

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Minna-Maria Tukiainen

YHDYSKUNTAJÄTTEEN MEKAANISEN EROTTELUN EROTUSTEHOKKUUS

Tarkastajat

Professori, TkT Mika Horttanainen
Tutkijatohtori, TkT Jouni Havukainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Minna-Maria Tukiainen

Yhdyskuntajätteen mekaanisen erottelun erotustehokkuus

Diplomityö

2015

114 sivua, 27 kuvaa, 16 taulukko, 8 liitettä

Tarkastajat: Professori, TkT Mika Horttanainen
Tutkijatohtori, TkT Jouni Havukainen

Hakusanat: Yhdyskuntajäte, materiaalin kierrätys, mekaaninen erottaminen, erotustehokkuus, syntypaikkalajittelu

Keywords: Municipal solid waste, material recycling, mechanical separation, efficiency of separation, source separation

EU:n jätehierarkia asettaa jätteenkäsittelyssä materiaalien hyötykäytön energiahyötykäytön edelle. EU on asettanut korkeat tavoitteet jätteenkierrätykseen, 50 painoprosenttia kotitalousjätteestä on ohjattava kierrätykseen vuoteen 2020 mennessä. Suomessa kaatopaikoista on pyritty eroon lisäämällä jätteenpolttokapasiteettia. Jätteiden hyödyntämisen osalta tilanne Suomessa on hyvä, mutta kierrätystavoitteiden täyttyminen nykyisillä toimilla vaikuttaa epätodennäköiseltä.

Tässä työssä selvitetään mitä mekaanisia jätteen erottelumenetelmiä maailmalla on käytössä ja kuinka tehokkaita ne ovat. Työn tavoitteena on tutkia voitaisiinko kierrätystä Suomessa tehostaa yhdyskuntajätteen mekaanisella käsittelyllä. Kirjallisuusselvityksen lisäksi työssä on simuloitu mekaanisia erotteluketjuja ja verrattu niillä saatuja tuloksia Suomen syntypaikkalajittelun tasoon. Tämän tutkimuksen perusteella, mikään yksittäinen mekaaninen erottelumenetelmä ei riittävän tehokas erottelemaan kierrätettäviä materiaaleja yhdyskuntajätteestä. Mekaanisia erottelumenetelmiä tulee yhdistää lajittelulinjastoiksi, joiden optimoiminen on monen tekijän summa. Lajittelulinjaston suunnitteluun vaikuttavat muun muassa lähtömateriaalin laatu ja lopputuotteiden käyttötarkoitukset. Yhdyskuntajätteen sisältämä biojäte likaa herkästi muut jätteet ja vaikeuttaa mekaanisesti eroteltujen jätejakeiden uudelleenkäyttöä. Biojätteen poistaminen muiden jätteiden joukosta olisi ensiarvoisen tärkeää mekaanisen erotuksen tehokkuuden kannalta. Mekaaniset erotteluketjut poistavat tehokkaasti biojätettä ja metalleja, mutta lasin ja kuitujen osalta erotusketjujen tehokkuudet jäivät alhaisiksi. Muovien osalta mekaaninen erottelu voi parhaimmillaan olla erittäin tehokasta, toisaalta vaatimukset lähtömateriaalin laadulle ovat suuret. Muovien osalta syntypaikkalajittelun ja mekaanisen erottelun yhtäaikainen tehostaminen voisi tarjota ratkaisun kierrätysasteen nostamiseen.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Degree Programme in Environmental Technology

Minna-Maria Tukiainen

Efficiency of mechanical separation of municipal solid waste

Master's Thesis

2015

114 pages, 27 figures 16 tables and 8 appendices

Examiners: Professor, D.Sc.(Tech.) Mika Horttanainen
D.Sc.(Tech.) Jouni Havukainen

Keywords: Municipal solid waste, material recycling, mechanical separation, efficiency of separation, source separation

EU's waste hierarchy put material recycling before use of recovery waste for energy. EU has set a high target for waste recovery: 50% of the household waste should be directed to material recycling by the year 2020. In Finland, increase of the incineration capacity has been a way to reduce land filling. It causes a situation where the recovery rate in Finland is good, but it seems that Finland doesn't meet the recycling target this way.

The purpose of this study is to find out what mechanical waste separation processes are used in another countries and how efficient they are. The target of this work is to look for possibilities where the mechanical separation could be a way to increase the municipal solid waste-recycling rate in Finland. This work includes a literature research and simulations of the separation processes. Results from the simulated processes are compared against the source separation rates of the Finland.

According to this study, any single mechanical separation equipment is not efficient enough to separate the recycling material out of the mixed municipal waste. Multiple mechanical separation equipments have to be chained together for the separation processes. Optimization of the created processes is a sum of many factors. For example, the original waste quality or the end product re-use has to be taken account when planning the separation process. The municipal solid waste contains bio waste, which contaminates the other components of the waste and makes the re-use of the recycled component more difficult. Removing bio waste from the other wastes is important because it affects the separation efficiency. Mechanical separation processes remove efficiently bio waste and metals, but the separation efficiency of the glass and the fiber stays low. The separation efficiency of the plastic might be very high but it requires that the quality of the original waste is good. Increasing the efficiency of the mechanical separation and of the source separation at the same time can provide an effective way to increase the plastics recycling rate.

ALKUSANAT

Työ on tehty osana ARVI (Material Value Chain, Materiaalien arvovirrat)-tutkimusohjelmaa. Haluan kiittää työn tarkastajia professori Mika Horttanaista ja tutkija-tohtori Jouni Havukaista pääsystä mukaan ajankohtaiseen tutkimusohjelmaan ja saadessani tehdä diplomityöni ajankohtaisesta ja tärkeästä aiheesta, sekä ohjauksesta työn eri vaiheissa. Lisäksi haluan kiittää Pasi Vahannetta ja muuta Åf Consult yrityksen henkilöstöä mahdollisuudesta tehdä diplomityöni hyvässä työyhteisössä.

Suuri kiitos kuuluu Teemu Tukiaiselle, joka on auttanut minua työn eri vaiheissa niin kannustamalla kuin käytännön neuvoilla sekä muulle perheelle tuesta työn eri vaiheissa.

Espoossa 25.5.2015

Minna Tukiainen

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	10
1.1	TYÖN TAUSTA	10
1.2	TYÖN TAVOITTEET.....	11
2	JÄTTEIDEN SYNTYPAIKKALAJITTELU SUOMESSA	13
2.1	JÄTTEIDEN SYNTYPAIKKALAJITTELU	13
2.2	SYNTYPAIKKALAJITTELUUN SOPIVAT JÄTEJAKEET JA SYNTYPAIKKALAJITTELUN TEHOKKUUS	14
2.2.1	<i>Biojäte</i>	<i>14</i>
2.2.2	<i>Keräyspaperi</i>	<i>14</i>
2.2.3	<i>Kuitupakkaukset ja lasi.....</i>	<i>15</i>
2.2.4	<i>Metallipakkaukset, muut metallit ja SER.....</i>	<i>16</i>
2.2.5	<i>Muovipakkaukset.....</i>	<i>17</i>
2.2.6	<i>Suomalainen sekajäte ja syntypaikkalajittelun tehokkuus</i>	<i>18</i>
2.3	JÄTTEIDEN KÄSITTELY SUOMESSA.....	22
3	JÄTTEEN MEKAANISET EROTTELUMENETELMÄT	25
3.1	KOKOON PERUSTUVAT EROTTIMET	25
3.1.1	<i>Täryseula</i>	<i>25</i>
3.1.2	<i>Rumpuseula</i>	<i>27</i>
3.1.3	<i>Kiekkoseula.....</i>	<i>32</i>
3.2	TIHEYTEEN JA KAPPALEEN MUOTOON PERUSTUVAT EROTTIMET	33
3.2.1	<i>Ilmaerotin</i>	<i>33</i>
3.2.2	<i>Ballistinen erotin</i>	<i>38</i>
3.2.3	<i>Kelluttaminen.....</i>	<i>41</i>
3.2.4	<i>RecGlass</i>	<i>42</i>
3.2.5	<i>Pyörivä kartio</i>	<i>44</i>
3.2.6	<i>Leijupetierotin</i>	<i>45</i>
3.3	SÄHKÖÖN JA MAGNEETTISUUTEEN PERUSTUVAT EROTTIMET	49
3.3.1	<i>Magneettierotin.....</i>	<i>49</i>
3.3.2	<i>Pyörrevirtaerotin.....</i>	<i>53</i>
3.3.3	<i>Sähköstaattiset erottimet</i>	<i>56</i>
3.4	OPTINEN EROTTAMINEN	62
3.5	MUUT EROTTELUUN LIITTYVÄT MENETELMÄT	65
3.5.1	<i>Jätteen palakoon pienentäminen.....</i>	<i>65</i>
3.5.2	<i>Tiivistäminen ja kuivaaminen.....</i>	<i>66</i>
3.6	MEKAANISTEN EROTTELUMENETELMIEN ENERGIANKULUTUS	68

4	MEKAANISTEN EROTTELUPROSESSIEN LUOMINEN.....	70
4.1	EROTTELUKETJUN TARKOITUS.....	70
4.2	EROTTELUKETJUN SUUNNITTELUUN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT.....	71
4.2.1	<i>Lopputuotteiden laatu.....</i>	<i>71</i>
4.2.2	<i>Lähtömateriaali.....</i>	<i>74</i>
4.2.3	<i>Kustannusten ja ympäristönäkökohtien huomioiminen käsittelyketjujen suunnittelussa</i>	<i>76</i>
4.3	EROTUSTEHOKKUUDEN LASKEMINEN JÄTTEENKÄSITTELYPROSESSISTA	78
5	LASKENNALLISET ESIMERKIT JÄTTEENKÄSITTELYPROSESSEISTA	80
5.1	ESIMERKKITAPAUSTEN LÄHTÖTILANNE.....	80
5.2	MATERIAALIN KERÄYS POLTTOON MENEVÄN JÄTTEEN ESIKÄSITTELYNÄ	81
5.3	TEHOSTETTU MEKAANINEN EROTTelu, PÄÄPAINO HYÖDYNNETTÄVIEN JAKEIDEN KERÄYKSESSÄ	86
5.4	ERILLISKERÄTTY KIERRÄTYSJAE.....	96
5.5	ESIMERKKITAPAUSTEN LASKENNALLINEN ENERGIANKULUTUS.....	100
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO.....	102

LÄHTEET

LIITTEET:

LIITE I Suomalaisen sekajätteen koostumus ja jätemäärät Suomessa.

LIITE II REF Laatuluokat.

LIITE III Käytetyt talteenottokertoimet.

LIITE IV SciLab-koodi esimerkkitapaus 1.

LIITE V SciLab-koodit esimerkkitapaus 2.

LIITE VI Scilab-koodi esimerkkitapaus 3.

LIITE VII Materiaalivirrat esimerkkitapaus 1.

LIITE VIII Materiaalivirrat esimerkkitapaus 2.

SYMBOLILUETTELO

U	Lähtömateriaalin matriisi
X_i	Erotettu materiaali i
Y_i	Erotettu materiaali i
R_i	Talteenottokerroin jakeelle i
I	Yksikkömatriisi
E	Energiankulutus matriisi

Alaindeksit,

al	Alumiini
ball	Ballistinen erotin
ballseul	Ballistisen erottimen seulaverkko
dig	Mädätykseen
eddy	pyörrevirtaerotin
fe	Rauta
film	Film Vacuum-käsittely
ilma	Ilmaerotin
Kev	Kevyt jae
mag	Magneetti
nirMU	Muun muovin/ sekoitemuovi erotus NIR-menetelmällä.
nirPE	PE-muovin erotus NIR-menetelmällä
nirPET	PET-muovin erotus NIR-menetelmällä
nirPP	PP-muovin erotus NIR-menetelmällä
nirPS	PS-muovin erotus NIR-menetelmällä
OCC	Kartongin erotusseula
OptiC	Lasin erotus optisesti
poltto	Polttoon
Ras	Raskas jae
seulat	Seula alitteiden summa
tr	Rumpuseula

Lyhenneluettelo

EKJH	Etelä-Karjalan Jätehuolto
HDPE	Polyeteeni high density
HSY	Helsingin seudun ympäristöpalvelut-kuntayhtymä
LDPE	Polyeteeni low density
MIR	Middle Infrared
NIR	Near Infrared
PC	Polykarbonaatti
PET	Polyetyleenitereftalaatti
SER	Sähkö- ja elektroniikkaromu
PVC	Polyvinyylikloridi
PMC	Belgiassa kerättävä kierrätysjäte jae, joka sisältää muovია, metalleja ja kartonkia
POM	Polyasetaali
PP	Polypropeeni
PPE	Polyfenyylietteri
REF	Recovered fuel, kierrätyspolttoaine suomalaisen standardin mukaan
RFTF	Recovered factor transformation fuction,
RDF	Refuse-driven fuel, jäteperäinen polttoaine
SRF	Solid recovered fuel, kiinteä kierrätyspolttoaine eurooppalaisen standardin mukaan

Termit:

Biojäte:	Elintarvike, ruoka- ja puutarhajäte, hajoaa biologisesti
Biohajoavajäte:	Biologisesti hajoavaa jätettä, joka voi sisältää biojätteen lisäksi myös mm. pahvia, paperia ja puuta.
Yhdyskuntajäte:	Kotitalousjäte ja koostumukseltaan siihen rinnastettava jäte.

Sekajäte:	Sekalainen loppujäte, josta on ainakin osittain syntypaikkalajiteltu hyödynnettävät jakeet.
Erotustehokkuus:	Tarkoitetaan menetelmällä erotetun materiaalin suhdetta alkuperäiseen materiaalin määrään.
Puhtaus:	Tarkoitetaan halutun materiaalin osuutta erotetussa jakeessa.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Yksi suurista nyky-yhteiskunnan haasteista on jätteenkäsittely. Aiempi tapa käsitellä jätteet sijoittamalla ne kaatopaikoille ei enää ole hyväksyttävä menettely. Jätteenkäsittelyä ja hyödyntämistä on tutkittu paljon ja nykyisin jäte nähdään myös hyvänä raaka-aineena. Poliittinen tahto jätteenkäsittelyn parantamiseen on lisääntynyt ja lainsäädäntö on tiukentunut jätteenkäsittelyn osalta. EU on asettanut korkeat tavoitteet jätteiden hyötykäytölle. Tapoja kerätä ja hyödyntää jätettä on runsaasti ja usein onkin haasteellista selvittää tilanteeseen parhaiten sopiva menetelmä.

EU on esittänyt direktiivissään 2008/98/EY hyvinkin tiukkoja rajoituksia jätteenkäsittelylle. Direktiivin neljännessä artiklassa esitetään jätehierarkia. Hierarkiassa ensimmäisenä on jätteesynnyn ehkäiseminen, toisena jätteen uudelleen käyttö, kolmantena kierrätys materiaalina ja sen jälkeen jätteen hyödyntäminen energiantuotannossa. Vasta viimeisenä vaihtoehtona on jätteen loppusijoitus. (2008/98/EY.)

EU:n tavoitteena on päätyä tehokkaasti luonnonvaroja käyttäväksi kierrätysyhteiskunnaksi ja tästä johtuen jätedirektiivissä on annettu jäsenvaltioille tavoite, jonka mukaan tulee toimia. Tavoitteeksi on asetettu, että vuoteen 2020 mennessä kotitalouksista ja niihin rinnastettavista toiminnoista peräisin olevasta jättemateriaalista 50 painoprosenttia on ohjattava uudelleenkäyttöön tai kierrätykseen. Tämä koskee ainakin seuraavia jätteitä: lasi, metalli, muovi ja paperi. (2008/98/EY.) EU:ssa on suunnitteilla jätedirektiivin muutos, joka tulisi toteutuessaan kiristämään kierrätystavoitteita entisestään vuoden 2008 direktiivistä. Ehdotus kiristäisi kierrätysvaatimuksen yhdyskuntajätteen osalta 70 % :iin vuoteen 2030 mennessä ja samalla tiukentuisivat pakkausmateriaalien kierrätysvaatimukset. (Ympäristöministeriö, 2014.)

Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista (331/2013) määrää, että kaatopaikoille ei saa sijoittaa jätettä, jonka biohajoavan ja muun orgaanisen hiilen kokonaispitoisuus ylittää kymmenen prosenttia. Asetusta aletaan soveltamaan biohajoavan jätteen osalta 1.1.2016. (VNA

2.5.2013/331) Orgaanisen aineen sijoituskiellolla pyritään vaikuttamaan kaatopaikkojen ilmasto- ja vesistövaikutuksiin (Pfister, 2013). Orgaanisen aineksen kaatopaikkakielto ja EU:n kierrätystavoitteet asettavat suuria haasteita jätteenkäsittelylle. Jätteet on eroteltava tehokkaasti, jotta kierrätystavoitteet täyttyvät ja jäljelle jääneen jätteen koostumus täyttää valitun loppukäsittelytavan vaatimukset.

Jätettä voidaan ohjata kierrätykseen erottelemalla jäte syntypaikkalajitteluna, jolloin valmiiksi erotellut jättejakeet kuljetetaan jatkokäsittelyyn tai kierrätettävät jättejakeet voidaan erotella mekaanisesti suuremmasta jäte-erästä. Erilaisia mekaanisia erotusmenetelmiä on olemassa paljon, lisäksi niitä voidaan yhdistää erilaisiksi kokonaisuuksiksi. Tieto mekaanisen erottelun tehokkuudesta on hajanaista ja erilaisia menetelmiä sekä niiden yhdistelmiä on lukuisia.

1.2 Työn tavoitteet

Tämän työn tavoitteena on selvittää jätteiden syntypaikkalajittelun ja mekaanisen erottelun erotustehokkuutta ja verrata niitä toisiinsa. Yhdyskuntajätettä voidaan lajitella useilla eri tavoilla, muun muassa seulomalla tai magneettien avulla. Erilaiset erotusmenetelmät toimivat erilaisiin jätteisiin ja myös eroteltava jätteen koostumuksella on vaikutusta menetelmien toimintaan. Jätteen suunniteltu loppukäsittely asettaa vaatimuksia erottelulle. Tieto eri menetelmien tehokkuudesta on hajanaista ja lisähaastetta asiaan tuo erilaisten menetelmien yhdistäminen kokonaisuuksiksi.

Tämän työn tavoitteena on koota aiemmin julkaistua tietoa hyödyntäen yhteenveto erilaisen mekaanisten jätteenerottelumenetelmien tehokkuudesta ja prosessien yhdistelmistä sekä verrata mekaanisen erottelun ja syntypaikkalajittelun tehokkuutta. Lisäksi työssä selvitetään onko uusia aiempaa tehokkaampia mekaanisia erotusmenetelmiä kehitteillä. Työ suoritetaan kirjallisuuskatsauksena tieteellisiä artikkeleita hyödyntäen. Työssä on mukana myös tapausesimerkit laskelmineen. Esimerkkitapaukset kuvaavat kolmea erilaista lähestymistapaa erotella yhdyskuntajätteestä mekaanisesti kierrätykseen soveltuvia jakeita. Esimerkeissä lähtömateriaalina on käytetty suomalaista yhdyskuntajätettä.

Tämä työ on rajattu koskemaan yhdyskuntajätettä. Yhdyskuntajätteellä tarkoitetaan kotitalouksien jätettä sekä jätettä, joka on koostumukseltaan ja luonteeltaan siihen rinnastettavaa. Teollisuuden, maatalouden ja rakentamisen jätteet on jätetty pois tarkastelusta niiden erilaisen luonteen vuoksi.

2 Jätteiden syntypaikkalajittelu Suomessa

2.1 Jätteiden syntypaikkalajittelu

Jätteiden syntypaikkalajittelulla tarkoitetaan jätteenlajittelua, joka tapahtuu jätteen syntypaikalla, kuten kotitalouksissa, teollisuudessa tai kaupan alan toimipisteissä. Syntypaikkalajittelulla on tärkeä merkitys jätteenkäsittelyssä. Syntypaikkalajittelu on monelta osin yksinkertaisin menetelmä lajitella jätettä, vaikka siinäkin on omat haasteensa, jotka liittyvät usein kerätyn jätteen laatuun, keräyksen toteuttamiseen ja kustannusten jakamiseen.

Suomen jätteenkäsittely perustuu pitkälti syntypaikkalajitteluun. Jätteenkäsittelyssä on suuria alueellisia eroja. Suomessa on käytössä useita erilaisia syntypaikkalajitteluun perustuvia jätteiden käsittelytapoja. (Ajanko et al., 2005, 11.) Suomessa on 36 kuntien omistamaa jätelaitosta, lisäksi osa kunnista hoitaa jätehuoltoon liittyvät velvoitteet itsenäisesti (Jätelaitosyhdistys, 2014a). Alueelliset vaatimukset syntypaikkalajittelun jätteen laadusta vaihtelevat, johtuen erilaisista käsittelymenetelmistä. Alueelliset jätehuoltomääräykset määrittelevät syntypaikkalajittelussa käytetyn tason ja vaihtelu alueittain on suurta, lisäksi monessa paikassa eletään jatkuvan muutoksen tilassa. (Ajanko et al., 2005, 11.) Esimerkiksi pääkaupunkiseudulla kotitalouksista on kerätty energiajätettä mutta sen keräys loppuu vuonna 2016, sillä jätteen arinapoltto Vantaalla alkoi vuonna 2014 (Jätehuoltomääräykset HSY, 2012).

Syntypaikkalajittelulla voidaan erotella jätteestä biojäte, metallit, lasi, pahvi, paperi ja energiajäte sekä vaaralliset jätteet. Teollisuudessa, rakentamisessa ja kaupan alan toimipisteillä lajitellaan myös muita niillä syntyviä jättejakeita, kuten puu- tai vaatejätettä. Tuottajavastuuasetuksen mukaan esimerkiksi autonrenkaat ja sähköelektroniikkaromu tulee kerätä erikseen.

