. Tämä on voinut vaikuttaa pienempään tehoon, joka saatiin mallista perustapausta simuloimalla verrattuna todelliseen prosessiin. Toisaalta laitosmittauksissa on aina jonkin verran epävarmuutta ja todelliset prosessiarvot voivat aina poiketa mitatuista arvoista. Tässä suhteen voidaan todeta, että simulointitulokset ovat vertailukelpoisia todellisen prosessin arvoihin.

Skaalaustarkastelun tavoitteena oli tarkastella Endev-teknologiaa perustapausta kahdessa suuremmassa kokoluokassa, jotka olivat 20 000 t/a (25 % TS) ja 30 000 t/a (25 % TS). Tämän jälkeen tehtävässä herkkyytarkastelussa tavoitteena oli tarkastella tiettyjen muuttujien vaikutusta perustapauksen taseisiin, muuttujiksi valittiin lietteen koostumukseen liittyvät muuttujat: lietteen kuiva-ainepitoisuus, lietteen tuhkapitoisuus ja lietteen orgaanisen aineksen koostumus. Alun perin tavoitteena oli tarkastella myös lämmönsiirtoa kuivurissa ja palamisilman esilämmittimessä, mutta näiden parametrien tarkastelua ei pystytty toteuttamaan mallilla. Tästä saatiin johtopäätöksenä, että mallin soveltuvuus on rajoittunut määrättyihin tarkasteluihin, kuten polttoaineen koostumuksen tarkasteluihin.

Skaalaustarkastelusta saatiin odotetusti hyvin lineaarisia tuloksia eli 20 000 t/a (25 % TS) tapauksessa prosessin massavirrat ja lämpöpintojen yli siirtyneet lämpövirrat kaksinkertaistuivat kuten myös prosessista saatu lämpöteho verrattuna perustapaukseen. Vastaavasti 30 000 t/a (25 % TS) tapauksessa prosessin massavirrat ja lämpövirrat sekä prosessista saatu lämpöteho kolminkertaistuivat verrattuna perustapaukseen. Tämä on hyvin järkeenkäypä tulos siinä mielessä, että lietteen koostumukseen ei skaalaustarkastelussa koskettu, kaksin- ja kolminkertaiset määrät samaa lietettä tuovat luonnollisesti kaksi- ja kolminkertaiset tulokset perustapaukseen nähden. Lämpöhäviöitä ei prosessista oletettu olevan missään prosessivaiheessa. Mielenkiintoisimmat tulokset skaalaustarkastelusta ovat simuloitujen tarkat massavirrat ja lämpövirrat sekä prosessista saatavat tehot. Skaalaustarkastelu tuotti prosessista noin 2 210 kW ja 3 316 kW lämpötehot 20 000 t/a (25 % TS) ja 30 000 t/a (25 % TS) tapauksista.

Herkkyystarkasteluista lietteen kuiva-ainepitoisuuden vaihtelu tuotti mielenkiintoisimmat tulokset. Lietteän kuiva-ainepitoisuus voi vaihdella hyvinkin paljon prosessiin syötettävässä lietteessä, jos esimerkiksi lietteen mekaanisessa kuivauksessa tulee ongelmia. On myös hyvin tapauskohtaista, mikä on lietteen kuiva-ainepitoisuus mekaanisen kuivauksen jälkeen, tähän vaikuttaa erityisesti kuivaustekniikka ja lietteen kuiva-ainepitoisuus ennen mekaanista kuivausta. Kuiva-ainepitoisuudet voivat vaihdella alle 20 % TS jopa 40 % TS asti. Kuiva-ainepitoisuuden tarkastelusta saatiin selville, että kun kuiva-ainepitoisuus on vain 15 % TS, reaktorista saatava teho on hyvin pieni (18,66 kW). Näin ollen voidaan todeta, että mallin mukaan 15 % TS on alhaisin kuiva-ainepitoisuus, jolla prosessi voi vielä itsenäisesti toimia. Todellisuudessa alhaisin kuiva-ainepitoisuus lienee 15–20 % TS välillä, koska reaktorista on myös pieniä lämpöhäviöitä. Tällaisessa tapauksessa reaktorissa jouduttaisiin polttamaan apupolttoainetta, jotta reaktorin lämpötila saataisiin pidettyä halutulla tasolla. Koko prosessista saatava lämpöteho myös tippuisi tällaisessa tilanteessa vain lauhduttimesta saatavaan lämpötehoon, joka olisi noin 640 kW. Liete-hiekkaseosta ei saataisi tällaisessa tapauksessa kuivattua aivan perustapauksen tasolle, koska liete sisältäisi enemmän kosteutta. Vastaavasti taas perustapausta suuremmalla kuiva-ainepitoisuudella (30 % ja 35 % TS), prosessista saataisiin lämpötehoa yhteensä noin 1 388 kW ja 1 726 kW, joka on huomattavan suuri lisäys perustapaukseen nähden. Myös hiekan massavirtaa lietteen sekaan voitaisiin pienentää näissä tapauksissa, koska liete sisältäisi vähemmän vettä. Tällöin myös kuivurin lämpötila saataisiin pidettyä perustapauksen tasolla eikä se nousisi perustapauksesta ja myös savukaasu jäähtyisi riittävästi.