2.2 Syntypaikkalajitteluun sopivat jätejakeet ja syntypaikkalajittelun tehokkuus

2.2.1 Biojäte

Jätehuoltomääräykset edellyttävät yleensä biojätteen syntypaikkalajittelua. Toisilla alueilla, esimerkiksi Etelä-Karjalassa, jokaisella kiinteistöllä on oltava aina oma erilliskeräysastia tai komposti biojätteelle (*Etelä-Karjalan Jätehuoltomääräykset*, 2014). Sen sijaan Helsingin seudun ympäristöpalvelut - kuntayhtymän (HSY) alueella biojätteen keräys on pakollista vain, jos kiinteistöllä on vähintään kymmenen huoneistoa (*Jätehuoltomääräykset HSY*, 2012). Edellä esitetty vaatimusten ero näkyy alueiden sekajätteen koostumuksessa. Teirasvuon vuoden 2010 lajittelututkimuksessa Etelä-Karjalan jätehuollon alueella kävi ilmi, että sekajätteestä 15 – 37 % oli biojätettä. Suurimmillaan biojätteen määrä sekajätteen joukossa oli talvella. Tämä johtunee kotikompostoinnin vaikeutumisesta talviaikana. (Teirasvuo, 2011, 92) Kotikompostointi on yleistä Etelä-Karjalassa niin haja-asutusalueella kuin taajamissa. Tässä tutkimuksessa biojäte kattoi myös pehmopaperin (Teirasvuo, 2011, 8). Vastaavien jakeiden osuus HSY:n alueella sekajätteestä oli vuonna 2012 keskimäärin 35 %. Jos tarkastellaan HSY:n tutkimusta tarkemmin, huomataan merkittävä ero kiinteistöllä sijaitsevien asuntojen määrän mukaan. HSY:n alueella alle 10 asunnon kiinteistöillä ei ole velvoitetta biojätteen erilliskeräykseen. Alle 10 asunnon kiinteistöillä biojätettä kertyi sekajätteen joukkoon lähes kaksinkertaisesti asukasta kohden verrattuna tilanteeseen yli 10 asunnon yhtiöissä. (Pulkkinen, 2013, 17-19.)

2.2.2 Keräyspaperi

Jätelaki ja valtioneuvoston asetus keräyspaperin erilliskeräyksestä ja kierrätyksestä (528/2013) määrää Suomessa käytöstä poistetun paperin keräyksestä tuottajavastuun perusteella. Tuottajayhteisöjen on kerättävä käytöstä poistetut sanomalehdet, aikakauslehdet, toimistopaperit ja muut paperituotteet kiinteistöiltä. Paperit tulee kerätä kiinteistöiltä lukuun ottamatta pientalo- ja haja-asutusalueita, joihin tulee kuitenkin järjestää keräyspiste. Paperinkeräysastioiden tyhjentämisestä ei kiinteistöiltä saa periä maksua. Vuodesta 2002 asti on ollut voimassa määräys, että Suomessa myydystä ja kulutetusta paperista on kerättävä ja hyödynnettävä vähintään 75 %. (VNA27.6.2013/528.) Tavoite on saavutettu vuosittain.

tain ja vuonna 2012 keräysprosentti oli 88 % (Pirkanmaan ELY-keskus, 2013) Keräyspaperin osuus Etelä-Karjalan jätehuoltotutkimuksessa oli noin 2 % sekajätteen määrästä ja HSY:n alueella laskennallisesti 6 %. Etelä-Karjalassa paperin määrä sekajätteessä oli talvi-aikaan merkittävästi syksyä pienempi, tämä johtunee kiinteistöillä tapahtuvasta paperin polttamisesta. Etelä-Karjala on pientalovaltaista ja näin ollen kiinteistöillä on runsaasti omia tulisijoja. (Pulkkinen, 2013, 19; Teirasvuo, 2011, 90.) Kuluttajille helppo ja edullinen järjestelmä, jossa tuottaja vastaa jätehuollon järjestämisestä on ollut toimiva ratkaisu. Paperin keräys- ja hyödyntämisaste on ollut hyvä jo vuosien ajan.

2.2.3 Kuitupakkaukset ja lasi

Pakkausmateriaalit kuuluvat tuottajavastuuasetuksen piiriin. Pakkausten kierrätykseen vaikuttaa jätelain lisäksi valtioneuvoston asetus pakkauksista ja pakkausjätteestä (518/2014) sekä valtioneuvoston asetus juomapakkausten palautusjärjestelmistä (256/2013). Pakkausmateriaalien osalta keräys- ja kierrätystavoitteissa on vaihtelua ja niiden lajittelua ei ole tehty yksittäisille talouksille yhtä houkuttelevaksi kuin paperin syntypaikkalajittelua. Pakkausmateriaaleihin voidaan laskea kuuluvaksi kartonki- ja pahvipakkaukset, lasi- ja metallipakkaukset sekä muovipakkaukset (VNA 3.7.2014/518).

Kuitupakkausten osalta on säädetty, että kierrätysasteen on oltava 1.1.2016 vähintään 80 painoprosenttia tuottajittain ja kokonaisuudessaan vuonna 2020 kuitupakkauksia on kierrätettävä 5 % enemmän kuin vuonna 2012 (VNA 3.7.2014/518). Kuitupakkauksia kerätään keräyspisteillä sekä erilliskeräyksenä, esimerkiksi HSY:n alueella yli 10 huoneiston kiinteistöillä on oltava erilliskeräyspiste pahville 1.1.2014 alkaen. Tätä ennen kartonginkeräys on koskenut vain yli 20 huoneiston kiinteistöjä. (Jätehuoltomääräykset HSY, 2012.) Etelä-Karjalan alueella kartonginkeräystä on vaadittu 10 huoneiston kiinteistöiltä aiemminkin. HSY:n alueella sekajätteestä keräyspahvia on 8,6 % ja Etelä-Karjalassa 10 %. Erilliskeräysvelvoitteiden ero ei korostunut kartongin osalta samalla tavalla kuin biojätteen osalta. Asukasta kohden keräyskartongin määrässä sekajätteen seassa ei ollut merkittävää eroa kiinteistön koon mukaan. (Pulkkinen, 2013, 20.)

Lasipakkausten osalta kierrätystavoite on 60 % (Pirkanmaan ELY-keskus, 2014). Lasia kerätään kierrätyspisteillä ja suoraan suurilta kiinteistöiltä. HSY:n alueella oma lasin kerä-

ysastia on oltava kiinteistöillä, joilla on vähintään 20 huoneistoa. Sama raja on myös Etelä-Karjalan jätehuollon alueella. (Etelä-Karjalan Jätehuoltomääräykset, 2014, Jätehuoltomääräykset HSY, 2012) Lasipakkausten keräyksessä palautuspullojärjestelmä on ollut edelläkävijän roolissa. Suomessa on jo 50-luvulta lähtien kerätty uudelleen käyttöä varten lasipulloja. Palautuspullojen panttijärjestelmä on tehnyt pullojen kierrättämisestä kuluttajille kannustavaa. Lasin osuus sekajätteessä on HSY:n alueella keskimäärin 2,4 % ja Etelä-Karjalassa 2,5 % (Pulkkinen, 2013, 17; Teirasvuo, 2011, 112).

2.2.4 Metallipakkaukset, muut metallit ja SER

Metallipakkausten osalta kierrätysasteen on 1.1.2016 mennessä oltava 75 %. (VNA 3.7.2014/518). Poikkeuksena juomapakkaukset, jotka kuuluvat valtioneuvoston asetuksen juomapakkausten palautusjärjestelmästä piiriin ja joiden osalta kierrätysasteen on oltava 90 % (VNA27.6.2013/526). Yleisesti tiedetään, että metallit ovat kierrätyksen näkökulmasta tärkeä jae, sillä metalli kestää hyvin kierrätystä ja metallinkierrätys säästää merkittävästi luonnonvaroja. Poltettavan jätteen joukossa metallit voivat aiheuttaa ongelmia polttolaitoksille. Nykyisissä arinapolttolaitoksissa sekajätteen mukana tuleva alumiini sulaa ja voi aiheuttaa tukkeumia arinan ilma-aukkoihin sekä tuhkan kuljettimiin. Ekokem Oy:n Riihimäen jätteenpolttolaitoksilla ei ole koettu ongelmia nykyisillä alumiinin määrillä, mutta mikäli alumiinin määrä lisääntyy merkittävästi voi ongelmia alkaa esiintymään. Vantaan Energian uudella jätteenpolttolaitoksella metallien aiheuttamia ongelmia on esiintynyt laitoksen käytön alkuvaiheessa. Ekokem Oy:n Riihimäen jätteenpolttolaitoksella alumiini kerätään jätteenpolton tuhkan joukosta teollisuuden käyttöön. (Yle, 2014a.) Metallinkeräyksen erikoistuneita yrityksiä on monia ja metallinkierrätys on tuottavaa kaupallista toimintaa. Näistä syistä johtuen metallien kierrätysaste on korkea. Metallia kerätään talteen usealla tavalla: suoraan suurista taloyhtiöistä, kierrätyspisteiltä ja pantillisten juomapakkausten alumiini kerätään pullonpalautusjärjestelmän kautta. Pantittomat juomapakkaukset voidaan kierrättää kaikkia edellä mainittuja kierrätysreittejä myöten. Lisäksi kierrätysalan yritykset keräävät suurempia metallieriä suoraan kiinteistöiltä. Sekajätteen koostumuksesta keskimäärin 3 % on metalleja. Lisäksi sekajätteen joukkoon päätynyt sähkö- ja elektroniikkaromu sisältää metalleja.

SER eli sähkö- ja elektroniikkajäte kuuluu tuottajavastuuasetuksen piiriin. Käytännössä SER-keräys on toteutettu kunnallisilla jäteasemilla ja muilla tuottajayhteisön ylläpitämällä kierrätyspisteillä. Asetuksessa edellytetään, että Suomessa on 400 tuottajayhteisön ylläpitämää kierrätyspistettä ja kiinteitä pisteitä tulee olla vähintään yksi jokaisessa kunnassa. (VNA 15.7.2014/519.) Vuoden 2014 lakimuutos toi kauppoille velvollisuuden ottaa tietyin rajoituksin vastaan sähkö- ja elektroniikkajätettä (L 6.6.2014/410). Pientavaroiden parantuneet kierrätysmahdollisuudet parantanevat SER-keräyksen tehokkuutta entisestään. Sekajätteen joukossa sähkö- ja elektroniikkajätettä on 0,9 % (Pulkkinen, 2013, 17).

2.2.5 Muovipakkaukset

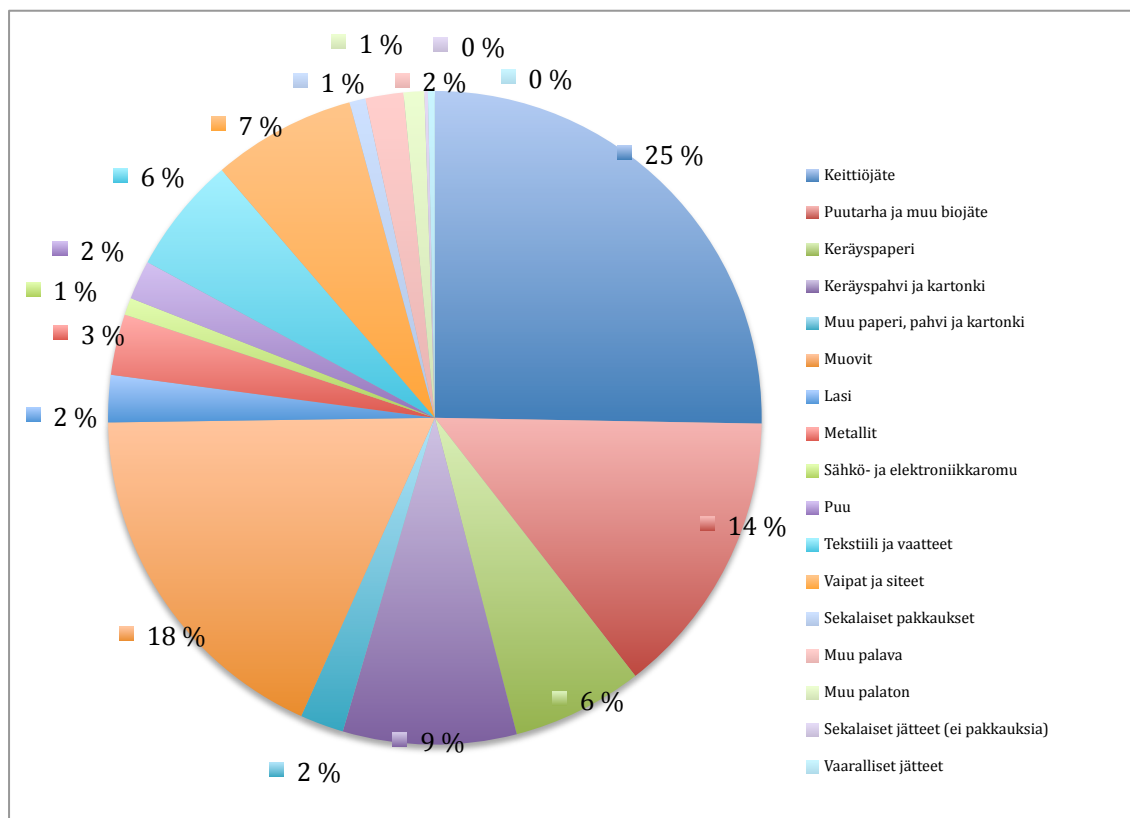
Muovipakkausten osalta kierrätysvaatimus on alhaisempi kuin muilla pakkausmateriaaleilla. Vanha asetus vaati, että muovipakkausten osalta kierrätysasteen oli oltava 15 % ja kierrätystavoite vuodelle 2008 oli 22,5 %. Uudempi asetus vaatii, että muovipakkausten kierrätysasteen olevan 16 painoprosenttia 1.1.2016 mennessä ja vuoteen 2020 mennessä muovipakkausten kierrätysaste tulisi nostaa vähintään 22 painoprosenttiin (VNA 3.7.2014/518.) Muovisten juomapakkausten osalta kierrätysvelvoite on kuitenkin 90 % (VNA 27.6.2013/526). Sekajätteen koostumuksesta merkittävä osa on muovia. Muovinkierrätys yksityistalouksissa on vaikeaa, sillä kotitalouksissa muodostuva muovijäte on usein likaista. Lisäksi muovityyppejä on useita ja niiden erottaminen toisistaan on vaikeaa. Kaikki muovityypit eivät sovellu kierrätykseen, esimerkiksi polyvinyylikloridi (PVC) ja sekoitemuovit. Sen sijaan kaupan alan ja muun vastaavan toiminnan on selkeämpää eritellä käyttämänsä pakkausmuovi. Kierrätettävää muovijätettä ei juurikaan kerätä yksittäisiltä talouksilta. Merkittävä osa kierrätysmuovista kerätään talteen pullojen palautusjärjestelmän kautta sekä kauppaliikkeissä, teollisuudessa ja maataloudessa syntyvästä tasalaatuisesta pakkausjätteestä. Erilliskerätystä muovijätteestäkin suurin osa menee polttoon (Merta et al., 2012, 17-18, 20). Muovityyppien toisistaan erottamiseen on kehitetty menetelmiä, joista muutamia tullaan esittelemään tämän työn seuraavassa luvussa.

Suurimpana ongelmana muovinkierrätyksessä on muovin saaminen puhtaana erilleen muusta yhdyskuntajätteestä. Muovilaatujen erottaminen toisistaan onnistuu mekaanisesti mutta ensin olisi saatava erilleen riittävän puhdasta muovimateriaalia. Tulee miettiä olisiko syntypaikkalajittelun tehostaminen toimiva keino ratkaista ongelma. Nykyiset energiajäte-

keräykset päättyvät monin paikoin, koska jätteenpolton keskittyessä arinapolttolaitoksiin rinnakkaispolttolaitosten sijaan, ei erillistä energiajätekeräystä enää tarvita. Voisi olla mahdollista hyödyntää energiajätteen keräysjärjestelmiä ja resursseja muovin erilliskeräykseen.

2.2.6 Suomalainen sekajäte ja syntypaikkalajittelun tehokkuus

Kuvassa 1 on esitetty sekajätteen keskimääräinen koostumus HSY:n alueella vuonna 2012. Tiedot on kerätty selvityksestä Pääkaupunkiseudun sekajätteen määrä ja laatu vuonna 2012. Sekajätteestä 39 % on biojätettä jakautuen kuvassa keittiöjätteeseen ja puutarhajätteeseen. 15 % sekajätteestä on keräyspahvia ja -paperia ja -muoveja on 18 %. Nämä ovat kolme suurinta sekajätteessä olevaa jäteajetta. Vaarallista jätettä sekajätteen joukossa on 0,3 % ja sähkö- ja elektroniikkajätettä 0,9 %. (Pulkkinen, 2013. 17) Taulukkoon 1 on kerätty tiedot Suomessa syntyvän jätteen määrästä. Tiedot on kerätty tilastokeskukselta saadusta julkaisemattomasta tilastosta. (Tilastokeskus, 2013) Kuvassa 1 esitetyt numerotiedot löytyvät tarkemmin liitteestä 1.

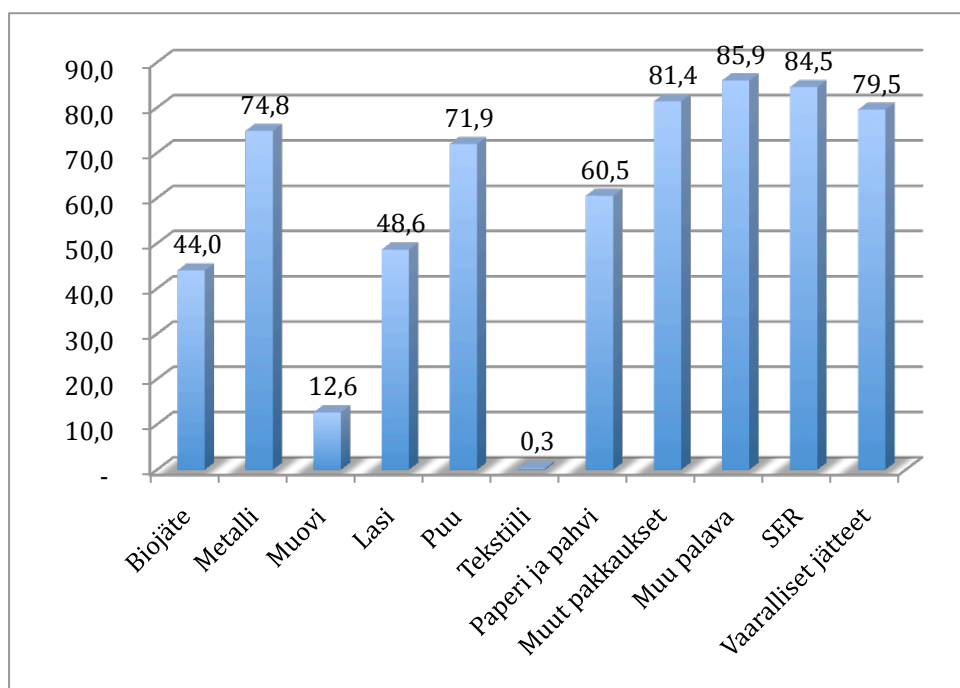


Kuva 1 Suomalaisen sekajätteen koostumus 2012 (Pulkkinen 2013).

Taulukko 1 Yhdyskuntajätteenmäärä Suomessa vuonna 2012 (Tilastokeskus 2013).

Jätejae	Määrä t/a	Osuus Suomen jätemäärästä %
Sekajäte	1380000	50,2
Erilliskerättävät jätteet:		
Biojäte	363000	13,2
Kotikomposti (arvio)	54500	2,0
Erikseen kerätyt ravintorasvat	11700	0,4
Metallijäte, metallipakkaukset	124000	4,5
Muovi, muovipakkaukset	36100	1,3
Lasi, lasipakkaukset	30500	1,1
Puu, puupakkaukset	68500	2,5
Tekstiili	253	0,0
Paperi ja kartonki, pakkaukset	365000	13,2
Muut Pakkaukset	75900	2,8
Muu erilliskerätty. mm REF	15900	5,8
SER	64300	2,3
Ongelmajätteet	18300	0,7

Tilastokeskuksen tietojen ja Pulkkisen tutkimuksen pohjalta on laskettu syntypaikkalajittelulle erotustehokkuudet, jotka on esitetty kootusti kuvassa 2. Jätelajin kokonaismäärä on laskettu lisäämällä erilliskerättyihin jakeisiin sekajätteestä kyseiseen jätelajiin kuuluva osuus. Kun edellä saadulla luvulla jaetaan erilliskerätyn jakeen määrä, saadaan laskennallinen tehokkuus syntypaikkalajittelulle. Sekajätteen koostumuksen osalta on käytetty Pulkkisen (2013) tutkimusta, koska se on uusimpia ja kattavimpia julkaistuja tutkimuksia sekajätteen koostumuksesta (Sahimaa, 2014, 29-34). Se tehty pääkaupunkiseudun jätteellä ja Suomen asukasjakaumaan nähden kuvaa merkittävää osaa suomalaisesta sekajätteestä. Verrattuna Teirasvuon (2011) esittämään vertailuun eri koostumus tutkimuksista on HSY:n 2012 sekajätteen koostumus linjassa muiden koostumustutkimuksien kanssa. Erilaisesta luokittelusta johtuen alueellisten koostumustutkimusten tulokset eroavat kuitenkin toisistaan.



Kuva 2 Syntypaikkalajittelun erotustehokkuus (Tilastokeskus20013; Pulkkinen 2013).

Kuvaa 2 tulkittaessa tulee huomioida, että vaikka erotustehokkuudet ovat erittäin hyvät osalla jakeista, ei kokonaistilanne ole kehuttava. Biojäte muodostaa suuren osan jätteestä ja erilliskeräyksestä huolimatta sen määrä sekajätteessä on korkea. Syntypaikkalajittelun tehokkuus biojätteellä jää noin 44 %:iin. Biojätteen osalta syntypaikkalajittelun erotustehokkuus pitää sisällään myös arvioidun kotikompostoinnin. Lisäksi muovin syntypaikkalajittelun tilanne on huono, etenkin kun huomioidaan syntyvän muovijätteen määrä. Syntypaikkalajittelun tehokkuus muovin osalta on vain 12 % ja sekajätteestä 18 % on muoveja. Kun otetaan huomioon jätedirektiivin vaatimus jätteenkierrätysasteen nostamiseksi 50 %:iin vuoteen 2020 mennessä on muovin kierrätyksen suhteen paljon tehtävää. Positiivisena voidaan pitää metallin, vaarallisten jätteiden ja sähkö- ja elektroniikkaromun tilannetta. Metallin osalta syntypaikkalajittelun tehokkuus on 74,8 %, SER:n 84,5 % ja vaarallisten jätteiden osalta 79,5 %. Ympäristövaikutuksien kannalta on tärkeää, että nämä saadaan erilleen loppusijoitettavasta sekä poltettavasta jätteestä. Puun osalta syntypaikkalajittelun aste on korkea, 72 %. Puujätettä syntyy kuitenkin kohtuullisen vähän ja merkittävässä määrin muualla kuin kotitalouksissa. Puujätettä syntyy esimerkiksi rakentamisessa ja lisäksi syntynyt puujäte on usein niin suurikokoista, että sen hävittäminen kotitalousjätteen joukossa ei ole helppoa. Lasia syntypaikkalajittelulla saadaan erotettua 48,6 % ja paperia ja pahvia 60 %. Lasin osuus sekä Suomessa tuotetusta jätteestä, että kerätystä sekajätteestä on pieni, muutaman prosentin luokkaa. Pahvia ja paperia sen sijaan on 17 % sekajätteestä ja 26 %

Suomessa erilliskerätyistä jätteistä. Kokonaiskierrätysasteen kannalta talteen saadulla pahvilla ja paperilla on suurempi merkitys kuin talteen saadulla lasilla. Tekstiilien osalta syntypaikkalajittelulla saadaan talteen 0,3 % jätteeseen menevästä tekstiilistä. Tulee huomioi-
da, että osa käytöstä poistetusta tekstiilistä kiertää kirpputorien ja hyväntekeväisyys järjes-
töjen kautta, ja ne eivät näy jätteessä. Varsinaista tekstiilijätteen kierrätystä Suomessa har-
joitetaan toistaiseksi hyvin vähän. Tekstiilijätettä käytetään öljyimeytysmattojen ja vastaa-
vien valmistukseen, sekä pienet design-yritykset käyttävät poistotekstiilejä tuotteissaan
(Hakola, 2013, 2-3).

Syntypaikkalajittelun erotustehokkuuden laskelmiin voi aiheutua virhettä johtuen esimer-
kiksi biojätteen osalta kotikompostointi arviosta. Lisäksi SER ja metallijätettä voi kertyä
ihmisten varastoihin ja tyhjentyä erilliskeräyksen joukkoon isompina erinä. Tämä voi aihe-
uttaa virhettä yksittäisenä vuonna. Lasin ja kuitumateriaalin osalta varastoitumisilmiö tus-
kin on merkittävä. Tilastointitavat ja koostumustutkimusten lajittelun rajanvedot voivat
aiheuttaa tilastollista virhettä laskemiin.

Syntypaikkalajittelun ongelmana kuluttajatasolla on useimmiten tilan tai tietämyksen puute
ja silkka välinpitämättömyys. Asuntojen tilat eivät riitä jätteiden lajitteluun. Jotta lajittelu
olisi helppoa ja selkeää, tulisi jätteet lajitella suoraan syntypaikalla, useimmiten keittiössä,
ja vain harvaan keittiöön sopii useita jäteastioita. Omat keräysastiat tulisi olla lasille, me-
tallille, paperille, pahville, biojätteelle, sekajätteelle, palautuspulloille, muoville ja vaaralli-
sille jätteille. Toisaalta, vaikka lajittelu sisätiloissa onnistuisi, mutta erilliskeräyspistettä ei
ole omassa pihassa vaan jätteet joutuisi kuljettamaan kauemmas, vähentää se halukkuutta
lajitella ja säilöä jätteitä asunnossa. Asuntojen jätetilojen lisäksi tulisi huomio kiinnittää
kiinteistöjen keräyspisteisiin, niiden toimivuuteen, sijaintiin ja astioiden määrään. (Roos et
al., 2004, 33-35, 79.)

Jatkuvasti muuttuva ohjeistus aiheuttaa hankaluuksia sekä kuluttajille että taloyhtiöille.
Tiedotuksen tulisi olla tehokasta ja selkeää. Muutoksista lajitteluohjeisiin tulisi tiedottaa
riittävän usein ja selkeästi. Kaikki eivät ymmärrä suomea, joten tiedotusta tulisi olla myös
muilla kielillä ja kuvin. Alueiden erilaisten ohjeistuksien vuoksi muuttavat ihmiset joutuvat
opettelemaan uuden tavan kierrättää ja etsimään uudet kierrätyspisteet. Jatkuvat muutokset

jätehuoltomääräyksissä aiheuttavat ongelmia myös taloyhtiöille, sillä tehdyt remontit asunnoissa ja jätehuoneissa voivat muuttua nopeasti hyödyttömiksi. (Roos et al., 2004, 79.)

2.3 Jätteiden käsittely Suomessa

Jätteiden energiahyötykäyttö on kasvanut Suomessa merkittävästi. Jätteenpolttolaitoksilla tarkoitetaan polttolaitoksia, joiden ensisijaisena tarkoituksena on jätteiden hävittäminen lämpökäsittelyllä (*VNA* 2.5.2013/331). Jätteenpolttolaitokset eivät kuulu päästökaupan piiriin. Suomessa on seitsemän jätteenpolttolaitosta. Jätteenpolttolaitoksista kuusi on arinakattiloita ja yksi, Lahti Energian laitos, on kaasutuslaitos. Rakenteilla on kaksi jätteenpolttolaitosta, Tampereelle ja Leppävirralle. Rakenteilla olevista laitoksista Tampereen laitos tulee olemaan arinakattila, mutta Leppävirralle on rakentumassa kiertopetikattila. (Jätelaitosyhdistys, 2014b.) Saloon on suunnitteilla laitos korvaamaan 31.12.2014 suljettua Orikedon jätteenpolttolaitosta. Tarjouskilpailun on voittanut Ekokem Oy. Saloon suunnitellun jätteenpolttolaitoksen on määrä tulla toimintaan vuonna 2018 ja sen kapasiteetti tulisi olemaan 150 000 t/a. (Yle 2014b.) Valmiilla, rakenteilla olevilla ja suunnitelluilla laitoksilla jätteenpolttokapasiteetti tulee olemaan yhteensä 1 740 000 t/a. Lahden kaasutuslaitos käyttää jäteperäistä kierrätyspolttoainetta muut laitokset, käyttävät syntypaikkalajiteltua yhdyskuntajätettä. Taulukossa 2 on esitetty Suomessa toimivat jätteenpolttolaitokset ja niiden jätteenpolttokapasiteetti. Taulukosta huomataan myös, että kaikki toiminnassa olevat jätteenpolttolaitokset ovat varsin uusia.

Taulukko 2 Jätteenpolttolaitokset Suomessa (Pöyry, 2012; Jätelaitosyhdistys 2014b)

Jätteenpolttolaitos	Sijainti	Kapasiteetti t/a	Kattila- tekniikka	Käyttöönotto vuosi
Ekokem Oy Ab, Ekokemin jätevoimala 1	Riihimäki	150 000	Arina	2007
Kotkan energia Oy Korkeakosken hyötyvoimalaitos	Kotka	100 00	Arina	2008
Ekokem Oy Ekokemin jätevoimala 2	Riihimäki	120 000	Arina	2012
Oulun energia, Laanilan Ekovoimalaitos	Oulu	150 000	Arina	2012
Westenergy Oy, Westenergyn jätevoimalaitos	Mustasaari (Vaasa)	180 000	Arina	2012
Lahti Energia, KYVO2-kaasutuslaitos	Lahti	250 000	Kaasutus	2012
Vantaan Energia Oy Vantaan Energian jätevoimala	Vantaa	340 000	Arina	2014
Riikinvoima Oy Riikinvoiman ekovoimalaitos	Leppävirta	145 000	Leijupeti-kattila	2016
Tammervoima Oy, Tammervoima	Tampere	180 000	Arina	2016
Ekokem Oy,	Salo	150 000	?	2018

Rinnakkaispolttolaitoksilla tarkoitetaan polttolaitoksia, joiden ensisijainen tehtävä on lämmön- ja sähköntuotanto ja jotka voivat käyttää jäteperäisiä polttoaineita muiden polttoaineiden ohella. Rinnakkaispolttolaitokset kuuluvat päästökaupan piiriin. Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta säätelee jätteenpolttoa. Asetusta ei sovelleta maa- ja metsätalouden kasviperäisen jätteen, elintarviketeollisuuden kasviperäiseen jätteen, puhtaan puujätteen eikä paperi- ja selluteollisuuden kuitupitoisen jätteen polttamiseen. Asetuksen mukaan valvovan viranomaisen on pidettävä ajantasaista luetteloa alueellaan toimivista jätteenpoltto- ja rinnakkaispolttolaitoksista. (VNA 14.2.2013/151.) Elinkeino-, liikenne, ja ympäristökeskusten luetteloiden mukaan Suomessa on 15 toiminnassa olevaa rinnakkaispolttolaitosta ja yksi, jolla on lupa käyttää jäteperäisiä polttoaineita, mutta ei ole niitä käyttänyt. Lisäksi Suomessa on sellu- ja paperiteollisuuden yhteydessä toimivia rinnakkaispolttolaitoksia, jotka käyttävät polttoaineenaan paperin tai massan valmistuksen yhteydessä syntyvää kasviperäistä jätettä. Torniossa, Kokkolassa, Kajaanissa ja Porissa on rinnakkais-

polttolaitokset, joita ei löydy elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskusten luetteloista mutta joilla on ympäristölupien mukaan mahdollista polttaa myös kierrätyspolttoaineita. (Pöyry, 2012, liite 2.)

Biohajoavaa jätettä käsitellään noin 40 laitoksella Suomessa. Laitoksilla biohajoava jäte, yleensä biojäte, joko kompostoidaan tai mädätetään. Kompostoinnissa biojäte käsitellään hapellisissa olosuhteissa, jolloin pieneliöt hajottavat orgaanista ainesta. Lopputuotteena kompostointilaitoksista syntyy hiilidioksidia, vettä ja humusta. Mädätys tapahtuu hapettomissa olosuhteissa. Mädätys on monivaiheinen tapahtuma, jossa syntyy lopulta biokaasua, jota voidaan käyttää energian tuotantoon. Biokaasun pääkomponentit ovat metaani ja hiilidioksidi. Mädätyksestä jää jäljelle mädätysjäännös, jota voidaan tuotteistaa käytettäväksi lannoitteena tai viherrakentamisessa. Mädätysjäännös voidaan myös kuivata poltettavaksi. Vielä toistaiseksi osa yhdyskuntajätteestä sijoitetaan kaatopaikoille. Vuoden 2016 alussa kaatopaikkasijoitusta tulee koskemaan biohajoavan jätteen kaatopaikkasijoituskielto, jonka myötä yhdyskuntajätteen kaatopaikkasijoittaminen tulee käytännössä päättymään. Tämän jälkeen kaatopaikoille tullaan sijoitetaan lähinnä jätteenpoltontuhkia, pilaantuneita maita ja polttokelvottomia jätteitä. (Jätelaitosyhdistys, 2014c.)

3 Jätteen mekaaniset erottelumenetelmät

3.1 Kokoon perustuvat erottimet

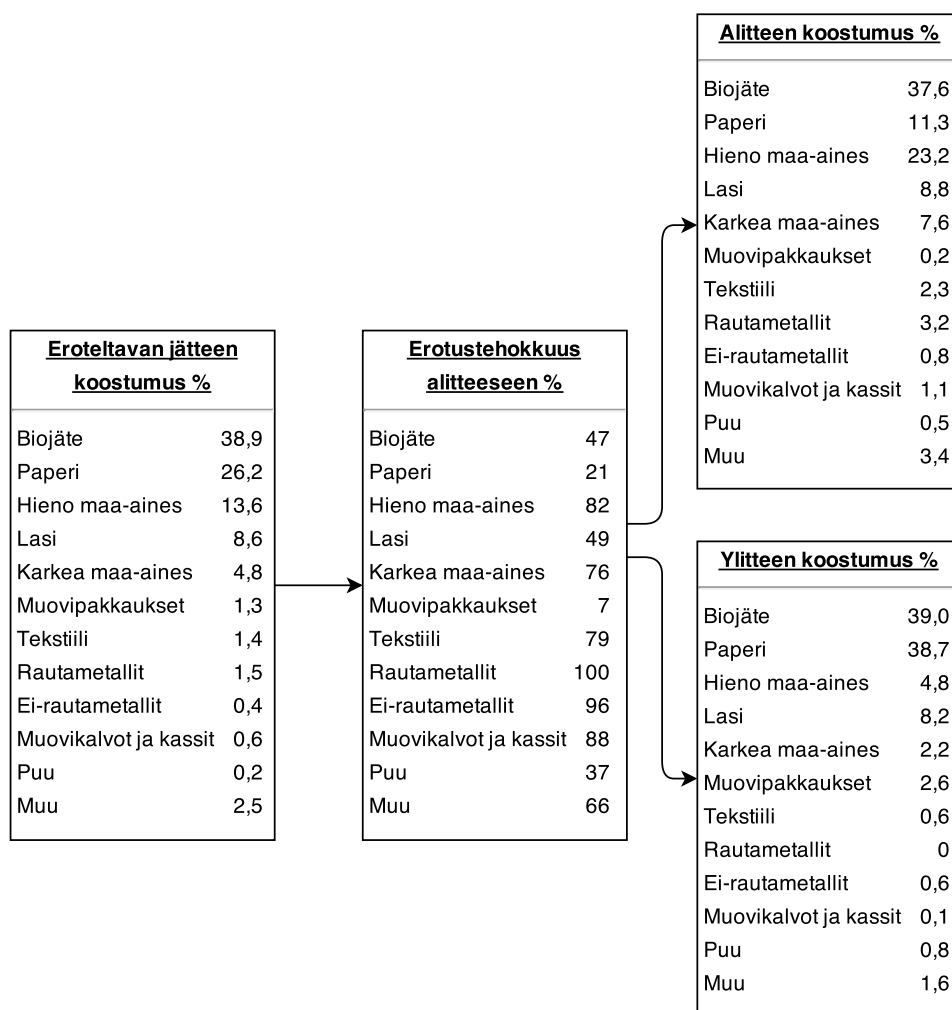
3.1.1 Täryseula

Seulonta on vanhimpia käytettyjä jätteenerottelumenetelmiä. Seulonnassa jätettä lajitellaan kappaleiden koon mukaan. Eräs yleinen seulontamenetelmä on täryseula, jota käytetään etenkin kuivien materiaalien erottamiseen. Alitteeseen kulkeutuvat muun muassa lasi ja metallit. Täryseulassa eroteltava jäte kuljetetaan liikkuvalla kaltevalle seulalle, jonka liike voi olla joko poikittaissuuntaista tai pitkittäissuuntaista. Jätteenerottelussa käytetään yleisesti poikittaissuuntaista liikettä, sillä se mahdollistaa eroteltavan jätteen osumisen seulan eri kohtiin seulonnan aikana. (Tchobanoglous et al., 1993, 259, 552.)

Täryseulaa käytetään myös biojätteenkäsittelylaitoksilla erottelemaan mädätykseen tai kompostointiin menevästä jätteestä sinne kuulumattomat jakeet kuten muovipussit tai metallikappaleet sekä tekemään käsiteltävästä jätteestä koostumukseltaan homogeenistä. Täryseulalla saadaan käsiteltyä suuri määrä jätettä hyvällä erotustehokkuudella. Täryseulalla voidaan myös erotella useamman kokoista jätettä päällekkäisillä seuloilla. Ylimmässä seulassa on suurimmat raot ja alemmissa pienemmät. Eroteltavat jakeet kerätään kunkin seulan päältä, tällöin kahdella seulalla saadaan eroteltua kolmea jaetta ja kolmella seulalla neljää jaetta. Täryseula ei sovellu kovin kostean jätteen seulomiseen, sillä seulottavan jätteen ollessa märkää se tarttuu herkästi kiinni seulaverkkoon ja huonontaa näin erotustehokkuutta. Myös suuret tasaiset partikkelit, kuten muovikalvot tai pahvit voivat tukkia seulaverkkoa ja näin estää pienempien partikkeleiden kulkeutumisen seulaverkon läpi. (Savage et al., 2005.)

Espanjassa Sant Adrià del Besóssen mekaanis-biologisella jätteenkäsittelylaitoksella täryseulaa on käytetty jätteen käsittelyyn ennen mädätystä. Jäte ajetaan täryseulalle rum-puseulan ja magneettierotuksen jälkeen. Tarkoituksena on erotella mädätykseen menevästä jätteestä kierrätykseen ja energiakäyttöön soveltuva materiaali ennen optista erottelua. Tä-

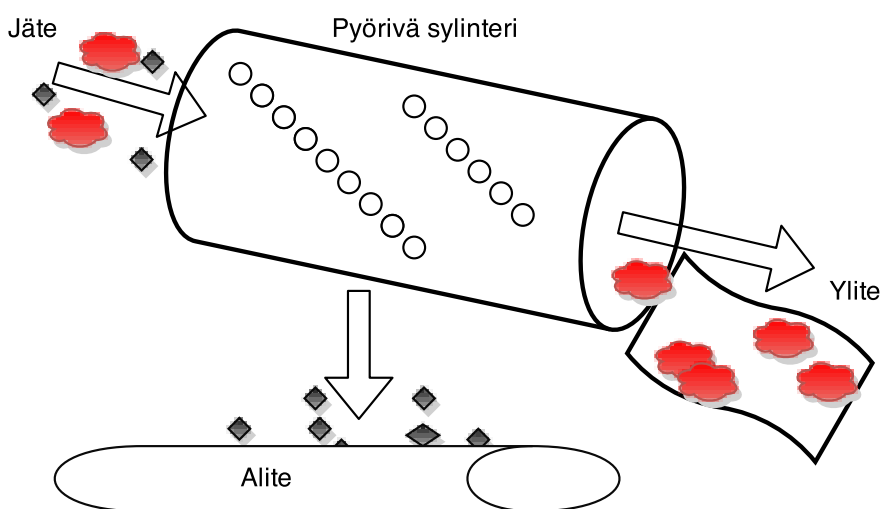
ryseulan verkossa on 30×30 mm neliönmuotoiset aukot. Tehdyn selvityksen tulosten perusteella on voitu todeta, että seula poisti tehokkaasti sille tulleet ei-toivottavat aineet, mutta myös biohajoavan materiaalin hävikki oli suurta. Täryseulalle tulleesta biojätteestä vain noin 53 % jatkoi ylitteessä mädättämöön. Lisäksi ylitteeseen meni 79 % paperista ja pahvista. Nämä olivat ylitteen pääkomponentit, muita merkittäviä jakeita ylitteessä olivat lasi, muovipakkaukset ja ei-rautametallit. Mädättämöön menevät jätteet kulkivat vielä optisen erotuksen läpi ja tässä erottui pääosa pahvista, ei-rautametalleista ja lasista. Täryseula poisti hyvin ei-toivottuja materiaaleja, mutta tässä käytössä sen heikkoutena oli suuri biomassan häviö. Hienon maa-aineksen, Karkean maa-ainekset, tekstiilien ja metallien osalta erotustehokkuus oli yli 70 %, lasin osalta 49 %. Kuvassa 3 on esitetty esimerkkinä täryseulasta edellä kuvatussa tapauksessa saatavat jakeet ja erotustehokkuudet sekä ylitteen ja alitteen koostumus. (Romero-Güiza et al., 2014, 65-66.) Erotustehokkuudet on laskettu Romero-Güizan artikkelin tietojen pohjalta.



Kuva 3 Täryseulan erotustehokkuus artikkelia mukaillen (Romero-Güiza et al., 2014).