Herkkyystarkastelussa tutkittiin myös lietteen tuhkapitoisuuden vaikutusta Endev-tekniikan perustapauksen taseisiin. Tuhkapitoisuutta mallinnettiin perustapausta pienemmässä (25 % TS) ja suuremmissa (35 %, 40 % ja 45 %) tapauksissa. Tuhkapitoisuudella todettiin myös olevan vaikutusta prosessiin, sillä suurentunut tuhkapitoisuus tarkoittaa pienempää orgaanisen kuiva-aineen määrää lietteessä ja tätä kautta myös pienempää palavan aineen määrää prosessiin. Tuhkapitoisuus saattaa kuiva-ainepitoisuuden tapaan vaihdella hyvinkin syötettävässä lietteessä, mutta kuiva-ainepitoisuudesta poiketen siihen ei voida vaikuttaa millään tavalla. Tuhkapitoisuuden vaihtelut johtuvat ainoastaan puhdistamolle tulevan jäteveden koostumuksen vaihteluista. Tarkastelusta huomattiin, että mikäli tuhkapitoisuus nousee perustapauksen 30 % TS esimerkiksi 45 % TS asti, putoaa prosessista saatava lämpöteho



noin 1 105 kW:sta noin 873 kW:iin. Tuhkapitoisuus saattaa vaihdella hyvinkin suuresti aina 30 % ja 50 % välillä, joten tuhkapitoisuudellakin on merkitystä prosessin taseisiin, vaikka kuiva-ainepitoisuus pysyisikin vakiona.

Viimeisenä tarkasteluna toteutettiin lietteen orgaanisen aineksen koostumuksen tarkastelu. Tähän tarkasteluun valittiin perustapauksen laskennassa käytetystä lietteen orgaanisen aineen koostumuksen tarkastelusta poikkeavia koostumuksia, joista yksi oli esitetty tämän työn luvussa 2.2. Muut koostumukset valittiin tietokannasta. Orgaanisen aineen koostumuksen tarkastelussa mielenkiintoisin huomio oli lietteen lämpöarvon muuttuminen hyvinkin erilaisiksi erilaisilla koostumuksilla. Lämpöarvot olivat suoraan IPSEpro:sta saatuja ja ne on laskettu valmiilla algoritmeilla perustuen polttoaineen koostumukseen. Työssä ei ollut täysin varmaa, kuinka tarkkoja nämä valmiiksi lasketut lämpöarvot ovat verrattuna kokeellisiin lämpöarvojen määrityksiin. Johtopäätöksenä voidaan kuitenkin todeta, että lietteen kuiva-aineen lämpöarvot voivat vaihdella aina noin 10 MJ/kg lämpöarvosta peräti yli 18 MJ/kg lämpöarvoihin. Tällä todettiin olevan vaikutusta reaktorista saatavaan tehoon, koska luonnollisesti lämpöarvon muuttuessa myös polttoprosessista saatava teho pienenee. Tarkastelusta selvisi myös, että mädätettyä lietettä käytettäessä reaktorista saatava teho saattaa mennä hyvin pieneksi, koska lämpöarvo oli vain noin 10,2 MJ/kg. Tämä on kytköksissä kirjallisuustarkastelussa luvussa 4.3. esiintyvään mainintaan, että mädätettyä lietettä käytettäessä polttoprosessista ei välttämättä saada tuotettua energiaa enää laitoksen ulkopuolelle. Tässä tarkastelussa löydetyllä parhaimmalla lämpöteholla (noin 18,3 MJ/kg), koko prosessista saataisiin lämpötehoa 1 215 kW verrattuna perustapauksen 1 105 kW:tiin. Muilla koostumuksilla lämpötehot vaihtelivat 1 000 kW molemmin puolin.

Endev-teknologian tarkastelun johtopäätöksenä voitaisiin sanoa, että määrättyjä tarkasteluja saatiin tehtyä ja tulokset vaikuttavat olevan vertailukelpoisia todelliseen Endev-teknologian prosessiin. Mallin luomisessa tulleet ongelmat ja mallin poikkeavuus todellisesta prosessista voidaan tietysti nähdä ongelmana mallin luotettavuuden suhteen. Toisaalta mallilla saatiin yksinkertaistuksien jälkeen vielä vertailukelpoisia tuloksia todelliseen prosessiin ja laitosmittaukset pitävät sisällään aina epävarmuutta. Työssä myös selvisi IPSEpro:n rajoittuneisuus Endev-teknologian kaltaiselle tyypillisistä voimalaitosprosesseista poikkeavalle pro-

sessille. Mallilla ei myöskään voitu tehdä tiettyjä tarkasteluja esimerkiksi eri prosessikomponenttien lämmönsiirtoon liittyen. Loppupäätelmänä voidaan todeta, että malli antaa ainakin suuntaa antavia arvoja ja voi toimia esimerkiksi alkuarvojen laskennassa. Tarkastelusta voidaan todeta, että jatkotutkimuksen kannalta prosessista olisi hyvä tehdä prosessiin paremmin soveltuvalla simulointiohjelmalla luotettavampi prosessimalli ja käyttää sitä varsinaisen suunnittelun apuna esimerkiksi prosessin mitoittamiseen ja syvällisempiin herkkyystarkasteluihin.