3.1.2 Rumpuseula

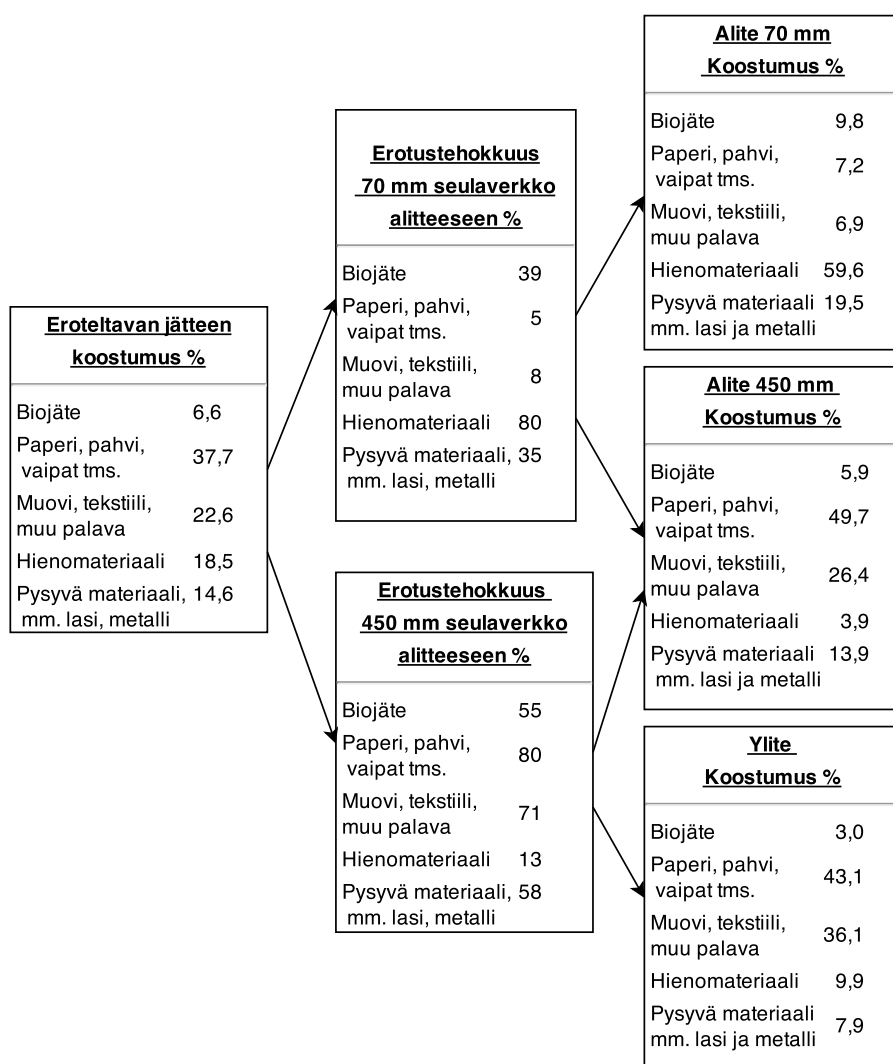
Rumpuseula on yleisimmin käytetty pyörivä seula. Rumpuseulassa jäte kuljetetaan pyörivään rumpuun. Rummussa olevien aukkojen kautta poistuvat pienet kappaleet ja suuret kappaleet kulkeutuvat rummun läpi. Rumpuseulalla jäte voidaan jakaa muutamaa erisuuruisia kappaleita sisältävään jakeeseen. Rummun alkuosassa ovat pienimmät aukot ja suuremmat aukot ovat rummun loppupäässä. Rumpuseulaa voidaan käyttää useaan eri tarkoitukseen jätteen lajittelussa, muun muassa ylisuurten kappaleiden erottamiseen ennen muita lajittelumenetelmiä tai paristojen sekä muiden pienten esineiden erotteluun sekajätteestä. (Lau et al., 2005; Tchobanoglous et al., 1993, 257.) Rumpuseulaa käytetään usein jätteen esilajitteluun tai muiden lajittelumenetelmien välissä jakamaan jätemassa kokonsa puolesta tasalaatuisiin eriin ennen seuraavaa lajitteluvaihetta (de Araújo Morais et al., 2008, 1769). Kuvassa 4 on esitetty rumpuseulan toimintaperiaate.



Kuva 4 Rumpuseulan toimintaperiaate.

Rumpuseulaa on käytetty esikäsittelynä ja prosessin välissä jätteen mekaanis-biologisessa käsittelyssä Ranskassa. Tutkimuksessa yhdyskuntajäte jaettiin viiteen luokkaan 1: vihreä ja ruokajäte, 2: paperi, kartonki, vaipat ja muut hygieniatuotteet, 3: muovit, tekstiilit, komposiittimateriaalit ja muut palavat, 4: hienomateriaali ja 5: pysyvä materiaali, kuten lasi, metalli, palamattomat ja vaaralliset jätteet. Yhdyskuntajäte syötettiin rumpuseulaan, jossa oli 70 mm ja 450 mm seulat sekä terät jätepussien rikkomista varten. Rumpuseula jakoi jätteen kolmeen erikokoisia kappaleita sisältävään jakeeseen alle 70 mm, 70 - 450 mm ja yli

450 mm. Alle 70 mm jakeeseen meni 26,1 % jätteestä. Alle 70 mm jakeeseen meni pääosa jätteen hienomateriaalista ja merkittävä osa biojätteestä ja pysyvistä materiaaleista. Muovia ja paperia jakeeseen ei mennyt kuin pieniä määriä. 70 - 450 mm jakeeseen meni 60,7 % koko jätemäärästä. Jae koostui pääosin luokista 1) paperit ja pahvit sekä 2) muut palavat. Lisäksi jakeeseen meni pysyviä jätteistä, hieman biojätettä ja hienomateriaalia. Viimeiseen jakeeseen jäi 13,2 % yhdyskuntajätteestä. Jae koostui pääosin pahveista ja papereista, muoveista ja tekstiileistä, sekä pienestä määrästä yhdyskuntajätteen biojätettä, hienoaainesta ja pysyviä materiaaleja. (de Araújo Morais et al., 2008, 1795-1796.) Esimerkkinä rumpuseulan erotustehokkuudesta kuvassa 5 on esitetty de Araújo Moraisin artikkelin mukaiset rumpuseulan erotustehokkuudet eri jätejakeille sekä alitteiden ja ylitteen koostumus.

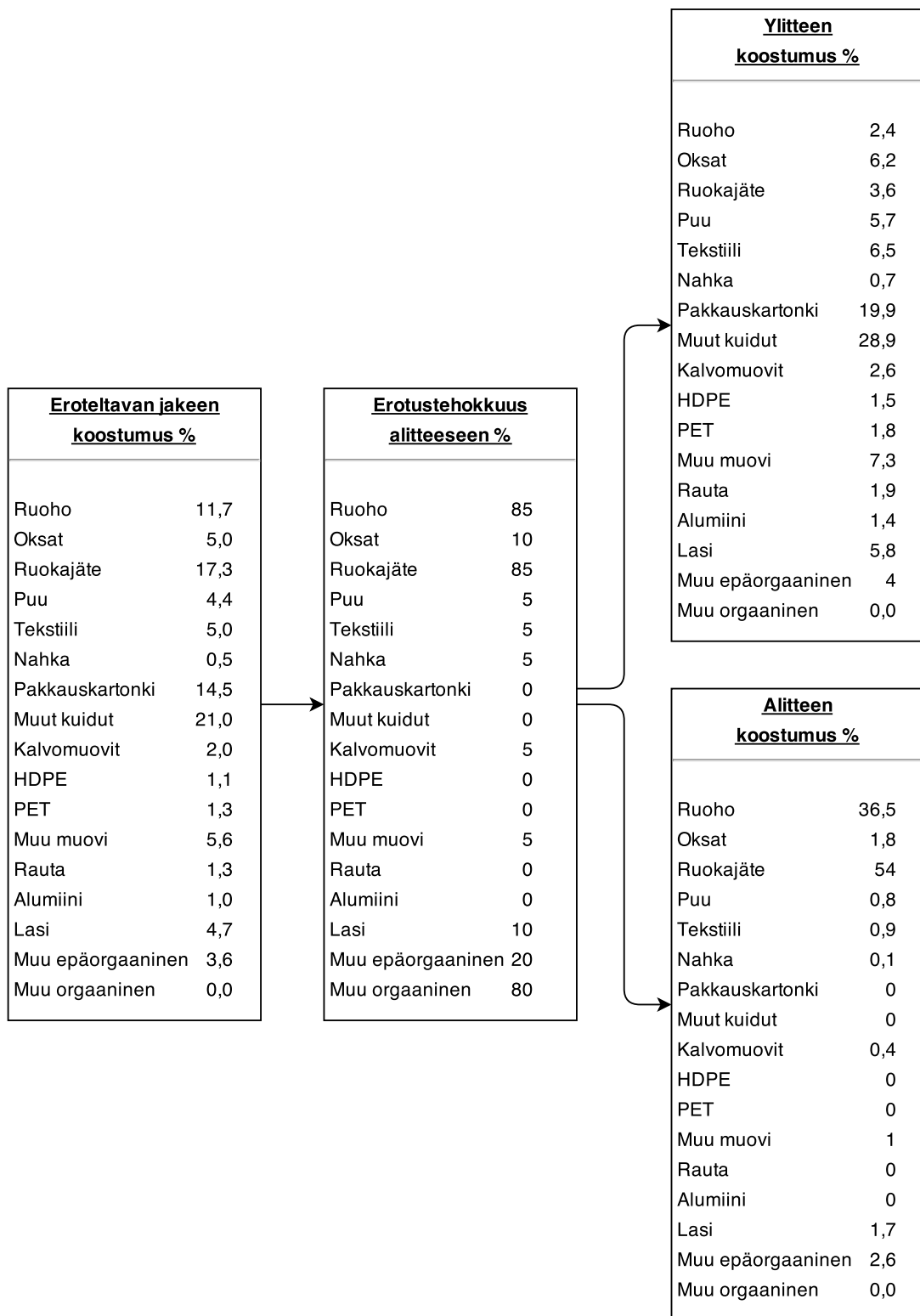


Kuva 5 Rumpuseulan erotustehokkuus artikkelia mukaillen (de Araújo Morais et al., 2008).

Edellä olevaa kuvaa katsomalla voidaan todeta, että rumpuseula ei sovi ainoaksi käsittelymenetelmäksi jätteelle. Yksikään tutkimuksen jakeista ei ole Valtioneuvoston asetuksen, Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 2013, mukaan suoraan valmis loppusijoitettavaksi. Tutkimuksen tapauksessa yli 450 mm kappaleita sisältävä jae sijoitettiin suoraan kaatopaikalle ilman biologista käsittelyä. Alle 70 mm kappaleita sisältävä jae kompostoitui ja sijoitettiin sen jälkeen kaatopaikalle (de Araújo Morais et al., 2008, 1792). Sijoitettavasta jätteestä, eli yli 450 mm jakeesta, tulisi erotella orgaaniset materiaalit tarkemmin. Orgaanisen aineen kokonaismäärä on suuri, vaikka biojätteen osuus jakeessa on pieni, sillä pahvin ja paperin osuus suoraan sijoitettavasta jätteestä on merkittävä. Keskimäinen jae käsiteltiin vielä biologisesti, uudelleen rumpuseulalla ja magneettierottimella, jonka jälkeen kokonaiserotustehokkuus oli tämän jakeen osalta jo lähempänä jätedirektiivin vaatimuksia. (de Araújo Morais et al., 2008, 1792.)

Sekalaisen yhdyskuntajätteen käsitteleminen on vaikeaa sen sisältämän biojätteen vuoksi. Biojäte, etenkin ruokajäte, likaa eroteltavat jakeet sekä häiritsee mekaanisia erotusmenetelmiä. Sekalaista yhdyskuntajätettä käsiteltäessä erotustehokkuudet jäävät yleisesti pienemmiksi kuin esimerkiksi puhtaampaa esilajiteltua jätettä käsiteltäessä. (Pressley et al., 2015, 313-314.) Yhdyskuntajätteen mekaanisen erottelun kannalta on tärkeää saada biojäte poistettua prosessista joko syntypaikkalajittelulla tai tarkoitukseen sopivalla seulalla.

Rumpuseulalla voidaan erotella tehokkaasti biohajoava materiaali muusta yhdyskuntajätteestä. Kuvassa 6 on esitetty Pressleyn mallissa esitetyt erotustehokkuudet eri jakeille, kun lähtömateriaalina on ollut sekalaista yhdyskuntajätettä USA:sta. Oksattoman puutarhajätteen ja ruokajätteen osalta erotustehokkuudeksi on annettu 85 % ja luokittelemattomalle orgaaniselle materiaalille 80 %. Biohajoavan lisäksi alitteeseen kulkeutui vain pieniä määriä muita materiaaleja. (Pressley et al., 2015, Appendix A.) Alitteen ja ylitteen koostumus on laskettu artikkelissa annetuista tiedoista.



Kuva 6 Rumpuseulan erotustehokkuus artikkelia mukaillen (Pressley et al., 2015).

Rumpuseulan erotustehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä tutkittiin Hong Kongissa suoritetussa tutkimuksessa, jossa tutkittiin rumpuseulan käyttöä pattereiden erottamiseen yhdyskun-

tajätteestä. Seurannassa olivat rummun kallistuskulma, pyörimisnopeus, jätteensyöttönopeus ja eroteltavan jätteen koostumus. Paristot ovat ongelma yhdyskuntajätteen käsittelylle sisältämiensä raskasmetallien, etenkin elohopean ja kadmiumin, vuoksi. Tutkimuksessa käytettiin yliopistolla syntynyttä jätettä, joka oli pääosin toimisto- ja ravintolajätettä, eroten näin hieman alueen tavanomaisesta yhdyskuntajätteestä. Kokeessa tutkittiin kolmen erityyppisen patterin, D-cell paristo, AA-paristo ja nappiparisto erottumista rumpuseulalla. Ennen tutkimusta yliopiston jäte seulottiin alle 200mm kokoiseksi, jotta se olisi vertailtavissa alueen muuhun yhdyskuntajätteeseen, joka murskataan ennen muuta käsittelyä. Odotettu erottelutehokkuus alle 10 mm kappaleille oli 90 %, joka saavutettiin AA paristojen ja nappiparistojen osalta. (Lau et al., 2005, 1006.)

Rummun kallistuskulma vaikuttaa aikaan, jonka jäte viettää rummussa. Mitä loivempi rummun kallistuskulma on sitä kauemman aikaa jäte viettää rummussa. Pienten kappaleiden osalta kallistuskulmalla ei ollut suurta vaikutusta, sillä erotustehokkuus oli joka tapauksessa yli 80 %. Sen sijaan suuremmilla kappaleilla, tässä tutkimuksessa D-cell paristot, erotustehokkuus heikkeni reilusti kallistuskulmaa kasvatettaessa. Suurempien kappaleiden osalta erotustehokkuus vaihteli 20 % ja 60 % välillä, ollen suurempi kallistumiskulman ollessa 2° ja pienentyen kallistumiskulman kasvaessa 8°:seen. (Lau et al., 2005, 1009)

Toinen erotustehokkuuteen vaikuttava tekijä on rummun pyörimisnopeus. Suuri pyörimisnopeus alentaa erotustehokkuutta, koska se lyhentää rummun pidätysaikaa, jolloin kappaleilla on vähemmän mahdollisuuksia osua rumpuun ja poistua rummusta. D-cell paristojen osalta tässä tutkimuksessa havaittiin selvä poikkeus säännöstä, sillä erotustehokkuus kasvoi pyörimisnopeuden kasvaessa. Tämä voidaan selittää muilla parametreilla. Erotustehokkuuden nousu nopeuden kasvaessa tapahtui matalalla kallistuskulmalla. Jättemassalla on tapana romahtaa sisääntulon läheisyydessä ja tässä tilanteessa raskaat paristot päätyvät lähelle rumpua ja pääsevät näin ollen paremmin kosketuksiin rummun kanssa. (Lau et al., 2005, 1010.)

Jätteen syöttönopeudella näytti olevan vain vähän merkitystä erotustehokkuuteen. Tämä on ristiriidassa odotettujen tulosten kanssa, koska yleisesti jätteensyöttönopeuden lisäys pienentää erotustehokkuutta. Tässä tapauksessa erottelutehokkuuden muuttumattomuus selittyy eroteltavan jätteen tiheydellä. Paristot ovat raskaita ja putoavat tästä syystä rummun pohjalle verrattain helposti. Paristojen määrä jätteessä ei vaikuta erottelutehokkuuteen.

Testiä ei kuitenkaan tehty suuremmalla konsentraatiolla, koska ei ole tarkoituksenmukaista tehdä yhdyskuntajätteen lajittelua koskevaa testiä täysin poikkeavalla jätekoostumuksella. (Lau et al., 2005, 1011.)

Rumpuun syötetyn jätteen koostumuksella on vaikutusta erotustehokkuuteen. Tässä tutkimuksessa rumpuun syötetyn jätteen merkittävimmät komponentit olivat paperi ja orgaaniset materiaalit. Jätteessä oleva runsas paperin määrä heikentää erotustehokkuutta, sillä normaalia runsaampi paperin määrä muodostaa blokkeja rummun aukkoihin ja estää näin kappaleiden putoamisen aukkojen läpi. Mitä suurempi osuus jätteestä oli paperia, sitä vähemmän alitetta syntyi. Sen sijaan runsas biojätteen määrä lisäsi alitteen määrää. (Lau et al., 2005, 1011.) Biojäte on tiheää ja hienojakoista ja erottuu varsin hyvin rumpuseulalla (de Araújo Morais et al., 2008).

Voidaan sanoa, että rumpuseulan käyttäminen pienien esineiden erottamiseen toimii hyvin. Erotustehokkuutta voidaan parantaa loiventamalla rummun kulmaa, pitämällä pyörimisnopeus riittävän alhaisena ja huolehtimalla siitä, että käsiteltävän jätteen koostumus on sopiva. Biojäte ei häiritse rumpuseulan erotustehokkuutta, mutta runsas paperin määrä huonontaa sitä. Loivalla rummun kulmalla ja suurella syöttönopeudella voi syntyä ongelmia, jos suuret jätteet pyrkivät takaisin päin rummussa estäen näin rumpuun syötettävän jätteen kulkeutumisen eteenpäin (Lau et al., 2005, 1011).

3.1.3 Kiekkoseula

Kiekkoseulaa voidaan käyttää samankaltaisissa tilanteissa kuin rumpuseulaa. Kiekkoseulassa on pyöriviä kiekkoja, joiden välistä pienikokoinen materiaali valuu ja suuret kappaleet jatkavan matkaa rullien päällä. Kiekot toimivat samalla jätteen kuljetushihnana. Kiekkoseulalla voidaan erotella useampaa jätefraktiota asentamalla kiekkoja erilaisin välityksin. Kiekkoseulan etuna muihin seuloihin nähden on sen säädettävyyys ja itsepuhdistuvuus. (Tchobanoglous et al., 1993, 259.)

Kiekkoseulan ja tähtiseulan toimintatapa on sama, se kumpaa termiä käytetään, riippuu seulan pyörivien levyjen muodosta. Kiekkoseulan etuna on sen hyvä käytettävyyys myös määrällä materiaalilla sekä kuituisella materiaalilla ilman tukkeutumien syntyä. (Savage et

al., 2005.) Kiekkoseulaa voidaan käyttää kompostoitavan materiaalin esikäsittelyyn poistamaan erilliskerätystä biojätteestä sen joukkoon joutuneet vierasaineet kuten muovipussit, kivet ja metallinkappaleet.

Tanskassa tehdyssä tutkimuksessa kiekkoseulan läpi valuivat pienet ja raskaat kappaleet, toisin sanoen pääosin biojäte. Sen sijaan suuret ja kevyet kappaleet kuten paperi ja muovit kulkeutuivat kiekkojen yli rejektiin. Tutkimuksessa tutkittiin 23 näytettä, jotka kulkivat kiekkoseulan läpi neljässä eri laitoksessa. Biojätteeseen meni 58,2 - 70 % jätteen määrästä ja rejektiin 30 - 41,8 %. Rejekti oli kuitenkin pääosin biojätettä, sillä lähtötuotteen koostumuksesta vain joitakin prosentteja oli muuta kuin biojätettä. (Hansen et al., 2006, 401.)

Kiekkoseulaa voidaan käyttää myös erottamaan pakkauskartonkia ja paperia yhdyskuntajätteestä. Pressleyn mallissa on annettu pakkauskartongin osalta kiekkoseulan erotustehokkuudeksi 60 %, kun eroteltava yhdyskuntajäte on ensin käsitelty rumpuseulalla biojätteen poistamiseksi. Toisella kiekkoseulalla erotustehokkuudeksi on annettu sekä paperin, että pahvin osalta 21 %. Mallissa ei julkaista jakeiden puhtauksia. (Pressley et al., 2015. Appedix A) Machinex Industries Inc:n esitteessä annetaan ymmärtää kiekkoseulan toimivan kartongin erotukseen myös yhdyskuntajätteen lajittelulaitoksilla (Machinex, 2014). Sekalaisesta yhdyskuntajätteestä eroteltu jae ei ole puhdasta. Kartongin laatu kärsii liasta ja kosteudesta. Sekalaisen yhdyskuntajätteen suurena ongelmana ovat kappaleet, jotka koostuvat useasta materiaalista, sekä biojäte.