## 9 YHTEENVETO

Tässä työssä esiteltiin aluksi jätevedenpuhdistuksen pääpiirteet sekä jätevesien koostumusta. Jätevedenpuhdistus on ympäristön kannalta erittäin tärkeää, jotta haitallisten aineiden pääsy luontoon ja mahdollisesti takaisin ihmisiin voidaan ehkäistä. Tyypillisin tapa puhdistaa yhdyskuntien jätevesiä on ns. biologis-kemiallinen rinnakkaissaostus, jossa jätevesi puhdistetaan ensin mekaanisesti. Mekaanista puhdistusta seuraa varsinainen biologinen ja kemiallinen puhdistus, jossa jätevesi puhdistetaan biologisesti bakteerien avustamana yleensä ns. aktiivilietemenetelmällä sekä kemiallisesti lisäämällä jäteveden sekaan erilaisia kemikaa- leja. Koko jätevedenpuhdistuksen päätavoitteena on poistaa jätevedestä orgaaninen aines, typpi ja fosfori.

Jätevedenpuhdistuksen lopputuotteena syntyy puhdistamolietettä, johon jätevedestä poiste- tut aineet ovat sitoutuneet. Työssä esiteltiin puhdistamolietteen konventionaaliset käsittely- menetelmät, joiden tavoitteena on ollut puhdistamolietteen kuivaus sekä saattaminen ympä- ristön kannalta mahdollisimman haitattomaan tilaan. Puhdistamolietteen sisältämät ravinteet typpi ja fosfori ovat myös olleet merkittävä ravinteiden lähde erityisesti maataloudelle niin Suomessa kuin muualla Euroopassakin. Uudet tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että puhdistamolietteet sisältävät orgaanisia haitta-aineita, kuten palonestoaineita sekä mikro- muoveja, lääkettäjämiä, huumeita ja hormoneja. Jätevedenkäsittelyn tehostuessa haitta-aineita on puhdistamolieteteissä yhä enemmän ja lietteiden käyttö etenkin maataloudessa on joutunut kyseenalaiseksi. Työssä esitellyt vallalla olevat konventionaaliset lietteenkäsittelymenetel- mät eivät ole riittäviä poistamaan lietteissä olevia ympäristölle haitallisia ainesosia. Puhdis- tamolietteet sisältävät toisaalta hyödyllisiä ravinteita, joista tärkeimpänä on fosfori. Erityi- sesti fosfori täytyisi saada mahdollisimman hyvin kierrätettyä takaisin kasveille, koska fos- fori on hupeneva luonnonvara.

Tämän työn ensimmäisenä tavoitteena oli tutkia kirjallisuuskatsauksena puhdistamoliettei- den termisten käsittelymenetelmien potentiaalia lietteen loppukäsittelyvaihtoehtoiksi kon- ventionaalisten menetelmien sijasta. Työn ensimmäinen tavoite saatiin hyvin täytettyä, koska tutkimustyötä ja referenssejä termisistä käsittelymenetelmistä löytyi kiitettävästi. Pää- painona termisillä käsittelymenetelmillä on lietteen sisältämien haitallisten ainesosien hävi- tys sekä energian ja ravinteiden talteenotto lietteestä. Kirjallisuuskatsauksesta selvisi lietteen

erillispoltton olevan tällä hetkellä potentiaalisin vaihtoehto laajamittaiseen lietteiden termiseen käsittelyyn. Poltossa lietteen sisältämät haitta-aineet tuhoutuvat täysin ja polton lopputuloksena on mahdollista saada myös poltossa vapautuvaa lämpöenergiaa otettua talteen. Energian talteenotossa pääpainona on, saadaanko menetelmällä tuotettua myös energiaa käsittelyketjun ulkopuolelle vai kuluuko kaikki tuotettu energia esimerkiksi polttoa edeltävään termiseen kuivaukseen. Poltolla todettiin olevan mahdollisuuksia myös energian tuotantoon, mikäli syötettävän lietteen lämpöarvo on riittävän suuri ja se kuivataan riittävän hyvin.

Erillispoltolla saadaan myös ravinteista fosforia talteen poltossa syntyvästä tuhkasta. Fosfori joudutaan kuitenkin monesti ottamaan talteen erillisellä tuhkan jatkokäsittelyllä, tuhkan sisältämät raskasmetallit voivat olla esteenä sen suoralle hyödyntämiselle. Jatkokäsittely sitoo kuitenkin energiaa ja mahdollisesti myös kemikaaleja, joten sen kannattavuus riippuu talteen otetun fosforin arvosta. Kirjallisuuskatsauksessa selvisi myös, että ravinteista typpeä ei voida ottaa suoraan poltosta talteen, mutta osa lietteen sisältämästä typestä voidaan ottaa lietteen polttoa edeltävästä termisestä kuivauksesta talteen.