3.2 Tiheyteen ja kappaleen muotoon perustuvat erottimet

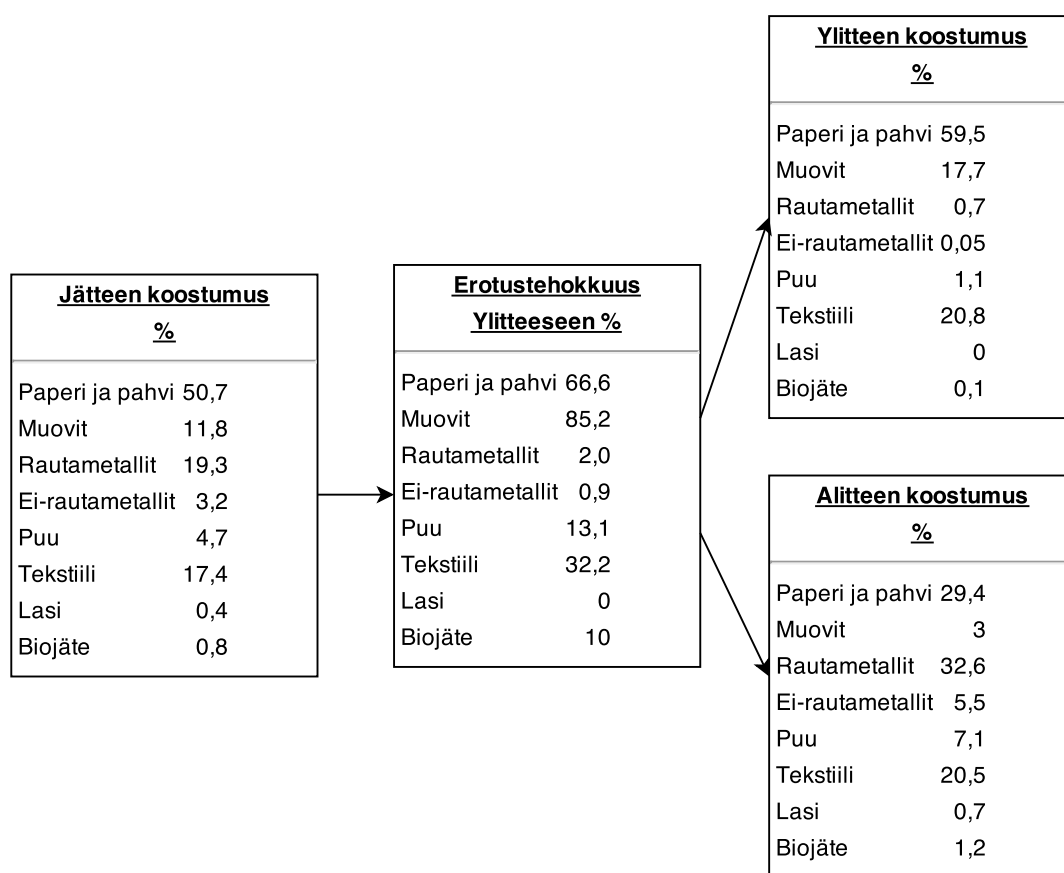
3.2.1 Ilmaerotin

Jättemateriaalia voidaan erotella kappaleiden tiheyteen perustuvilla menetelmillä. Jätteiden osalta tiheyteen perustuvilla menetelmillä jäte jaetaan yleensä kahteen jakeeseen, kevyeen ja raskaaseen, joiden käsittely jatkuu omissa prosesseissaan. Kevyeen jakeeseen erottuu yleisesti paperi, muovi ja suurin osa orgaanisista aineista, raskaaseen jakeeseen erottuu orgaanisista aineista puu ja epäorgaaniset aineet kuten metallit, lasi ja kivi. (Tchobanoglous et al., 1993, 261.) Tyypillinen tiheyteen perustuva menetelmä on ilmaerotin, joka on yksinkertaisimmillaan erotin, jossa ilmaa puhalletaan alhaalta putkeen, jonne jäte ohjataan sivusta tai ylhäältäpäin. Raskaat materiaalit painuvat erottimen pohjalle ja

kevyet materiaalit nousevat ilmapirran mukana kourun yläosaan. Ilmaerottimia on useantyyppisiä. Esimerkiksi vertikaaliset erottimet, joissa kevyt materiaali kulkeutuu ilmapirran mukana putkea pitkin kourun yläosaan, jonka jälkeen syklonissa virtaus loppuu ja kevyt materiaali painuu syklonin pohjalle. Vertikaalisia erottimia ovat muun muassa suoraputki- ja zigzag-erotin, jotka poikkeavat toisistaan muotonsa perusteella. (Tchobanoglous et al., 1993, 559-560.) Vertikaalia ilmaerotinta pidetään hyvin tehokkaana menetelmänä erottelemaan eri tiheyksisiä jätteitä toisistaan (Dodbiba and Fujita, 2004, 174-175). Lisäksi on olemassa horisontaalisia erottimia, joissa ilmapirta tulee samasta suunnasta jätteen kanssa ja kevyt jae kulkee ilmapirran mukana eteenpäin, raskaammat jakeen putoavat pois virrasta erotusalueella (Diaz et al., 2005, 143). Täydelliseen ilmaerotinjärjestelmään kuuluvat yleensä ilmaerotin ja sykloni. Ilmaerottimessa kevyt jae kulkeutuu ilmapirran mukana pois erottimesta ja raskas materiaali vajoaa erottimen pohjalle. Ilmaerotimesta ilma ja kevyt materiaali kulkeutuvat sykloniin, jossa ilma ja kevyt materiaali eroavat toisistaan. (Tchobanoglous et al., 1993, 262.)

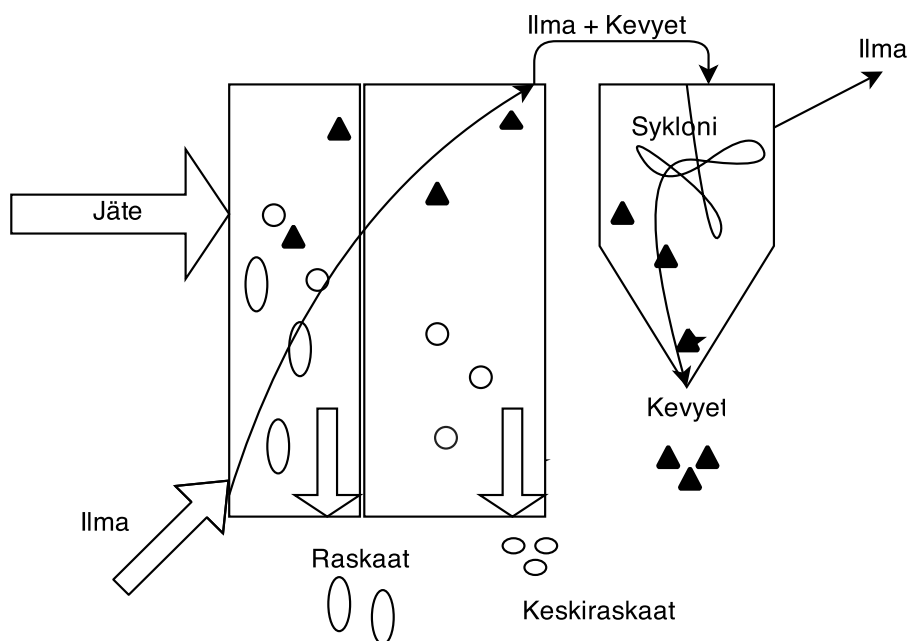
Ilmaerottimilla voidaan erottaa paperia ja muovia jätevirrasta. Ongelmaksi voi kuitenkin muodostua se, että märkä paperi on raskasta ja kulkeutuu herkästi raskaan materiaalin joukkoon. Tämä on ongelma etenkin jos ilmaerotinta käytetään jätepolttoaineen valmistamiseen, sillä silloin polttoon menevä materiaalivirta jää herkästi pieneksi ja haitallisten aineiden pitoisuus nousee suureksi. Tämä johtuu siitä, että muovimateriaalit sisältävät runsaammin haitallisia aineita, kuten lyijyä, kadmiumia ja klooria, kuin paperi tai keittiöjäte. Muovin konsentraatio kevyessä jakeessa kasvaa, jos paperi poistuu raskaan materiaalin joukkoon. Lisäksi tulee huomioda, että ilmaerotin ei toimi tehokkaasti mikäli partikkeli- koko on yli 200 mm, joten tämänkin menetelmän käyttö jätteenkäsittelyssä vaatii vähintään seulonnan tai murskauksen. (Rotter et al., 2004, 1019.)

Kuvassa 7 on esitetty esimerkki ilmaerottimen erotustehokkuudesta. Erotustehokkuudet ovat vuonna 2010 julkaistusta artikkelista, jonka on kirjoittanut Velis. Alitteen ja ylitteen koostumus on laskettu kyseisen artikkelin tietojen pohjalta. Kuvasta nähdään selvästi, että ylite on polttokelpoista jätettä ja jätteen metallit kertyvät alitteeseen. Biohajoavan jätteen osalta esimerkkitapaus ei ole yhdyskuntajätteeseen verrattava, sillä esimerkkitapauksessa biojätteen määrä on poikkeuksellisen alhainen. (Velis et al., 2010, 1031.)



Kuva 7 Esimerkki ilmaerotimen erotustehokkuudesta artikkelia mukaillen (Velis et al., 2010).

Tyypillisesti ilmaerotin jakaa jätteen kahteen jakeeseen. On kuitenkin olemassa erottimia, joissa ilmaerotin voi jakaa materiaalin kolmeen jakeeseen: kevyeen, keskiraskaaseen ja raskaaseen. Tällainen on esimerkiksi kuvan 8 ilmaerotin, jossa ylhäältä syötetystä materiaalista raskaimmat partikkelit putoavat suoraan alas, kevyemmät kulkevat ilmavirran mukana toiselle alueella ja kevyimmät kulkeutuvat ilmavirran mukana sykloniin. (Shapiro and Galperin, 2005, 282.) Kahteen jakeeseen jakavan erottimen toiminta periaate on sama kuin kuvan 8 kolmeen jakeeseen jakavalla erottimella.



Kuva 8 Ilmaerottimen toimintaperiaate, kun erotin jakaa jätteen kolmeen jakeeseen.

Ilmaerotinta voidaan käyttää myös erottelemaan polyvinyylidikloridia (PVC) muista muoveista. PVC:n korkea kloridipitoisuus aiheuttaa vaurioita polttolaitoksissa ja PVC olisi siksi tärkeää poistaa ennen polttoa. Ilmaerotuksella PVC:tä on voitu poistaa yli 80 % kun on käytetty putkimallisia erottimia. Uudemman tyyppisellä paineilmaerottimella, jossa on kiihdytys- ja hidastusosioita, PVC erotustehokkuudeksi on saatu lähes 100 % kun lähtömateriaali on ollut pieneksi jauhettua muovimateriaalia, joka on sisältänyt PVC:tä ja polyetylenitereftalaattia (PET). (Dodbiba and Fujita, 2004, 173-175.) On kuitenkin huomiotava, että materiaalien, joiden tiheys on lähellä toisiaan, erottaminen on vaikeaa.

Ilmapöydäksi kutsuttu menetelmä on hyvin samankaltainen kuin alunperin kivien erotteleluun suunniteltu menetelmä Stoner (Dodbiba and Fujita, 2004, 175-176; Tchobanoglous et al., 1993, 560). Stoner-menetelmä perustuu painovoimaan. Jättemateriaali putoaa tärisevälle alustalle, jonka alapuolelta puhalttaa ilma. Kevyet jakeet nousevat hieman alustan yläpuolelle ilmapöydän vaikutuksesta ja kulkevat ilmapöydän mukana. Raskaat partikkelit, kuten kivet, pysyvät alustan pinnassa ja kulkeutuvat sen mukana vastakkaiseen suuntaa.

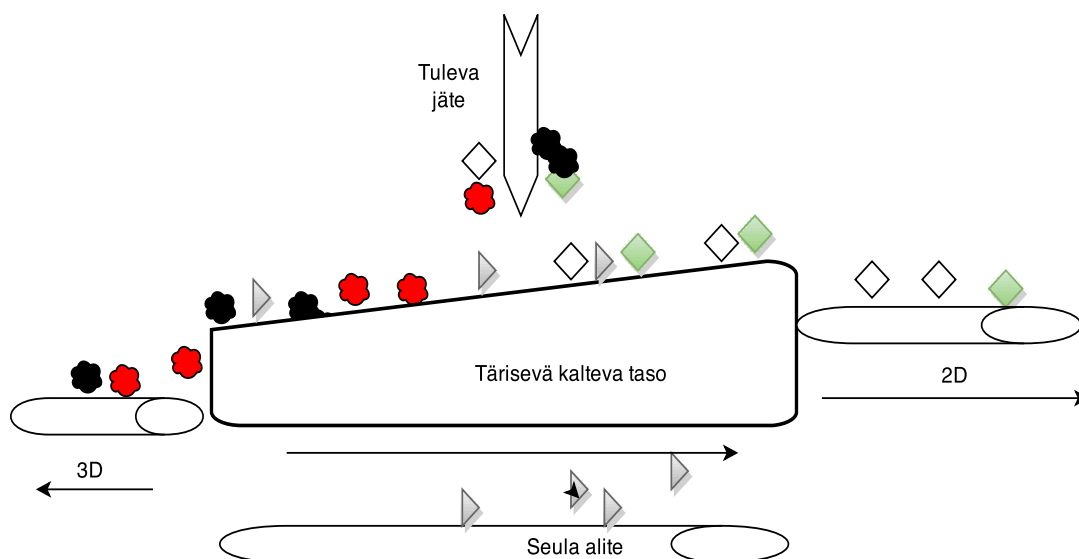
(Tchobanoglous et al., 1993, 560.) Ilmapöydässä jätepartikkelit putoavat kaltevalle tasolle ja tason alapuolelta puhaltava ilma ohjaa kevyet kappaleet korkeampaan tason laitaan ja raskaat kappaleet poistuvat tason matalammasta laidasta. Ilmapöytä on kompakti ratkaisu, sillä se ei vaadi syklonia erottamaan kevyttä materiaalia ilmasta. Tutkimuksissa PVC ja polypropeenin (PP) puhtausasteiksi on ilmapöydällä saatu 99,9 % ja 95,8 %, ja kokonaistehokkuudeksi ilmapöydällä saatiin 94,46 %. Kokeessa käytetty muovi oli 50 % PVC:tä ja 50 % PP:tä. Partikkelien koko oli 2,38-3,36 mm (Dodbiba et al., 2003, 84.) Koska Dodbiban tutkimuksissa lajiteltava materiaali oli valmiiksi hyvin tasalaatuista kappaleiden koon ja materiaalin suhteen tutkimusta ei voi suoraan verrata yhdyskuntajätteen erotteluun.

Ilmapöytä on kompakti ja perusajatukseltaan yksinkertainen menetelmä. Toimivan ilmapöydän suunnittelu ei kuitenkaan ole yksinkertainen asia, sillä erotustehokkuuteen vaikuttavat monet tekijät. Menetelmän toimivuuteen vaikuttaa ilman virtausnopeus. Tiettyyn pisteeseen asti nopeuden kasvattaminen parantaa erotustehokkuutta, mutta liian kova nopeus aiheuttaa myös raskaampien kappaleiden kulkeutumisen kevyen materiaalin joukkoon ja heikentää näin kevyen jakeen puhtautta. Sen sijaan liian alhaisella nopeudella kevytkään jae ei erotu. Esimerkiksi Dodbiban tutkimuksessa PP:n ja PVC:n erotuksessa huomattiin, että alle 1 m/s nopeudella erottumista ei tapahdu koska kevytkään jae ei nouse korkeammalle laidalle, yli 3 m/s nopeudella myös raskaampi PCV kulkeutui PP:n sekaan kokonaisuudessaan. Optiminopeudeksi kyseisessä tutkimuksessa saatiin 1,8 m/s. Toinen erotustehokkuuteen vaikuttava parametri on tason pitkittäinen värähtelytaajuus. Myös värähtelytaajuuden kasvattaminen parantaa erotustehokkuutta kunnes huipun jälkeen erotustehokkuus romahtaa, koska korkean värähtelytaajuuden vuoksi raskaat partikkelit alkavat päätyä kevyen jakeen sekaan, heikentäen näin kevyen jakeen puhtautta ja raskaan jakeen erotustehokkuutta. Nopeuksien lisäksi erotustehokkuuteen vaikuttavat tason jyrkkyydet. Kannen sivuttaisjyrkkyyden eli tason kaltevuus matalan ja korkean laidan välillä vaikuttaa erotustehokkuuteen. Optimialue on pieni ja sen ylittyessä erotustehokkuus romahtaa nopeasti. Kaltevuus jätteen syötön ja tason päättymisen välillä vaikuttaa myös erotustehokkuuteen. Sen suhteen toimiva alue on laajempi, mutta myös tässä kaltevuuden noustua optimitason yli romahtaa erotustehokkuus rajusti. (Dodbiba et al., 2003.)

3.2.2 Ballistinen erotin

Ballistisesta erottimesta voidaan käyttää myös termiä liikerataerotin. Se erottelee aineita toisistaan niiden tiheyden ja elastisuuden mukaan. Sitä on käytetty erottelemaan kompostoituvat aineet pysyvistä aineista. (United States. et al., 1994.) Ballistista erotinta voidaan käyttää useaan tarkoitukseen, kuten erottelemaan rakennusjätettä ja lajittelemaan muoveja. Lisäksi sitä voidaan käyttää materiaalin keräyslaitoksilla ja jätepolttoaineen valmistuksessa. Erotin ei erottele kappaleita puhtaasti niiden tiheyden mukaan, kuten ilmaerotin, vaan huomio myös kappaleiden koon ja elastisuuden sekä muodon. (Velis et al., 2010. 1030-1035.)

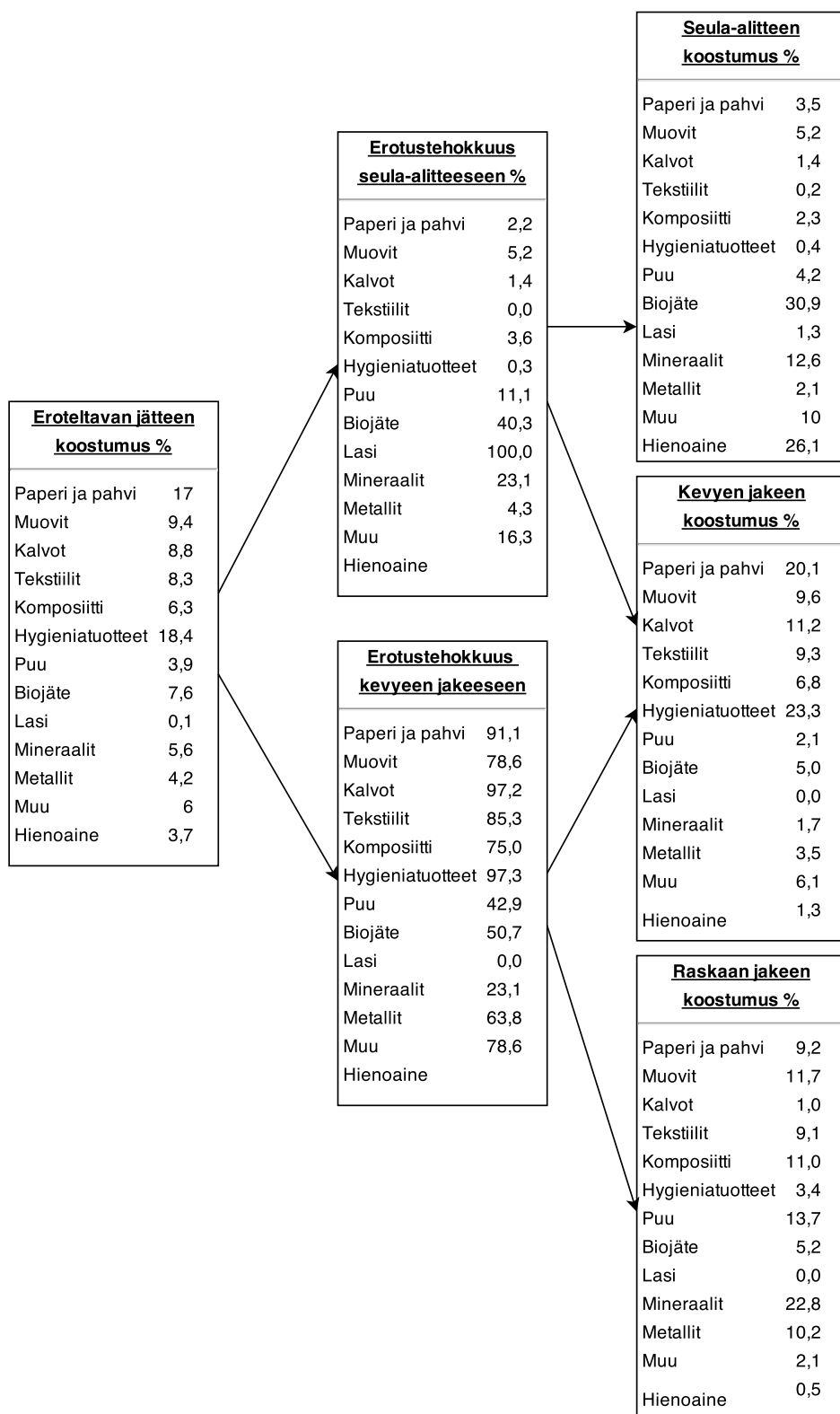
Ballistisessa erottimessa jäte tuodaan kaltevalle, tärisevälle ja metalliselle kuljettimelle. Kevyet materiaalit kulkevat kuljettimen mukana ylöspäin ja raskaat jakeet pyörivät alas. Ballistisessa erottimessa voi olla seula, jolloin hienoaines valuu suoraan erottimen läpi. Kevyen materiaalin joukkoon erottuvat pehmeät ja tasomaiset kappaleet kun taas raskaaseen jakeeseen menevät kovat ja kolmiulotteiset kappaleet. Kuvassa 9 on kuvattu ballistisen erottimen toiminta. Kevyt jae koostuu pahveista, papereista, tekstiileistä, muovikalvoista ja pusseista. Raskaan materiaalin joukkoon kulkeutuvat lasi, kivet, metalli, puu ja suuret kolmiulotteiset muovikappaleet. Ballistisessa erottimessa voi olla seula joka poistaa biojätettä ja hiekkaa. (Velis et al., 2010, 1030-1034.)



Kuva 9 Ballistisen erottimen toimintaperiaate.

Märät paperit, pahvit ja tekstiilit yhdistyvät ballistisella erottimella kevyen materiaalin virtaan, toisin kuin ilmaerottimilla. Tämä on tärkeää jätepolttoaineen valmistuksessa, sillä se lisää lopputuotteen määrää ja etenkin paperin osuutta lopputuotteessa. Paperin osuuden kasvaminen alentaa haitallisten aineiden pitoisuutta lopputuotteessa, koska se alentaa muovin osuutta. Muovituotteissa on merkittävästi haitallisia yhdisteitä, kuten klooria. Haitallisten aineiden poiston osalta menetelmä on tehokas riippumatta siitä, seulotaanko hienoina ballistisella erottimella. Toki hienon aineksen seulonta alentaa haitallisten aineiden osuutta, mutta laskee samalla myös polttoon menevän jätteen määrää. Menetelmän huonona puolena jätteenpolton kannalta voidaan pitää sitä, että kevyt jae voi olla varsin märkää ja vaatii näin ollen kuivatuksen. Mikäli menetelmää käytetään kompostoinnin esikäsittelynä, tätä ongelmaa ei tietenkään ole. (Rotter et al., 2004, 1019.)

Mueller on tutkinut ballistisen erottimen toimintaa vuonna 2002 Saksassa (Velis et al., 2010, 1034.). Kuvassa 10 on esitetty Mullerin saamat tulokset ballistiselle erottimelle. Kuvasta huomataan, että kevyen materiaalin joukkoon meni yli 90 prosenttisesti paperi, pahvi, hygieniatuotteet ja kalvomuovit. Myös merkittävä osa muoveista, tekstiileistä ja komposiittimateriaaleista meni kevyen materiaalin joukkoon. Sen sijaan puu, mineraalit ja metallit menivät suurimmaksi osaksi raskaan materiaalin joukkoon. Metallia oli kuitenkin huomattavasti myös kevyen jakeen joukossa. Ballistisessa erottimessa ollut seula erotti merkittävän osan tutkitun jäte-erän biojätteestä ja hienoaineesta sekä kaiken lasin. Lasin määrä näytteessä oli häviävän pieni.



Kuva 10 Esimerkki ballistisen erottimen erotustehokkuudesta, kuvan tiedot [Mueller et al.] (Velis et al 2010).

3.2.3 Kelluttaminen

Kelluttaminen on erotusmenetelmä, jossa vesitankkiin johdetut materiaalit erottuvat kerroksittain tiheydensä mukaan. Menetelmää voidaan käyttää erottelemaan esimerkiksi ilmaerottimen raskaan jakeen joukkoon jääneet kevyet materiaalit magneettierotuksen jälkeen, jolloin raskaat kappaleet, kuten luut, kivet ja lasinpalat, painuvat altaan pohjalla olevalle kuljettimelle ja orgaaniset aineet saadaan kerättyä talteen altaan pinnalta. Menetelmää voidaan käyttää myös erottamaan puumateriaalit muusta murskatusta rakennusmateriaalista. (Tchobanoglous et al., 1993, 561.)

Kelluttaminen on ollut myös yksi varhaisimpia muovien erotusmenetelmiä. Muovien erottaminen kelluttamalla perustuu niiden erilaisiin ominaisuuksiin, sillä eri muovilaaduissa on selviä eroja. Osa muoveista on erotettavissa toisistaan niiden tiheyden mukaan, toisaalta osalla muovilaaduista erot tiheydessä ovat liian pieniä, jotta erottaminen tiheyden mukaan onnistuisi. Puhtaasti tiheyteen perustuva menetelmä ei ole toimiva, jos erot ovat hyvin pienet. Ratkaisuksi tähän on kehitetty menetelmiä, jotka huomioivat muovilaatujen vedenhylkimiskyvyn. (Dodbiba and Fujita, 2004, 170-172.) Yksinkertaisin kellutukseen perustava menetelmä, Float-Sink-menetelmä, on johtaa eroteltava muovi veteen tai muuhun nesteseen, jossa nestettä kevyemmät muovit nousevat pintaan ja raskaammat painuvat pohjaan. Erottuvaan materiaaliin voidaan vaikuttaa valitsemalla sopiva väliaine tarpeen mukaan. Menetelmä voi olla hidas ja erotettu lopputuote voi olla laadultaan heikkoa, mikäli eroteltavassa jakeessa on mukana muitakin kelluvia partikkeleita, kuten puuta tai korkkia, jotka kulkeutuvat kevyen muovin joukkoon. Muita märkiä menetelmiä, joita käytetään muovityyppien erottamiseen ovat hydrosyklinen menetelmä ja vaahdotus. (Delgado and Stenmark, 2005, 10-11.)

Hydrosyklisen menetelmän käyttäminen parantaa erotustehokkuutta ja nopeutta. Hydrosyklisessä menetelmässä muovikappaleet johdetaan sykloniin, jossa on väliainetta, yleensä vettä. Neste saatetaan pyörivään liikkeeseen ja sen myötä raskaammat partikkelit pyrkivät painovoiman ja keskipakoisvoimien vuoksi kohti syklonin laitoja ja kevyet syklonin keskelle. Raskaat partikkelit valuvat pohjalle ja kevyet kerätään syklonin keskeltä. Kolmas menetelmä on vaahdottaminen, joka pohjautuu muovien vedenhylkimiskykyyn. Menetelmässä altaaseen johdetaan ilmaa ja ilmakuplat tarttuvat kiinni hydrofobisiin muoveihin, jotka nousevat pintaan, kun taas hydrofiiliset muovit jäävät pinnan alapuolelle. Muovien

vedenhylkimiskykyä voidaan säätää, ja nesteen ja vaahdon välistä pintajännitystä voidaan vahvistaa, lisäämällä väliaineeseen reagensseja. (Delgado and Stenmark, 2005, 10-11.) Vaahdotusta on tutkittu muovityyppien erottamiseen toisistaan. Polyetyleenitereflataattia (PET) käytetään muun muassa juomapakkauksissa. PET:iä voidaan käyttää uudelleen sen sijaan PVC:tä ei voida hyödyntää. Vaahdotuksella PVC/PET seoksesta saadaan kerättyä 95 - 100 %:a PVC:stä tai PET:stä talteen. Muovien erotteluketjut ovat monivaiheisia, mikäli tarkoituksena on erotella useamman tyyppisiä muoveja toisistaan. Kolmivaiheisella menetelmällä voidaan erotella neljä muovilaatua. (Dodbiba and Fujita, 2004, 170-172) Artikkelissaan Dodbiba kertoo, että Shibata [1996] on onnistuneesti erottanut PVC:n, polykarbonaatin (PC), polyasetalin (POM) ja polyfenyylietterin (PPE) seoksesta jakeet erilleen niin, että ensimmäisessä vaiheessa saatiin erilleen PPE 100 %:n puhtaudella, toisessa vaiheessa PVC 95,7 % puhtaudella ja viimeisessä vaiheessa POM:ia 87,6 % ja PC:tä 90,3 % käyttäen yleisimpiä reagensseja, kuten parkkihappoja, sapponiinia ja natriumligninisulfaattia. Kehittyneitä tekniikoita käyttäen muovilaatujen erottelussa päästään käsiksi hyviin tuloksiin, yli 99 % erotusasteisiin ja yli 95 % puhtauksiin. (Dodbiba and Fujita, 2004, 170-172.) Tämä tosin koskee tilanteita, joissa lähtömateriaali itsessään on tasalaatuista muovijätettä eikä sekalaista yhdyskuntajätettä.

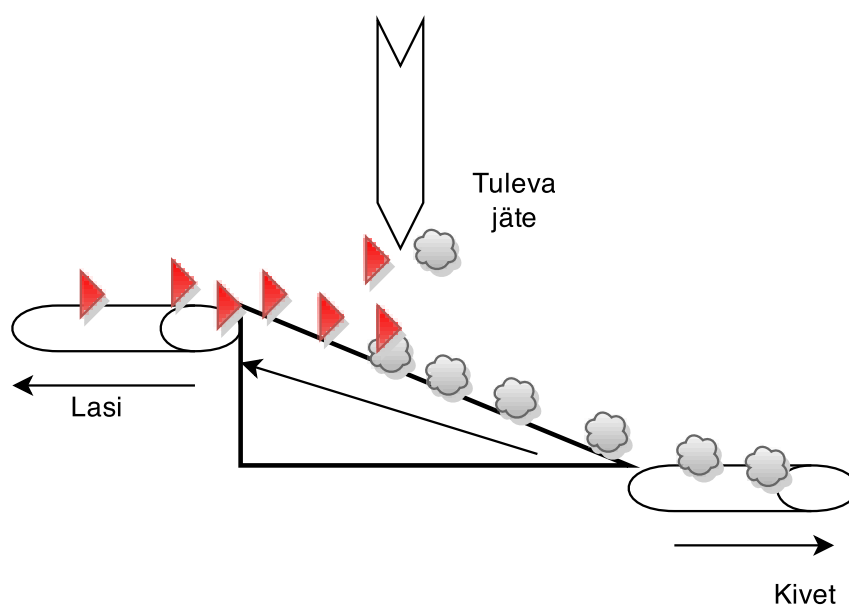
Kelluttamisessa on kuiviin menetelmiin verrattuna merkittäviä heikkouksia. Ensinnäkin kellutusmenetelmissä syntyy käsiteltävää jätevettä, lisäksi tarvitaan kalliita reagensseja, joilla veden tiheyttä muutetaan. Lisäksi erotelluista jakeista tulee poistaa vesi tai muutoin kuivata eroteltu muovijäte. Yllä mainituista syistä johtuen kuivat menetelmät ovat taloudellisia ratkaisuja muovien erottamiseen kuin märät menetelmät. (Dodbiba and Fujita, 2004, 10-11.)

3.2.4 RecGlass

RecGlass on menetelmä, joka on kehitetty erottelemaan materiaalit toisistaan perustuen kappaleiden muotoon. RecGlass menetelmässä eroteltavien kappaleiden tiheys ja kokoluokka ovat samoja, mutta niiden muoto vaihtelee. Mekaanis-biologisilla laitoksilla pyritään erottamaan yhdyskuntajätteen biohajoavat ja pysyvät aineet toisistaan. Yleisesti jäte seulotaan ja käsitellään magneetilla, jolloin biohajoava jäte saadaan pääosin erilleen ja pysyvästä jätteestä saadaan metallit eroteltua. (Dias and Carvalho, 2012, 931.) Ongelmaksi

muodostuu lasi ja sen erottaminen. Yksi tapa erotella lasia on optinen erottelu, mutta sen toimivuus tilanteessa, jossa lasi on hienojakoista sekä pahasti kontaminoitunutta, on heikko. Lisäksi korkea muiden partikkeleiden pitoisuus heikentää optisen erottelun tehokkuutta. (Dias et al., 2012, 104.) Biologisen käsittelyn jälkeen erotettavassa raskaassa rejektissä on mukana merkittävä määrä lasia. Partikkelikoko on hyvin pientä, noin 90 % partikkeleista on kooltaan alle 11mm, kuitenkin niin, että vain 8 % on alle 4mm kokoisia. Liki 80 %:a partikkeleista on hyödynnettävää lasia, joten sen saaminen hyötykäyttöön parantaisi sekä kierrätysastetta, että pienentäisi kaatopaikkakustannuksia. Tällä hetkellä koko jae käsitellään kaatopaikalla. Edellä kuvattu rejekti ja jätteidenkäsittelytapa, jolla siihen on päädytty, on tehty Portugalissa Tratolixon mekaanis-biologisella käsittelylaitoksella. Merkittävin kontaminaatio raskaassa rejektissä olivat kivet. Lisäksi mukana oli kierrätykseen kelpaamatonta lasia ja pieniä määriä muita aineita. (Dias and Carvalho, 2012.)

Lasilla ja kivillä on sama tiheys, joten tiheyteen perustuvat menetelmät eivät sovellu erotukseen. Lasipartikkelit ovat kuitenkin muodoltaan litteämpiä kuin kivet. Tähän tietoon ja vanhaan mineraalien erotusmenetelmään perustuen kehitettiin uusi menetelmä erottelemaan kivet lasista. Yksinkertaisesti kuvattuna menetelmässä rejekti johdetaan kaltevalle kuljettimelle, joka liikkuu vaihtelevalla nopeudella. Hihnan materiaali on sellainen, että kivet, jotka ovat lasia pyöreämpiä vierivät hihnaa myöten alas ja lasi jää hihnalle, eikä luisu sitä myöten, vaan kulkee hihnan liikkeen mukana ylöspäin. Kuvassa 11 on esitetty RecGlass menetelmän toiminta.



Kuva 11 RegClass-erottimen toiminta.

Dias on tutkinut menetelmän toimivuutta Tralolixon mekaanis-biologisen laitoksen raskaalla rejektillä ja muutamalla toisistaan eroavalla hihnamateriaalilla. Hihnojen osalta staattinen kitkakerroin kivien ja hihnan osalta oli lähes sama, mutta lasipartikkeleiden osalta kitkakerroin vaihteli. Tutkimuksessa käytettiin jakeita, joiden koko oli alle 8 mm, sillä niiden erottelu optisilla menetelmillä ei onnistu tehokkaasti. Tutkimuksessa todettiin, että menetelmällä raskaasta jakeesta saadaan tehokkaasti poistettua kivet. Kivet ovat esteenä lasin hyötykäytölle. Taulukossa 3 on esitetty lasin konsentraatio ennen ja jälkeen RecGlass erotinta. 92 % 4-5,6mm kokoisista kappaleista meni lasin joukkoon ja 5,6-8 mm kappaleista 77 % meni lasin joukkoon. (Dias and Carvalho, 2012.)

Taulukko 3 Lasin konsentraatio rejektissä ennen ja jälkeen RecGlass-erotinta (Dias and Carvalho, 2012).

Partikkeli koko	Ennen %	Jälkeen %
4 - 5,6mm	78,5	97,8
5,6 - 8mm	87,7	95,3

3.2.5 Pyörivä kartio

Pyörivä kartio on suunniteltu kierrätettävien materiaalien erotteluun. Kappaleiden tapaa liikkua liukumalla tai pyörimällä on käytetty useiden erottelumenetelmien perustana. Usein ongelmaksi muodostuu kappaleiden koko. Monet muotoon perustuvat menetelmät on suunniteltu kappaleille, joiden koko on joitakin millimetrejä. Kierrätysmateriaalien kohdalla menetelmän pitäisi pystyä erottelemaan kappaleet, joiden koko olisi suurempi, 1-50 mm. Tällä kokoalueella kappaleiden muodot vaihtelevat enemmän. Alle 1 mm kappaleet ovat usein muodoltaan toistensa kaltaisia, kun taas suuremmat kappaleet ovat moniulotteisia ja voivat koostua eri materiaaleista. Kovin monitahoiset kappaleet tukkivat herkästi useat erottelulaitteet. Pyörivää kartiota on kehitetty vastaamaan näihin ongelmiin. (Beunder et al., 2002.)

Beunder on tutkinut pyörivää kartiota, jonka ylähalkaisija on ollut 2 metriä ja alahalkaisija 0,8 metriä. Kartion kulma on 40 ° ja pyörimisnopeus 10-20 rpm. Kartion yläpäästä sisään syötetyt kappaleet erottuivat toisistaan liikkumisnopeutensa mukaan. Hitaat kappaleet valuihin kartion laittaa myöten alas ja nopeat kappaleet kulkivat kartion sisällä alaspäin. Mitä

nopeampia kappaleet ovat sitä vähemmän kartion pyöriminen vaikuttaa niihin. Kappaleiden erottuminen perustuu niiden sijoittumiseen kartion alapuolella olevassa jakajassa. Pyörivää kartiota voidaan käyttää sellaisten jätėjakeiden lajitteluun, joissa on mukana sekä litteitä että jyvämäisiä kappaleita, kuten kiviä ja metalliliuskoja. Beunder tutki kartion käyttöä lasinkeräysjätteen seulomisessa. Kierrätyslasin seassa on usein erilaisia korkkeja. Kierrätyslasin erottelussa pyörivä kartio ei toiminut toivotulla tavalla, sillä lasi pirstoutuu pyörivässä kartiossa. (Beunder et al., 2002.)

3.2.6 Leijupetierotin

Leijupetierotimessa, englanniksi Gas-Solid Fluidized Bed Separator, jätettä erotellaan sen tiheyden ja muodon mukaan. Menetelmässä murskattu jäte ohjataan kammioon, jossa on petimateriaalia. Käsiteltävässä tutkimuksessa petimateriaalina käytettiin lasihelmiä. Kammioon puhalletaan ilmaa alapuolelta ja näin saadaan jätettä sisältävä petimateriaali liikkumaan. Liikkeen seurauksena osa jätteestä painuu pohjalle ja osa nousee pintaan. Menetelmässä erottelu perustuu sekä lajiteltavan jätteen tiheyteen että muotoon. Sekito tutki menetelmää murskatun yhdyskuntajätteen erottelussa laboratoriokokoluokan laitteistolla. (Sekito et al., 2006.)

Japanissa erilliskerätty ja murskattu yhdyskuntajäte käsitellään materiaalinkeräyslaitoksilla, joissa jätteestä erotellaan metallit ja tämän jälkeen jäte ohjataan seulaan, jonka alite on pääosin palamatonta ja ylite palavaa materiaalia. On kuitenkin huomattu, että palavan materiaalin hävikki on suuri seulaan perustuvalla menetelmällä. Tästä syystä on tärkeää löytää tehokkaampia tapoja erotteluun. Erilliskerätyn ja murskatun yhdyskuntajätteen partikkeli-muoto vaihtelee runsaasti, joten puhtaasti muotoon perustuvat erottelumenetelmät on todettu tehottomiksi. Nesteeseen perustuvien menetelmien huonot puolet, kuten jakeiden kuivatuksen tarve ja jätevedenkäsittelyn vaatimukset tekevät niistä huonosti tarkoitukseen sopivia. Kevyet muovit ja paperit karkaavat herkästi ilmapöydältä, lisäksi ilmaerottimilla on vaikeaa erotella alumiinia ja muovia toisistaan. Sekito on tutkinut sopisiko tarkoitukseen leijupetierotin, jolla oli saatu erotettua muovi ja kupari toisistaan yli 90 %:n puhtaudella. (Sekito et al., 2006.)

Tutkimuksessa selvitettiin partikkeleiden koon, muodon ja tiheyden vaikutusta niiden erottumiseen. Suuret kuution muotoiset kappaleet erottuivat tiheydensä mukaisesti, mutta partikkeleiden koon pienentyessä alkoi petimateriaalin sekaan jäädä jätepartikkeleita, jotka eivät erottuneet. Myös levymuotoisilla kappaleilla oli ongelmia erottumisen suhteen. Nämä asiat selittävät myöhempien kokeiden tuloksia. (Sekito et al., 2006.)

Ensimmäisessä varsinaisessa testissä ei saavutettu erottelun kannalta hyvää tulosta. Petimateriaalin sekaan jäi runsaasta jättemateriaalia, joka ei erottunut lainkaan ja erotustehokkuudeksi pysyvien osalta tuli 49 % ja palavien osalta 64 %. Huomattavaa on, että muovikalvoista 60 % ja paperista 33 % jäi petimateriaalin sekaan. Tämä korreloi hyvin aiemman kokeen kanssa, jossa tutkittiin kappeleiden muotojen vaikutusta erottumiseen. Metallista 65,5 % ja lasista 54,4 % päätyi pohjakerrokseen kuten oli tarkoituskin mutta 28,6 % metalleista ja 25 % lasista jäi petimateriaalin sekaan. Taulukossa 4 on esitetty ensimmäisen varsinaisen kokeen tulokset. (Sekito et al., 2006.)

Taulukko 4 Leijupetierotin, testi 1 (Sekito et al., 2006).

	Pintaan %	Erottui pohjalle %	Jää petimateriaalin sekaan %
Puu	93,7	0,1	6,2
Muovi	57,2	27,9	14,9
Muovikalvo	10,5	29,1	60,4
Vaahtomuovi	85,5	0	14,5
Kumi	47,6	35,4	17,9
Paperi	37,1	28,9	33,9
Metalli	5,9	65,5	28,6
Lasi	20,9	54,4	25,7

Kokeen jälkeen todettiin petimateriaalin sekaan jääneiden partikkeleiden kerääntyneen pohjalle seinän lähelle, jossa petimateriaalin liike oli heikompaa, muodostaen peitteen ilmansyötön päälle. Tämä lisäsi partikkeleiden kerääntymistä. Erotustehokkuuden kasvattamiseksi pitää partikkeleiden sedimentoituminen heikosti liikkuvalla alueella estää. Tätä ongelmaa lähdettiin ratkaisemaan kolmella tavalla:

- Sekoittamalla sedimentoitunutta petimateriaali mekaanisesti 5 minuutin jälkeen.
- Muuttamalla syötetyn jätteen koostumusta niin, että syötteessä ei ole paperia eikä kalvomaisia muoveja.
- Sekoittamalla petimateriaalia jatkuvasti.