Muista termisistä menetelmistä työssä tutkittiin tarkemmin lietteen yhteispoltto, kaasutus, pyrolyysi ja märkähiilto. Muutamia muita vielä konseptiasteella olevia käsittelymenetelmiä tuotiin myös lyhyemmin esille. Lietteiden yhteispoltton ja kaasutuksen todettiin hävittävän lietteen sisältämät haitalliset ainesosat tehokkaasti ja niillä voi myös tuottaa energiaa. Ongelmana yhteispoltolla on erillispolttoon verrattuna fosforin talteenoton kannattamattomuus tuhkasta. Kaasutuksen ongelmia todettiin olevan polttoa monimutkaisempi prosessi ja vähäinen tutkimus. Pyrolyysillä ja märkähiiltoa on tutkittu ja pilotoitu maailmalla kaasutusta enemmän, mutta ongelmana molemmilla on vielä tällä hetkellä lopputuotteena syntyvän kiinteän hiilijakeen epävarmat markkinat. Märkähiillon todettiin olevan myös riittämätön hävittämään kaikkia lietteen sisältämiä haitallisia ainesosia, mutta toisaalta märkähiilto on nähty enemmän lietteiden esikäsittelymenetelmänä termisen kuivauksen tilalle kuin varsinaisena loppukäsittelymenetelmänä. Ravinteista sekä typen että fosforin talteenotto todettiin mahdolliseksi märkähiillolla. Kirjallisuustarkastelusta jatkotutkimukseksi jäi muiden kuin termisten menetelmien tarkastelu lietteiden käsittelyyn, esimerkiksi erilaisia kemiallisia menetelmiä on maailmalla kehitetty.

Työssä esiteltiin maailmalla kehitettyjä teknologioita puhdistamolietteiden termiseen käsittelyyn. Teknologioiden esittelyyn pyrittiin ottamaan erillispoltosta, kaasutuksesta, pyrolyysistä ja märkähiillosta jokaisesta useampi kehitetty teknologia esille. Esille tuoduista teknologioista työssä keskityttiin tarkemmin Endev Oy:n kehittämään Endev-teknologiaan, joka on erillispolttomenetelmä puhdistamolietteille. Työn toisena tavoitteena oli tarkastella Endev-teknologiaa prosessimallin avulla. Prosessimalli kehitettiin IPSEpro-ohjelmalla ja sillä pyrittiin tarkastelemaan teknologiaa ensin skaalaustarkasteluna perustapauksen skaalaamisessa kahteen suurempaan kokoluokkaan. Myös joitakin herkkyystarkasteluja pystyttiin tekemään mallin avulla.

Työn toinen tavoite saatiin täytettyä työssä osittain. Endev-teknologiaa pystyttiin tarkastelemaan mallilla, mutta tulosten luotettavuudesta ei voitu olla täysin varmoja. Mallilla yritettiin simuloida ensin Endev-teknologian perustapausta, joka oli olemassa oleva Endev-teknologian lietteen erillispolttolaitos Rovaniemellä. Mallia ei saatu vastaamaan täysin Rovaniemen laitoksen tasetta erityisesti prosessin massavirtojen ja prosessista ulos saatavan lämpötehon suhteen. Ongelmien syyksi pohdittiin mallin yksinkertaistuksia todelliseen prosessiin verrattuna ja IPSEpro-ohjelman rajoittuneisuutta Endev-teknologian kaltaiselle tyyppillisistä voimalaitosprosesseista poikkeavalle prosessille. Toisaalta laitosmittaukset pitävät aina sisällään mittausvirheitä ja mallin tulokset todettiin kuitenkin vertailukelpoisiksi todellisen prosessin arvoihin nähden. Mallilla suoritettiin alkuperäisen suunnitelman mukaan skaalaustarkastelu perustapauksen eli Rovaniemen laitoksen kokoluokan kasvattamisesta kahteen suurempaan kokoluokkaan. Herkkyystarkasteluista mallilla pystyttiin suorittamaan lietteen koostumusta (kuiva-ainepitoisuus, tuhkapitoisuus ja orgaanisen aineksen koostumus) koskevia tarkasteluita, mutta syvällisempiä tarkasteluja lämmönsiirtoon liittyen jouduttiin jättämään työstä pois. Mallin todettiin olevan kuitenkin riittävän luotettava alkuarvojen laskentaan Endev-teknologian perustarkasteluille. Jatkotutkimuksena Endev-teknologian tarkastelusta voitaisiin suositella prosessimallin tekemistä teknologiaan paremmin soveltuvalla ohjelmalla ja uuden mallin pohjalta tehtävät luotettavimmat ja syvällisemmät tarkastelut.