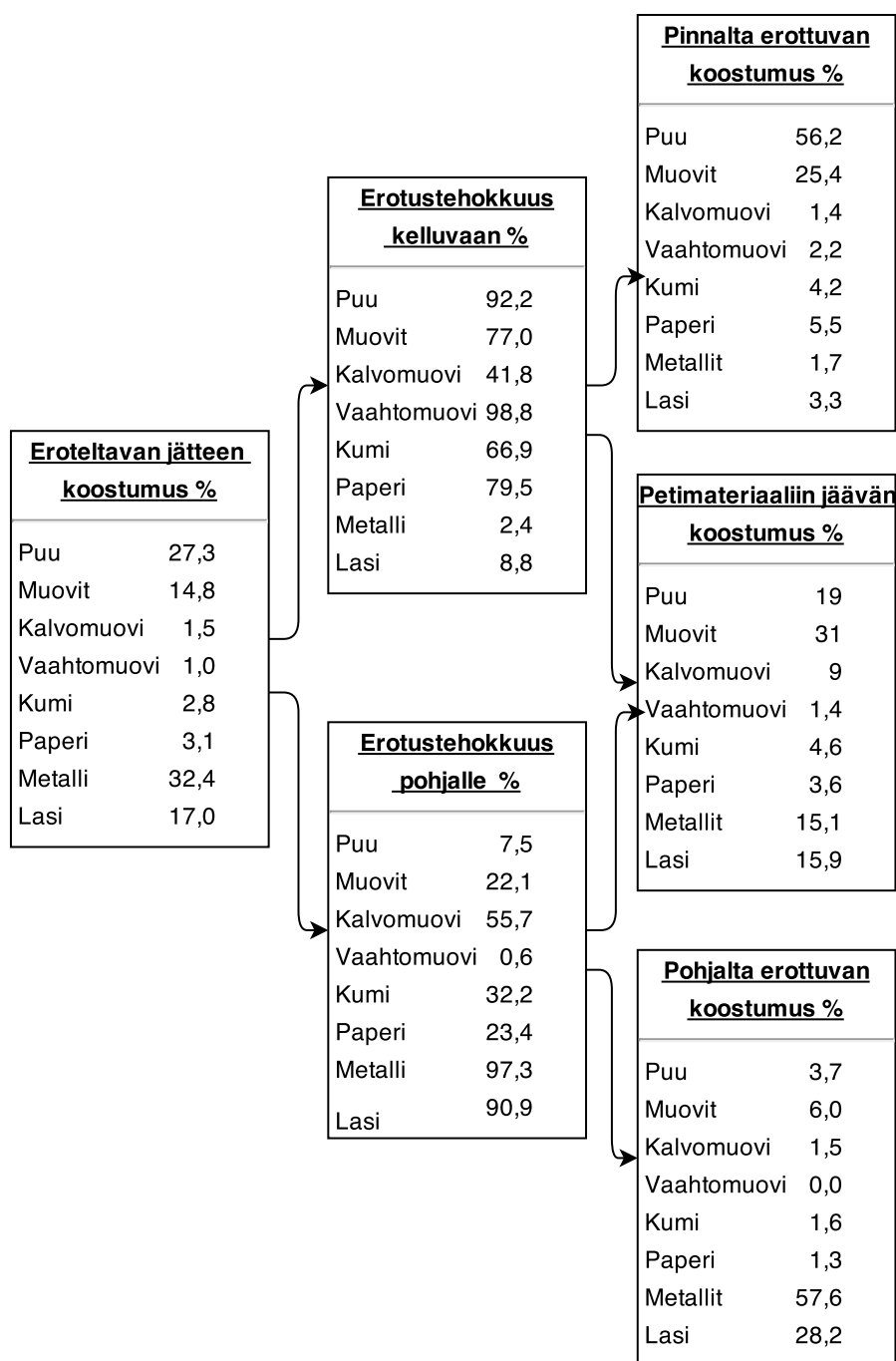
Sekoittamalla sedimentoitunut materiaali 5 minuutin jälkeen saatiin erotustehokkuus nousemaan yli 80 %:n mutta yhä 4 % jätemateriaalista jäi petimateriaalin sekaan. Poistamalla paperi, kalvomaiset muovit ja vaahtomuovit ennen erotinta, nousi erotustehokkuus liki 90 %:iin mutta petimateriaalin sekaan jäi partikkeleista 2,8 %. Tulos osoittaa, että paperit ja kalvomaiset muovit heikentävät menetelmän erotustehokkuutta, vaikka niiden pitoisuus olisi pieni. Jatkuvasti sekoittavalla menetelmällä päästiin pysyvien osalta 79,7 % ja palavilla 79,4 % erotustehokkuuteen, vaikka paperit ja kalvomaiset muovit olivat mukana, lisäksi petimateriaalin sekaan jäi vain 0,4 % syötetystä jätemateriaalista. Taulukossa 5 on esitetty jätejakeiden jakautuminen jatkuvasti sekoittavan leijupetierottimen jälkeen. (Sekito et al., 2006.)

Taulukko 5 Leijupetierottimen erotustehokkuus, jatkuvasti sekoittava (Sekito et al., 2006).

	Pintaan %	Pohjalle %	Jää petimateriaalin sekaan %
Puu	92,2	7,5	0,3
Muovi	77	22,1	0,9
Muovikalvo	41,8	55,7	2,6
Vaahtomuovi	98,8	0,6	0,6
Kumi	66,9	32,2	0,7
Paperi	79,5	23,4	0,5
Metalli	2,5	97,3	0,2
Lasi	8,8	90,9	0,4

Kun leijupetierotinta verrataan Japanissa kierrätyslaitoksilla käytössä olevaan seulamene-
telmään, jossa kokonaiserotustehokkuus palavan ja pysyvän materiaalin välillä jäi
60 %:iin, on leijupetierotin varteenotettava liki 80 %:n kokonaiserotustehokkuudella pala-
van ja pysyvän materiaalin välillä. Menetelmän suhteen tulee huomioida, että syötettävällä
jätemateriaalilla on suuri merkitys menetelmän toimivuuteen. Partikkeleiden koko, muoto

ja tiheys vaikuttavat erottuvuuteen. Erotustehokkuutta voidaan parantaa sekoittamalla petimateriaalia jatkuvatoimisesti, lisäksi kannattaa harkita ilmaerotuksen käyttämistä paperien, kalvomaisten muovien ja vaahtomuovin erottamiseen ennen leijupetierotinta. (Sekito et al., 2006.) Kuvassa 12 on esitetty Sekiton tutkimuksissa saadut erotustehokkuudet, kun käytössä on jatkuvasti sekoittava malli. Menetelmä vaikuttaa mielenkiintoiselta ja sen jatkokehittelyä ja todellisia käyttökokemuksia kannattaa seurata.



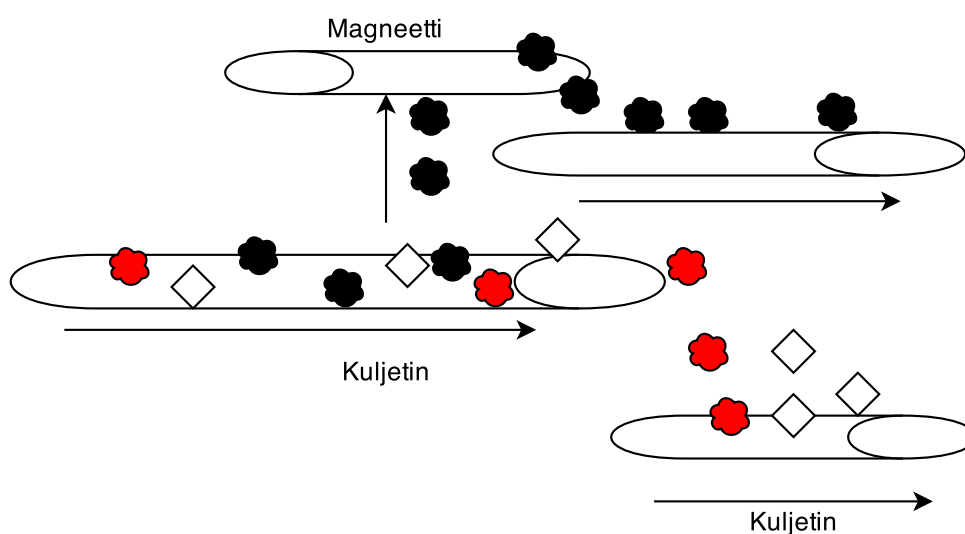
Kuva 12 Leijupetierottimen erotustehokkuus (Sekito et al., 2006).

3.3 Sähköön ja magneettisuuteen perustuvat erottimet

3.3.1 Magneettierotin

Magneettierottimilla erotetaan rautametallit muusta jätemateriaalista. Yhdyskuntajätteestä rautametallit erotellaan yleensä joko murskauksen ja ilmaerottimen jälkeen tai murskauksen jälkeen ennen ilmaerotinta. Joissakin tapauksissa suuria kappaleita voidaan erotella magneetilla jo ennen murskausta. Tässä tapauksessa puhutaan esiseulasta. Magneettia käytetään myös erottamaan syntypaikkalajitellusta metallijätteestä rautametallit lisäksi sillä voidaan myös kerätä rautametalleja jätteenpolton tuhkasta. (Rotter et al., 2004, 1017-1018; Tchobanoglous et al., 1993, 262.)

Magneettierotin perustuu yksinkertaisimmillaan kestopagneettiin, joka vetää kuljettimella kulkevat kappaleet puoleensa ja loput kappaleet kulkevat kuljettimen mukana eteenpäin. Magneettiin perustuva erotusmenetelmä on voitu rakentaa myös useamman magneetin ja erilaisten kuljettimien yhdistelmänä. (Tchobanoglous et al., 1993, 565-576.) Magneettierottimet voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin: magneettiseen vetopyörään, magneettiseen rumpuun ja hihnamagneetteihin. Magneettiseen vetopyörään perustuvassa erottimessa kuljetinhihnan loppupisteessä on magneettinen vetopyörä. Kuljettimen tullessa loppupisteelle, ei-magneettinen materiaali jatkaa matkaa suoraan seuraavalle kuljettimelle, mutta magneettiset kappaleet kulkevat hihnan mukana vetopyörän ympäri ennen kuin putoavat seuraavalle kuljettimelle. Hihnamagneetit sen sijaan asennetaan kulkevan materiaalivirran yläpuolelle ja ne vetävät rautametallit pois virrasta muun materiaalin jatkaessa eteenpäin. Magneettisessa rummussa jätevirta johdetaan pyörivään rumpuun jolloin magneettiset metallit kiinnittyvät rumpuun ja ei-magneettiset kulkevat rummun ohi. (Diaz et al., 2005, 149-151.) Hihnamagneetin toiminta on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13 Magneettierottimen toimintaperiaate

Tyypillisesti murskatusta yhdyskuntajätteestä saadaan magneettierottimella talteen noin 80 % rautametalleista mutta mikäli jäte on ensin käsitelty ilmaerottimella, saadaan metalleista eroteltua magneetilla jopa 85-90 %. Ilmaerottimella erotetut kevyet jakeet, kuten muovit ja paperit, muodostavat ison osan yhdyskuntajätteestä ja niiden erottaminen ennen magneettierotinta pienentää jätevirran paksuutta. Metallit, joita magneetilla erotellaan, sijaitsevat jätteen pohjavirrassa ja pääsevät paremmin vuorovaikutukseen magneetin kanssa jätevirran ohentuessa. Kevyiden jakeiden poisto ennen magneettia parantaa erotetun metallin puhtautta, sillä paperit ja muovit voivat takertua metallikappaleisiin ja kulkeutua rautametallin joukkoon. Erotustehokkuutta ja erotellun jakeen puhtautta voidaan kasvattaa myös lisäämällä magneetteja useampaa kohtaan erotteluprosessia. (Diaz et al., 2005, 149-151.)

Metalleja voidaan poistaa suoraan jätteen joukosta ja jätteenpolton tuhkan joukosta. On kuitenkin tärkeää, että paristot ja elektroniikka saadaan poistettua ennen muuta käsittelyä, sillä niiden sisältämät raskasmetallit saastuttavat helposti muun vähemmän myrkyllisen jätteen aiheuttaen siten lisää haasteita jätteenpolton ympäristövaikutustenhallintaan. (Rotter et al., 2004, 1019) Jätteenpolton tuhkan määrä on 10-30 % polttoon syötetyn massan määrästä. Pohjatuhka koostuu pääosin metalleista ja kivimateriaaleista. Tanskassa tehdyssä tutkimuksessa pohjatuhkassa olevan potentiaalisen rautametallin on laskettu olevan $7,2 \% \pm 18 \%$. pohjatuhkan märkäpainosta ja keräystehokkuuden on laskettu olevan $85 \% \pm 28 \%$. Epävarmuus on esitetty suhteellisenä virheenä. Tanskan mallissa pohjatuhka ohjataan 50mm rumpuseulaan, jonka jälkeen molemmat virrat ohjataan magneettierottimiin.

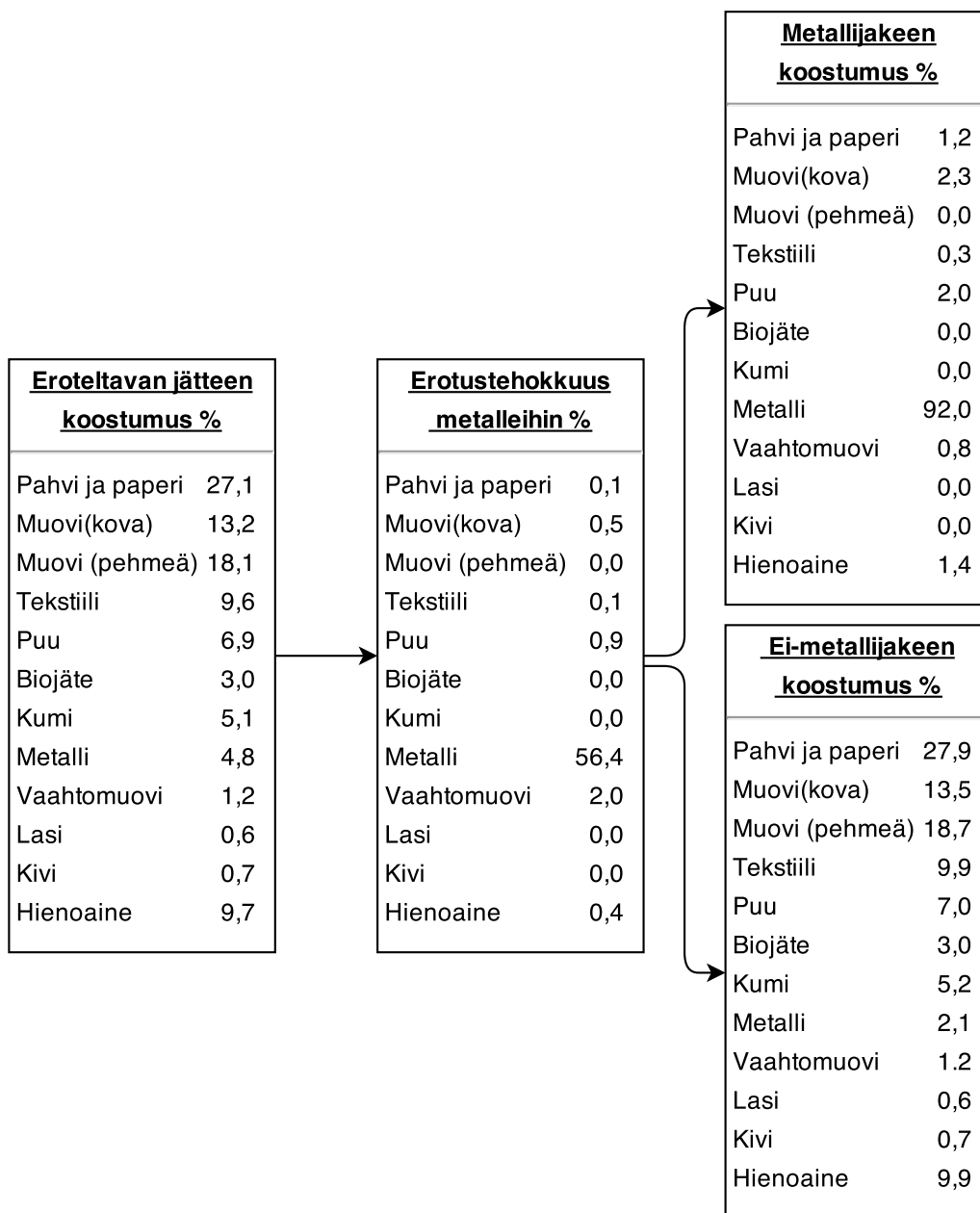
Magneettierottimien jälkeen rautametallit johdetaan jatkokäsittelyyn, jossa seulojen ja magneettierottimien avulla ensimmäisen magneettiseulan rautametalista erotellaan vielä muut mukaan kulkeutuneet jakeet. Ensimmäiseltä erottimelta erottunut ei-rautametalli jatkaa matkaa muihin käsittelyihin kokonsa mukaisissa erissä. Myös muissa maissa tehdyissä tutkimuksissa on magneettierotuksen teho rautametalille on ollut yli 80%. (Allegrini et al., 2014, 1630.)

Jätteenpolton lentotuhkasta voidaan kerätä talteen metalleja magneettierotuksella. De Boom on esitellyt tutkimuksessaan kaksi erilaista menetelmää: kuivan magneettierotuksen ja märän magneettierotuksen. Lopputuloksena tutkimuksessa todettiin, että vaikka magneettiset partikkelit voidaan erottaa tehokkaasti jätteenpolton lentotuhkasta magneettien avulla ei se ole taloudellisesti kannattavaa kuin suurilla laitoksilla. (De Boom et al., 2011, 1505, 2324-2025.)

Tutkimuksessa, jossa selvitettiin jääkaapeista muodostuvan materiaalin erottelua, murska-
tuista jääkaapeista poistettiin ilmaerotuksen avulla polyuretaanivaaho ja muu materiaali ohjattiin magneettierottimelle. Teräs erottui kokonaisuudessaan magneettierottimella, mutta syöttönopeuden ollessa alhainen, teräksen keräysastiaan kulkeutui myös muita materiaaleja, kuten muovia, alumiinia ja kuparia. Koe tehtiin kuudella eri syöttönopeudella, alhaisimmillaan syöttönopeus oli 40 rpm. Mitä korkeampaa syöttönopeutta käytettiin sitä puhtaampana teräs saatiin erotettua. Kun syöttönopeutta nostettiin aina 350 rpm:iin saatiin teräksen puhtausasteeksi 100 %. Nopeuden kasvaessa terästä ei kulkeutunut toiseen keräysastiaan, joten erotustehokkuus pysyi hyvänä. (Ruan and Xu, 2011.) Vastaavat tulokset on saatu myös tutkimuksessa, jossa tutkittiin värikasettien materiaalien erottelua (Ruan et al., 2011).

Lyhyesti voidaan sanoa magneettisten menetelmien olevan tehokkaita poistamaan rautametallit jätteen joukosta. Erotustehokkuus on yleisesti yli 80% ja sitä voidaan parantaa säätämällä jätteen syöttönopeutta ja ohjaamalla magneetille tasalaatuista jätettä. Mitä vähemmän erottimelle tulee kevyitä jakeita, kuten paperia ja muovia, sitä tehokkaammin erotin toimii. Kevyet jakeet sekä lisäävät erottimelle tulevaa massavirtaa, että takertuvat herkästi rautametalleihinkin alentaen näin erotetun materiaalin puhtautta. Puhtausongelmaa voidaan helpottaa myös käyttämällä useampia magneettierottimia.

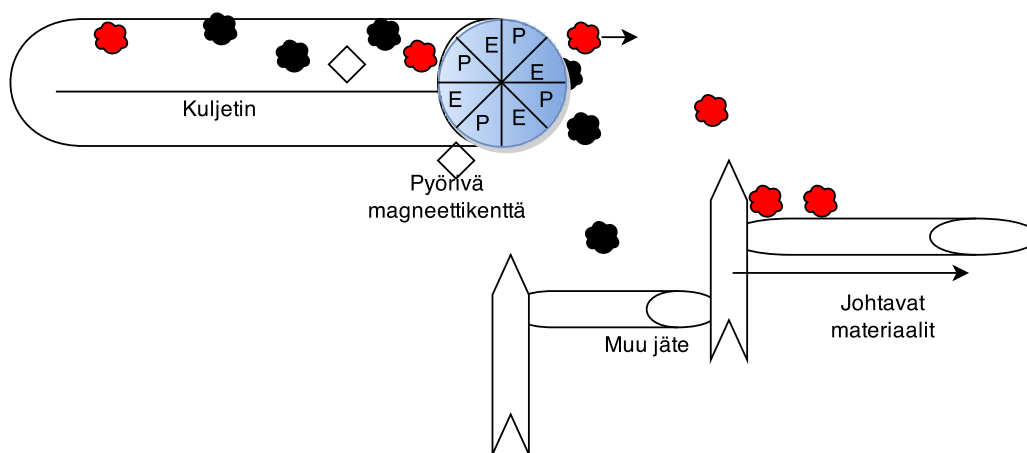
Kuvassa 14 on esitetty Nasrullahin (2015) työn mukaan laskettu erotustehokkuus magneettille. Kyseistä kuvaa tulkitessa tulee huomioida, että metallijae käsittää sekä magneettiset, että ei-magneettiset metallit. Tästä syystä erotustehokkuus näyttää alhaiselta. Sen sijaan kuvasta näkee hyvin mitä epäpuhtauksia rautametallien joukkoon kulkeutuu.



Kuva 14 Magneettierottimen erotustehokkuus mukaillen artikkelia (Nasrullah 2015)

3.3.2 Pyörrevirtaerotin

Pyörrevirtaerottimet tunnetaan myös nimellä Eddy-Current-erotin. Erottimet perustuvat Faradayn sähkömagneettisen induktiolakiin, jossa indusoitunut lähdejännite on magneettivuon muutos aikayksikössä. Toisin sanoen jännite suhteessa magneettikentän poikkileikkauspinta-alaan on magneettivuon muutos aikayksikössä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että mikäli johtava kappale, kuten alumiini, joutuu ajan mukaan vaihtuvaan magneettikenttään muodostuu kappaleeseen jännite joka synnyttää kappaleeseen pyörrevirtoja. Pyörrevirrat indusoivat magneettikentän, jonka polariteetti on vastakkainen alkuperäisen kentän kanssa ja tästä johtuen kappale työntyy pois kentästä. (Tchobanoglous et al., 1993, 567.) Pyörrevirtaerottimella voidaan erottaa ei-rautametallit, kuten alumiini ja kupari, muista pysyvistä materiaaleista. Myös eri metalleja voidaan erottaa toisistaan, mikäli niiden sähköjohtavuudessa on riittävä ero. Pyörrevirtojen aiheuttamien magneettisten voimien suuruus riippuu kappaleen sähköjohtavuudesta, näin ollen kappale saa erilaisen liikevaikutuksen, jolla se irtoaa magneetista. (Ruan et al., 2014, 110-111.) Kuvassa 15 on esitetty pyörrevirtaerottimen toiminta.



Kuva 15 Pyörrevirtaerottimen toimintaperiaate.

Jätepartikkeleiden erottumiseen vaikuttavat partikkelien ominaisuudet ja menetelmän asetukset. Erottuakseen partikkeleiden, joilla on erilainen sähköjohtavuus, tulee olla samankaltaisia kooltaan ja muodoltaan. Metallit voivat erottua toisistaan myös, vaikka niiden

koko eroaisi, mutta sähkönjohtavuus ja muoto ovat samanlaiset tai jos muoto eroaa, mutta koko ja sähkönjohtavuus ovat samanlaiset. Sen sijaan, mikäli partikkeleiden koko, muoto ja sähkönjohtavuus eroavat toisistaan, erottumista ei tapahdu. Pyörrevirtaerotinta voidaan käyttää erottelemaan partikkeleita, joiden koko on 2-50 mm. Partikkeleiden koolla on kriittinen merkitys erottumiseen. Alle 2 mm partikkelit eivät reagoi toivotulla tavalla, vaikka erottimen parametrit olisi säädetty parhaalla mahdollisella tavalla. (Ruan et al., 2014, 111.)