## LÄHTEET

Alakangas Eija & Hurskainen Markus & Laatikainen-Luntama Jaana & Korhonen Jaana. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT. 229 s. VTT Technology 258. ISBN: 978-951-38-8419-2

Buttmann M. 2019. Industrial scale plant for sewage sludge treatment by hydrothermal carbonization in Jining/China and phosphate recovery by TerraNova® Ultra HTC process. 5 s. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: <https://www.aquaenviro.co.uk/wp-content/uploads/2018/04/Marc-Buttmann-final.doc.pdf>

C-Green. 2020a. OxyPower HTC. [Verkkosivu]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: <https://www.c-green.se/oxypower-htc>

C-Green. 2020b. Sewage Sludge. [Verkkosivu]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: <https://www.c-green.se/sewage-sludge>

C-Green. 2020c. Sustainability. [Verkkosivu]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: <https://www.c-green.se/sustainability>

Durdevic Dinko & Blecich Paolo & Zeljko Juric. 2019. Energy Recovery from Sewage Sludge: The Case Study of Croatia. *Energies* 12 (10): 1927. doi: 10.3390/en12101927

Econet Group. 2018. Suotonauhapuristin Dewa NPD-XL. [Verkkosivu]. [Viitattu 15.1.2021]. Saatavissa: <https://www.econetgroup.fi/fi/group-tuotteet/lietteenkasittely/suotonauhapuristin/suotonauhapuristin-mpd-xl>

Eisenmann. 2017. Thermal treatment of sewage sludge in the Pyrobustor® - Two exemplary applications. 8 s. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavissa: [https://cdn2.hubspot.net/hub/133998/file-1576391265-pdf/PDF/Pyrobustor\\_en.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hub/133998/file-1576391265-pdf/PDF/Pyrobustor_en.pdf)

Eisenmann. 2021. Waste Disposal: Pyrobustor. [Verkkosivu]. [Viitattu 29.1.2021].  
Saatavissa: <https://www.eisenmann.us.com/products-and-services/environmental-technology/waste-disposal/pyrobustor>

Endev. 2018. Lannoitteiden raaka-aineita lietteitä polttamalla. 15 s. [Verkkodokumentti].  
[Viitattu 2.2.2021]. Saatavissa:  
[https://www.oamk.fi/c5/files/4415/1844/0687/Endev\\_Tuomo\\_Ronkko.pdf](https://www.oamk.fi/c5/files/4415/1844/0687/Endev_Tuomo_Ronkko.pdf)

ESPP (European Sustainable Phosphorus Platform). 2019. ECSM 2019: European  
Conference on Sludge Management. 54 s. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.2.2021].  
Saatavissa: <https://www.slideshare.net/NutrientPlatform/ecsm2019-european-conference-on-sludge-management>

Keränen Timo. 2018. Puhdistamolietteellä kasvatettu ruoka ei mene enää kaupaksi -  
kuluttaja ei halua syödä viemäriin laskemiaan aineita. [Uutinen 7.4.2018]. [Viitattu  
9.2.2021]. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10148145>

KOPF SynGas. 2020a. SynGas Auxiliary Firing Module. [Verkkosivu]. [Viitattu  
29.1.2021]. Saatavissa: <https://kopf-syngas.de/en/syngas-auxiliary-firing-module/>

KOPF SynGas. 2020b. SynGas sewage sludge gasification plant in Balingen.  
[Verkkosivu]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: <https://kopf-syngas.de/en/syngas-sewage-plant-in-balingen/>

KOPF SynGas. 2020c. SynGas sewage sludge gasification plant in Mannheim.  
[Verkkosivu]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: <https://kopf-syngas.de/en/syngas-sewage-plant-in-mannheim/>

KOPF SynGas. 2020d. SynGas sewage sludge gasification plant in Koblenz. [Verkkosivu].  
[Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: <https://kopf-syngas.de/en/syngas-sewage-plant-in-koblenz/>

KOPF SynGas. 2021a. SynGas CHP Module. [Verkkosivu]. [Viitattu 29.1.2021].  
Saatavissa: <https://kopf-syngas.de/en/syngas-chp-module/>

KOPF SynGas. 2021b. SynGas Heat Module. [Verkkosivu]. [Viitattu 29.1.2021].  
Saatavissa: <https://kopf-syngas.de/en/syngas-heat-modul-2/>

Kouvolan Vesi. 2013. Teollisuuden jätevedet. [Verkkosivu]. [Viitattu 22.12.2020].  
Saatavissa: <https://kouvolanvesi.fi/teollisuusjatevedet/>

Küttner. 2020. Küttner Martin Technology GmbH resumes Outotec activities. [Uutinen  
29.5.2020]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: [https://www.kuettner.com/en/news/kuttner-  
martin-technology-gmbh-resumes-outotec-activities](https://www.kuettner.com/en/news/kuttner-martin-technology-gmbh-resumes-outotec-activities)

Luonnonvarakeskus (LUKE). 2019. Puhdistamolietteiden peltokäytön riskit pieniä, mutta  
jatkotutkimuksia tarvitaan. [Tiedote 30.1.2019]. [Viitattu 9.2.2021]. Saatavissa:  
[https://www.epressi.com/tiedotteet/tiede-ja-tutkimus/puhdistamolietteiden-peltokayton-  
riskit-pienia-mutta-jatkotutkimuksia-tarvitaan.html](https://www.epressi.com/tiedotteet/tiede-ja-tutkimus/puhdistamolietteiden-peltokayton-riskit-pienia-mutta-jatkotutkimuksia-tarvitaan.html)

Lohiniva Elina & Mäkinen Tuula & Sipilä Kai. 2001. Lietteiden käsittely – Uudet ja  
käytössä olevat tekniikat. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 146 s. VTT  
Research Notes 2081. ISBN: 951-38-5796-4

Manninen Kaisa & Laitinen Jyrki. 2016. Jätevesilietteen käsittelyn laskentamallit:  
Biokaasun tuotanto, Lietteen poltto, Lietteen kompostointi. Suomen ympäristökeskus  
SYKE. 27 s. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 27.1.2020]. Saatavissa:  
[http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BA5EA912E-4539-445E-AE17-  
1A1AA198BCD2%7D/126747](http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BA5EA912E-4539-445E-AE17-1A1AA198BCD2%7D/126747)

Metcalf & Eddy. 2003. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. New York:  
McGraw-Hill. 1 819 s. 4. painos. ISBN: 0-07-041878-0



Mikola Anna. 2018. Viemärointi ja jätevedenpuhdistus -luento. Aalto University, School of Engineering. 26 s. [Verkkodokumentti 6.11.2018]. [Viitattu 21.12.2020]. Saatavissa: [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/736218/mod\\_folder/content/0/Viem%C3%A4r%C3%B6inti\\_ja\\_j%C3%A4tevedenpuhdistus\\_luento\\_2018.pdf?forcedownload=1](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/736218/mod_folder/content/0/Viem%C3%A4r%C3%B6inti_ja_j%C3%A4tevedenpuhdistus_luento_2018.pdf?forcedownload=1)

Motiva. 2018a. Energiatehokas lietteen kuivaus. Energiatehokas vesihuoltolaitos 1/2018. 6 s. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 14.1.2021]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/13594/ENERGIATEHOKAS\\_LIETTEEN\\_KUIVAUS.pdf](https://www.motiva.fi/files/13594/ENERGIATEHOKAS_LIETTEEN_KUIVAUS.pdf)

Motiva. 2018b. Energiatehokas lietteen jatkojalostus. Energiatehokas vesihuoltolaitos 10/2018. 11 s. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 15.1.2021]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/15393/TIETOKORTTI\\_ENERGIATEHOKAS\\_LIETTEEN\\_JATKOJALOSTUS.pdf](https://www.motiva.fi/files/15393/TIETOKORTTI_ENERGIATEHOKAS_LIETTEEN_JATKOJALOSTUS.pdf)

NEVE (Napapiirin Energia ja Vesi). 2019. Lietteenpolttolaitoksen koekäyttö alkaa Rovaniemellä. [Uutinen 11.7.2019]. [Viitattu 2.2.2021]. Saatavissa: <https://www.neve.fi/tietoa-meista/uutiset/lietteenpolttolaitoksen-koekaytto-alkaa-rovaniemella>

Outotec. 2015a. Incineration Plants for Municipal and Industrial Sludge. 4 s. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: [https://www.outotec.com/globalassets/products/energy-production/outotec\\_incineration\\_plants\\_for\\_municipal\\_and\\_industrial\\_sludge\\_eng\\_web.pdf](https://www.outotec.com/globalassets/products/energy-production/outotec_incineration_plants_for_municipal_and_industrial_sludge_eng_web.pdf)

Outotec. 2015b. Sewage sludge incineration plant to Grosswilfersdorf, Austria. 2 s. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavissa: [https://www.outotec.com/globalassets/references/energy/ote\\_outotec\\_energy\\_case\\_study\\_growido\\_eng\\_web.pdf](https://www.outotec.com/globalassets/references/energy/ote_outotec_energy_case_study_growido_eng_web.pdf)

Outotec. 2016. Sustainable Sewage Sludge Incineration for Zürich Canton. 4 s. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: [https://www.outotec.com/globalassets/products/energy-production/ote\\_outotec\\_sustainable\\_sewage\\_sludge\\_incineration\\_for\\_zurich\\_canton\\_eng\\_web.pdf](https://www.outotec.com/globalassets/products/energy-production/ote_outotec_sustainable_sewage_sludge_incineration_for_zurich_canton_eng_web.pdf)

Peltola Petteri & Myöhänen Kari & Laasonen Arttu & Hyppänen Timo. 2021. An advanced process for thermal treatment of municipal sewage sludge. 29th European Biomass Conference and Exhibition Proceedings.

ProAgria. 2013. Puhdistamolietteen käyttö maataloudessa. Vesilaitosyhdistys. 50 s. ISBN 978-952-6697-91-8

Pyreg. 2020a. P500 sludge. [Verkkosivu]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: <https://www.pyreg.de/p500-klaerschlammm/?lang=en>

Pyreg. 2020b. P1500 sludge. [Verkkosivu]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: <https://www.pyreg.de/p1500-klaerschlammm/?lang=en>

Pyreg. 2020c. References. [Verkkosivu]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: <https://www.pyreg.de/referenzen/?lang=en>

Pöyry Finland. 2019. Puhdistamolietteiden termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen. Helsinki: Vesilaitosyhdistys. 125 s. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 56. ISBN 978-952-6697-60-5

Sludge2energy. 2018. Concepts of Thermal Sewage Sludge Utilisation. 7 s. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: [https://www.sludge2energy.de/fileadmin/huber-sludge2energy/documents/pro\\_s2e\\_image\\_en.pdf](https://www.sludge2energy.de/fileadmin/huber-sludge2energy/documents/pro_s2e_image_en.pdf)

Sludge2energy. 2021. HUBER & WTE: Worldwide References. [Verkkosivu]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: <https://www.sludge2energy.de/references.html>

Stora Enso. 2019. Vaikeasti käsiteltävästä jätteestä puhtaaksi bioenergiaksi. [Uutinen 10.12.2019]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: <https://www.storaenso.com/fi-fi/newsroom/news/2019/12/from-hard-to-handle-waste-to-pure-bioenergy>

Strömberg Birgitta. 2006. Fuel Handbook. Tukholma: Värmeforsk Service AB. 42 s. Värmeforsk 971, Project Värmeforsk F4-324. ISSN 0282-3772.

Säylä Jonne. 2015. Yhdyskuntien jätevesien puhdistus 2013. Helsinki: Suomen ympäristökeskus SYKE. 26 s. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 34/2015. ISBN: 978-952-11-4531-5

TerraNova Energy. 2015. Projects. [Verkkosivu]. [Viitattu 29.1.2021]. Saatavissa: <https://terranova-energy.com/en/projects/>

Tittesz Reka & Neumann Uwe. 2011. Thermal Treatment of Sewage Sludge - Pyrobustor. s. 809–824. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 5.2.2021]. Saatavissa: [https://www.vivis.de/wp-content/uploads/WM2/2011\\_WM\\_809\\_824\\_Neumann.pdf](https://www.vivis.de/wp-content/uploads/WM2/2011_WM_809_824_Neumann.pdf)

TNO Biomass and Circular Technologies. 2021. Phyllis2 database for (treated) biomass, algae, feedstocks for biogas production and biochar. [Verkkosivu]. [Viitattu 28.5.2021]. Saatavissa: <https://phyllis.nl/>

Tsybina Anna & Wuensch Christoph. 2018. Analysis of Sewage Sludge Thermal Treatment Methods in the Context of Circular Economy. Detritius 02 / June 2018: 3-15. doi: 10.31025/2611-4135/2018.13668

Turun seudun puhdistamo. 2016a. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon toiminta. [Verkkosivu]. [Viitattu 28.12.2020]. Saatavissa: <https://www.turunseudunpuhdistamo.fi/toiminta>

Turun seudun puhdistamo. 2016b. Välppäys ja hiekanerotus. [Verkkosivu]. [Viitattu 28.12.2020]. Saatavissa: <https://www.turunseudunpuhdistamo.fi/valppays-ja-hiekanerotus>

Turun seudun puhdistamo. 2016c. Esiselkeytys. [Verkkosivu]. [Viitattu 28.12.2020]. Saatavissa: <https://www.turunseudunpuhdistamo.fi/esiselkeytys>

Turun seudun puhdistamo. 2016d. Ilmastus. [Verkkosivu]. [Viitattu 28.12.2020]. Saatavissa: <https://www.turunseudunpuhdistamo.fi/ilmastus>

Turun seudun puhdistamo. 2016e. Jälkiselkeytys. [Verkkosivu]. [Viitattu 28.12.2020]. Saatavissa: <https://www.turunseudunpuhdistamo.fi/jalkiselkeytys>

Turun seudun puhdistamo. 2016f. Hiekkasuodatus. [Verkkosivu]. [Viitattu 29.12.2020]. Saatavissa: <https://www.turunseudunpuhdistamo.fi/hiekkasuodatus>

Turun seudun puhdistamo. 2016g. Ohitusvesienkäsittely. [Verkkosivu]. [Viitattu 29.12.2020]. Saatavissa: <https://www.turunseudunpuhdistamo.fi/ohitusvesienkasittely>

Tyagi Vinay Kumar & Lo Shang-Lien. 2013. Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25 (2013): 708–728. doi: 10.1016/j.rser.2013.05.029

Waterleau. 2014. Waste: HYDROGONE® horizontal disc dryer. [Verkkosivu]. [Viitattu 20.1.2021]. Saatavissa: <https://www.waterleau.com/en/technologies/waste/hydrogone-horizontal-disc-dryer>

Zhenshan Ke. 2016. The Application Research on Sludge Lime Drying Process for Municipal Wastewater Treatment Plant. First Greek-Chinese Forum on the Environment, TEE, 3-4/12/2009, Athens. 7 s. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.5.2021]. Saatavissa: [http://library.tee.gr/digital/m2470/m2470\\_zhenshan.pdf](http://library.tee.gr/digital/m2470/m2470_zhenshan.pdf)

## Yhteenvedo puhdistamolietteen termisistä käsittelymenetelmistä

	Terminen kuivaus	Erillispoltto	Yhteispoltto	Kaasutus	Pyrolyysi	Märkähiilto (HTC)
<b>Syöte</b>	Mekaanisesti kuivattu mädättämätön tai mädätetty liete (15–40 % TS)	Termisesti kuivattu mädättämätön tai mädätetty liete (40–50 % tai 60–95 % TS)	Mekaanisesti tai termisesti kuivattu mädättämätön tai mädätetty liete, muut polttoaineet	Termisesti hyvin kuivaksi kuivattu mädättämätön tai mädätetty liete (75–95 % TS)	Termisesti hyvin kuivaksi kuivattu mädättämätön tai mädätetty liete (80–95 % TS), mahdollisesti muita polttoaineita (puu)	Kuivaamaton mädättämätön tai mädätetty liete (8–15 % TS)
<b>Lämpötila</b>	70–180 °C	850–950 °C	850–950 °C (voimalaitos) 900–1 450 °C (sementtiuni)	800–900 °C	450–650 °C	180–250 °C
<b>Lopputuote</b>	Termisesti kuivattu liete (40–95 % TS)	Tuhka	Tuhka	Tuotekaasu, tuhka	Pyrolyysihili (myös pyrolyysiöljy teoriassa, mutta öljy poltetaan yleensä prosessissa kaasujen mukana)	Kuiva HTC-hiili (50–70 % TS)
<b>Kokonaiskustannukset</b>	40–60 €/t (30 % TS)	100–120 €/t (30 % TS)	50–100 €/t (30 % TS)	100–130 €/t (30 % TS)	55–75 €/t (30 % TS)	50–65 €/t (30 % TS)
<b>Viipymäaika</b>	30–120 min	2–10 sekuntia	2–10 sekuntia (voimalaitos) 30 min (sementtiuni)	Muutama sekunti	15–30 min	2–5 tuntia
<b>Orgaanisten haitta-aineiden, lääkeaineiden ja mikrobuuvien poisto</b>	Ei	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Osittain kyllä, puutteellista
<b>Energian talteenotto</b>	Ei	Kyllä (energian tuotanto laitoksen ulkopuolelle)	Kyllä (energian tuotanto laitoksen ulkopuolelle)	Kyllä (energian tuotanto laitoksen ulkopuolelle tuotekaasun poltolla)	Osittain kyllä (laitos lämpöomavarainen, mutta ei energian tuotantoa laitoksen ulkopuolelle)	Osittain kyllä (laitos voi olla lämpöomavarainen, mutta saattaa tarvita myös ulkopuolista lämpöä, ei energian tuotantoa laitoksen ulkopuolelle)
<b>Ravinteiden talteenotto</b>	Fosfori ja typpi: osittain kyllä (kuivattu liete ravinnerikasta, mutta sisältää haitta-aineita) Typpi: osittain kyllä (poistokaasujen käsittelystä)	Fosfori: kyllä (tuhka fosforirikasta) Typpi: ei	Fosfori: Ei (voimalaitos: tuhka fosforiköyhää) (sementtiuni: fosfori sementin sekaan) Typpi: Ei	Fosfori: kyllä (tuhka fosforirikasta) Typpi: Ei	Fosfori ja typpi: kyllä (pyrolyysihilin ravinnerikasta, suora käyttö lannoitteena)	Fosfori: kyllä (saostus reaktiiveteen prosessin aikana) Typpi: kyllä (reaktiivisen typpipitoista)
<b>Hyvät puolet</b>	+soveltuvuus pieneenkin kokoluokkaan +hukkalämmön hyödyntäminen (matala prosessilämpötila)	+haitta-aineiden tuhoutuminen +energiaomavaraisuus ja energian tuotanto	+haitta-aineiden tuhoutuminen +mahdollisuus hyödyntää olemassa olevia laitoksia +mineraalien hyödyntäminen ja fossiilisten polttoaineiden korvaaminen sementin valmistuksessa	+haitta-aineiden tuhoutuminen +kaasumootoriin soveltuvan kaasun tuotanto (energian tuotanto hyvällä hyötysuhteella)	+haitta-aineiden tuhoutuminen +hyödyllisen pyrolyysihilin tuotanto	+termistä kuivausta ei tarvita esikäsitteilyä +hukkalämmön hyödyntäminen (matala prosessilämpötila) +soveltuvuus pieneenkin kokoluokkaan
<b>Huonot puolet</b>	-korkea energiankulutus -paloriskit, hajuhaitat -poistokaasujen käsittelytarve -ei poista haitta-aineita	-suuri laitoskoko etenkin leijupetiteknikalla (poislukien Endev-teknologia) -terminen kuivaus esikäsitteilyä pakollinen -monesti tuhkan kelpaamattomuus sellaisenaan lannoitteeksi (talteenotokäsittely pakollinen)	-olemassa olevien laitosten kapasiteettien niukkuus -haasteet laitoksen operoinnissa lietteen alhaisen lämpöarvon takia -monesti terminen kuivaus esikäsitteilyä pakollinen -ravinteiden menetys	-polttoa monimutkaisempi prosessi -terminen kuivaus esikäsitteilyä pakollinen -monesti tuhkan kelpaamattomuus sellaisenaan lannoitteeksi (talteenotokäsittely pakollinen)	-haitalliset metallit ja epäpuhtaudet pyrolyysihiliessä -terminen kuivaus esikäsitteilyä pakollinen -pyrolyysihilin epävarmat markkinat vielä tällä hetkellä (lainsäädännön puute)	-haitta-aineiden tuhoutuminen puutteellista -reaktiivisen käsittely pakollista -lopputuotteen käyttökelvottomuus niukkuus vielä tällä hetkellä (lainsäädännön puute)

Endev-teknologia skaalaustarkastelun taseet