Kappaleen muodolla on merkitystä sen erottumiseen. Pyörrevirtaerotin ei kykene erottelemaan kalvomaisia ei-rautametallesia ja levymäiset kappaleet erottuvat paremmin kuin palloiset tai epäsäännölliset kappaleet. Kosteus on merkittävä erotustehokkuuteen vaikuttava tekijä. Märkä jätemateriaali laskee pyörrevirtaerottimen erotusastetta, sillä pienet metallipartikkelit voivat jäädä kiinni syöttöhihnaan. Jätteen syöttötavalla ja syöttönopeudella on merkitystä menetelmän erotustehokkuuteen. Monitasoinen syöttö heikentää erotustehokkuutta. Magneettirummun syöttönopeudella voidaan vaikuttaa erottelutehokkuuteen. (Ruan et al., 2014, 112.) Voidaan sanoa, että pyörrevirtaerottimen erotusaste kasvaa kun kohtausalue, materiaalivolyyymi ja partikkeleiden johtavuus kasvavat. Myös magneetin pyörimisnopeuden kasvu, magneettinapojen määrä ja magneettikentän voimakkuuden kasvu parantavat erotusastetta, kun taas korkea syöttönopeus alentaa erotustehokkuutta. Erotustehokkuuden kannalta onkin oleellista pitää syöttönopeus niin alhaisena kuin mahdollista, nostaen samalla magneetin pyörimisnopeutta (Ruan et al., 2014, 112-113).

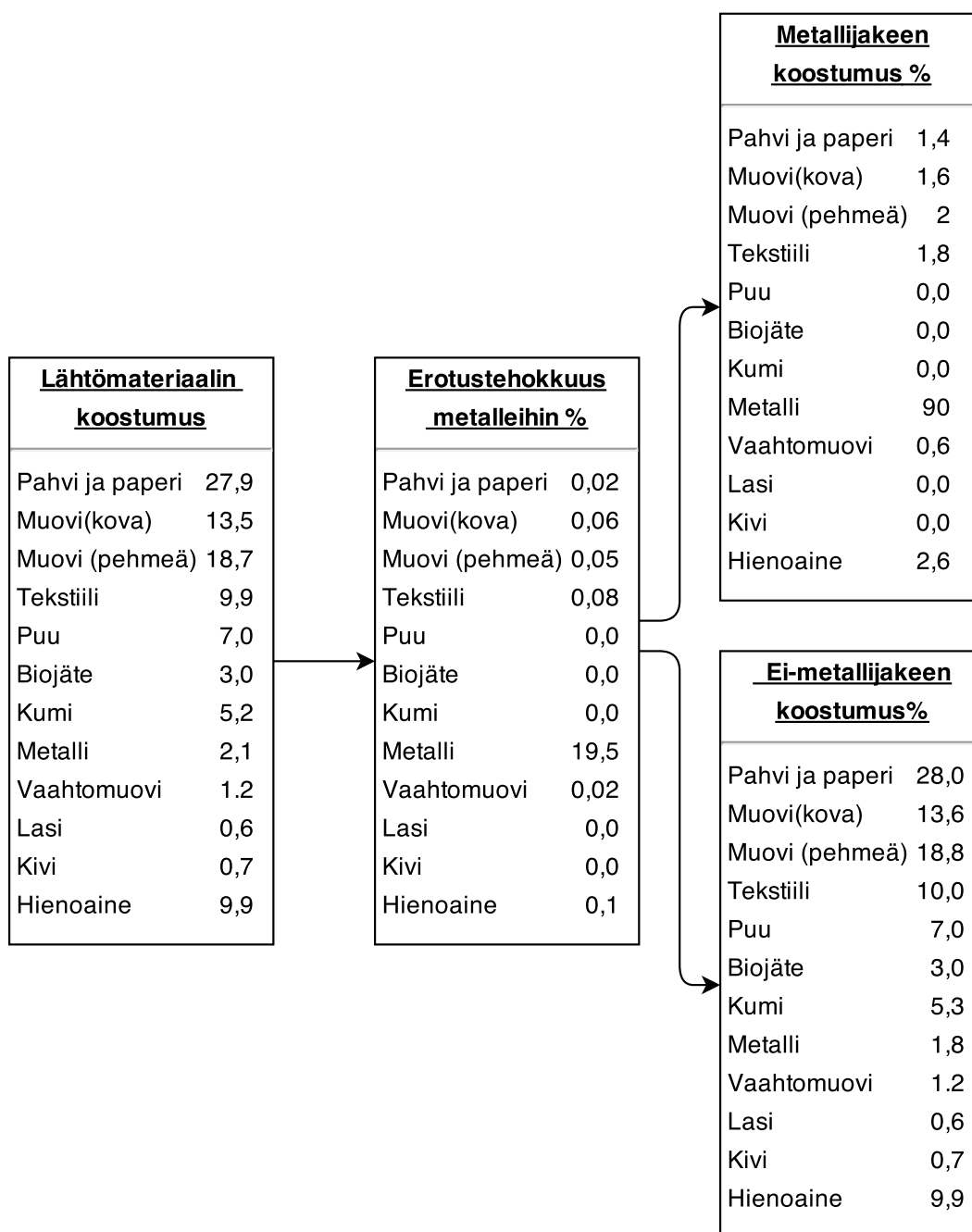
Jätteenpolton tuhkasta on mahdollista erotella metalleja mekaanisesti. Edellisessä luvussa on käsitelty rautametallien erottaminen magneetin avulla. Samassa tutkimuksessa pohjatuhkasta erotettiin ei-rautametallesia pyörrevirtaerottimella. Kyseistä tutkimusta varten pohjatuhka seulottiin magneettierottimen jälkeen neljään jakeeseen: alle 2 mm, 2-8 mm, 8-16 mm ja 16-50 mm. Alle 2 mm jaetta ei ohjattu pyörrevirtaerottimelle. Muiden jakeiden osalta alumiinin ja kuparin erotustehokkuus oli yli 70 % (Allegrini et al., 2014, 1630.)

Pyörrevirtaerotinta on käytetty metallien erottamiseen muun muassa elektroniikkajätteestä. Pyörrevirtaerottimen erotustehokkuutta on tutkittu samoissa tutkimuksissa kuin magneettierottimintoimintaa. Ruan tutki pyörrevirtaerottimen käyttöä alumiinin, kuparin ja muovin erottamiseen toisistaan. Tutkimuksessa testattiin erilaisia magneetin pyörimisnopeuksia ja syöttönopeuksia ja seurattiin niiden vaikutusta eri keräysastioiden puhtausasteeseen. Syöttönopeuden ollessa 40 rpm muovit erottuivat täysin omaan keräysastiaansa, magneetin

pyörimisnopeudesta riippumatta. Alhaisilla magneetin nopeuksilla muovin sekaan tuli merkittävästi alumiinia ja kuparia. Magneetin nopeuden ollessa yli 600 rpm nousi keräysaste myös kuparin ja alumiinin osalta yli 90 %:iin ja nopeuden ollessa yli 800 rpm keräysaste oli yli 95 %:a. Syöttönopeuden tuplaaminen 80 rpm pienensi muovin ja kuparin keräysastetta ja nosti alumiinin keräysastetta. Sama ilmiö tapahtui syöttönopeuden noustessa 100 rpm. Mitä suuremmaksi syöttönopeus nostettiin, sitä enemmän muovia löytyi kuparin joukosta, alumiini kuitenkin pysyessä puhtaampana. Tässä tutkimuksessa optimina voidaan pitää syöttönopeutta 40 rpm ja magneetin pyörimisnopeutta 800 rpm. (Ruan and Xu, 2011, 2324.)

Samoilta tutkijoilta on peräisin tutkimus, jossa jättemateriaalina olivat värikasetit, joista murskaamisen jälkeen erotettiin väriaine ja loppu jae ajettiin magneettierottimen ja pyörrevirtaerottimen läpi. Pyörrevirtaerottimessa erotettiin alumiini ja muovi toisistaan. Tämä koe antoi samankaltaisen tuloksen kuin aiemmin esitetty. Syöttönopeuden ollessa 40 rpm muovit pysyivät täysin muovien keräysasiassa, ja mitä suuremmaksi magneetin pyörimisnopeus nostettiin sitä tehokkaammin alumiini erottui omaan astiaansa. Magneetin pyörimisnopeuden ollessa 800 rpm alumiinista 97,9 %:a erottui omaan jakeeseensa niin, että sen sekaan ei erottunut muovia. Jos syöttönopeus kaksinkertaistettiin nousi alumiinin erotusaste, mutta sen puhtaus laski, sillä lähes 10 %:a muovista erottui alumiinin joukkoon. (Ruan et al., 2011.)

Pressleyn (2015) tutkimuksessa pyörrevirtaerottimen erotustehokkuudeksi annettiin alumiinin osalta 87 %, kun käsittelyssä oli esikäsitelty sekajäte. Ionescun (2013) mukaan pyörrevirtaerottimen erotustehokkuus vaihtelee yhdyskuntajätteen erottelussa 75 % ja 90 % välillä. Edellä mainituissa artikkeleissa ei ollut esitetty erotettujen jakeiden koostumusta, joten esimerkki on otettu Nasrullahin työstä. Kuvassa 16 on esitetty Nasrullahin (2015) työn mukaan pyörrevirtaerottimelle saapuvan jätteen koostumus, erotustehokkuus ja erottimelta poistuvien jätevirtojen koostumukset. Kuvassa erotustehokkuus on vain 19 %, koska metallijae pitää sisällään alumiinin lisäksi myös sen osan rautametalleista joita magneetti ei poistanut (Nasrullah et al., 2015). Alumiinin puhtausaste jää usein 60 – 70 %, koska alumiini on usein kiinnittyneenä muuhun materiaaliin (Velis et al., 2010, 1038).

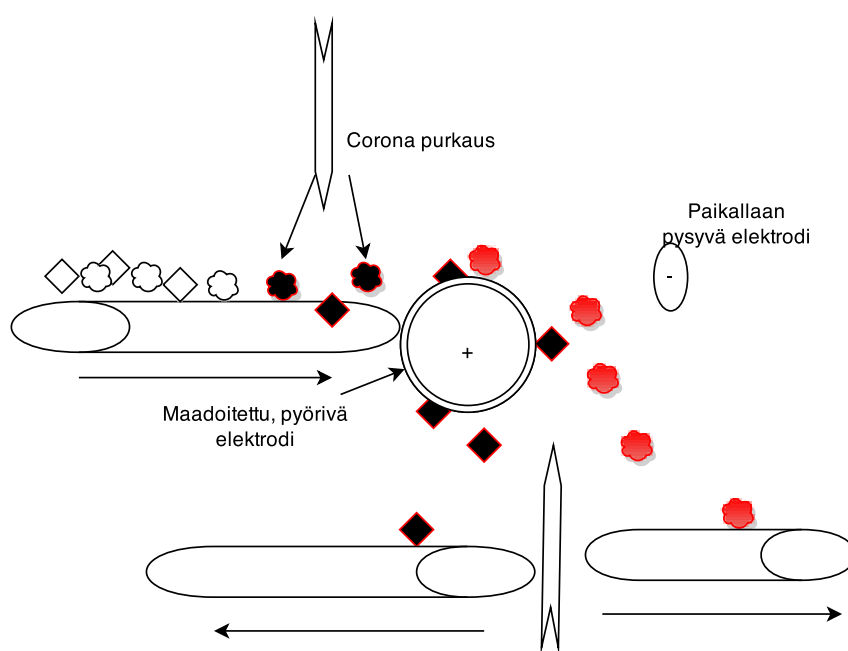


Kuva 16 Pyörrevirtaerottimen erotustehokkuus artikkelia mukaillen (Nasrullah 2015).

3.3.3 Sähköstaattiset erottimet

Sähköstaattisia erotusmenetelmiä voidaan käyttää erottamaan sähköä johtavat materiaalit sähköä johtamattomista kuten lasi, muovit ja paperi metalleista. Toinen käyttötarkoitus on erotella sähköä johtamattomat materiaalit toisistaan niiden permittiivisyyden avulla tai sähkövarauksen pysyvyyden avulla. (Tchobanoglous et al., 1993, 567.)

Sähköstaattiset menetelmät voidaan jakaa kahteen ryhmään: Sähköstaattisiin (electrostatic separator) ja hankaussähköstaattisiin (triboelectric separator). Sähköstaattisilla erottimilla erotetaan esimerkiksi muovit metalleista, kuten alumiinista tai kuparista. Tämä menetelmä perustuu siihen, että jätepartikkelit varataan esimerkiksi korona-purkauksen avulla ja johdetaan maadoitetulle rullalle, jossa johtavien materiaalin varaus purkautuu ja partikkelit saavat vastakkaisen varauksen. Rullan vieressä oleva korkeajännite-elektrodi muodostaa sähkökentän, joka vetää negatiivisesti varautuneet partikkelit irti rullasta. Sähköä johtavat partikkelit, toisin sanoen metallit, putoavat ensimmäisiin keräysastioihin ja johtamattomat eli muovipartikkelit kulkevat rullan mukana, kunnes ne pyyhkäistään irti viimeisten keräysastioiden kohdalla. (Tilmatine et al., 2009, 228-229.) Kuvassa 17 on esitetty sähköstaattisen erottimen toiminta.



Kuva 17 Sähköstaattisen erottimen toimintaperiaate

Laboratoriomittakaavan tutkimuksissa on osoitettu erotustehokkuuden olevan hyvä, kun lajiteltava materiaali on tasalaatuista. Pyörivän elektrostaattisen erottimen erotuskykyä tutkittiin erottelemalla jätinäytettä, joka oli murskattua kaapelia. Ensimmäisessä näytteessä koostumus oli 50 % kuparia ja 50 % PVC:tä kun taas toisessa näytteessä oli 95 % kuparia ja 5 % PVC:tä. Partikkelikoko oli molemmissa tapauksissa alle 10mm. Ensimmäisessä kokeessa 94 % kuparista saatiin talteen, kerätyn kuparin puhtauden ollessa yli 99 %. Toi-

sessä näytteessä kuparin puhtaus saatiin tällä menetelmällä nostettua 95 %:sta yli 99,9 %:iin. (Tilmatine et al., 2009, 129-130.)

Lääkkeiden painopakkaukset koostuvat alumiini- ja muovikalvoista. Pakkausten materiaalit voidaan kerätä erilleen sähköstaattisesti, sillä alumiini on hyvin sähköä johtava materiaali ja muovikalvot huonosti sähköä johtavia. Tutkimuksessa hienonnetut pakkaukset varattiin sähköisesti ja ohjattiin pyörivälle rummulle, josta johtavat kappaleet irtosivat ensin sähkökentän vaikutuksesta. Tutkimuksessa todettiin, että mitä pienempi partikkelien koko on sitä suurempi osuus alumiinista erottuu johtavien materiaalien luokkaan. Partikkelikoon kasvaminen heikensi alumiinin erottuvuutta. Erottuvuutta voidaan parantaa alhaisen lämpötilan prosesseilla. Tässä tapauksessa tarkoitetaan että, jakeen murskaus on tehty jäähdyttäen murskausprosessia ja kylmien partikkeleiden erottuminen on ollut tehokkaampaa, mutta nämä prosessit nostavat erottelumenetelmän energiankulutusta. (Gente et al., 2003, 954-957.)

Sähköstaattisia menetelmiä on tutkittu erilaisten pakkausmateriaalin erottelussa. Pakkausmateriaaleissa on erilaisia muoveja, kartonkia ja paperia. Jätteen hyödyntämisen kannalta on tärkeää saada jakeet erilleen. Myös muovilaatujen erottelu toisistaan on tärkeää, vaikka haastavaa. Muovipakkaukset voidaan erotella luonnonmateriaaleista, kuten pahvi- ja paperipakkauksista materiaalien sähköjohtavuuden avulla. Luonnonmateriaaleilla on korkeampi sähköjohtavuus verrattuna muovipolymeereihin. Tämä johtaa siihen, että niiden pintavaraukset jäävät alhaisemmaksi ja se laskee huomattavasti nopeammin kuin polymeereillä. Hearn ja Ballard ovat tutkineet kokonaisten pakkausten erottamista sähköstaattisesti. Kokonaisten kappaleiden muotojen ja kokojen vaihtelu vaikeuttavat sähköstaattisen menetelmän käyttöä. Tutkimuksen seuraava vaihe olisi pilottikokoluokan lajittelulinjasto jatkotutkimuksia varten. (Hearn and Ballard, 2005.) Tämän tutkimuksen edistymisestä ei toistaiseksi ole saatu lisätietoa.

Hankaussähköstaattiset menetelmät ovat yksi lupaavimpia tekniikoita muovien erotteluun liittyen. Nämä vaativat vielä lisätutkimusta ennen kuin ovat valmiita laajaan käyttöön. Menetelmien hyvinä puolina voidaan pitää korkeaa erottelutehokkuutta, matalia kustannuksia ja sitä, että ne ovat kuivia prosesseja ja näin ollen vapaita jätevesiongelmista. Toisaalta eroteltavien kappaleiden on oltava pieniä vain muutamien millimetrien luokkaa, joten menetelmä vaatii paljon esikäsittelyä jätteelle. (Wu et al., 2013.) Hankaussähköstaattiset me-

netelmät vaativa eroteltavan jakeen olevan jo valmiiksi tasalaatuista ja erottelussa voidaan eritellä jäte kahteen jakeeseen kerrallaan, joten useiden eri laatujen erottelu vaatii useamman käsittelyn (Hearn and Ballard, 2005).

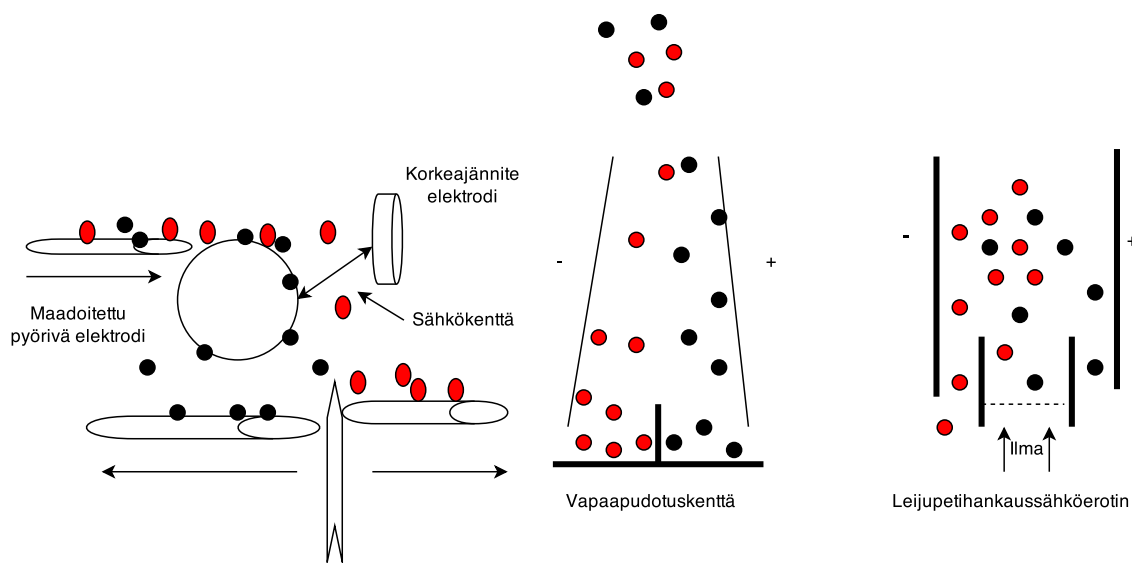
Hankaussähköerotus perustuu siihen, että pienet muovipartikkelit varautuvat sähköisesti hankautuessaan toisiaan tai varaajan osia vasten. Varaaminen voidaan suorittaa esimerkiksi pyörivässä rummussa tai syklonissa. On kehitetty useita tapoja varata hiukkaset. Pyörivän rummun etuna voidaan pitää mekanismin yksinkertaisuutta ja alhaista energiankulutusta. Pyörivällä rummulla voidaan varata partikkeleja, joiden koko on 2 - 5 mm ja prosessi voi olla jatkuvatoiminen. Menetelmän heikkoutena voidaan pitää alhaista hankauksen toistuvuutta, eli tilannetta jossa kappale osuu vain harvoja kertoja muihin kappaleisiin tai varaajaan. Tämä voi johtaa tilanteeseen, jossa huonosti varautuvat hiukkaset eivät saa riittävää varausta. Kehittyneempänä menetelmänä voidaan pitää menetelmää, jossa rummussa on pyörivät lavat, jotka lisäävät partikkeleiden osumista varaajaan. Parannetulla menetelmällä on arvioitu jopa 90 %:n partikkeleista varautuvan, mutta uutta tutkimustietoa menetelmästä ei ole tullut vuosiin. Sen sijaan tärisevät menetelmät ovat olleet useiden tutkijoiden mielenkiinnon kohteena viime vuosina. Tutkittu partikkelijakauma on ollut muita menetelmiä laajempi 0,25 mm - 5 mm. Menetelmän etuna voidaan pitää mekanismin yksinkertaisuutta ja alhaista energiakulutusta. Tässä toistuu kuitenkin pyörivän rummun heikkous, eli alhainen hankauksen toistuvuus. Viime vuosina on tutkittu kaasukiintoainemenetelmiä muun muassa leijupeti, sykloni ja propellityyppisiä lataustapoja. Niiden etuna voidaan pitää korkeaa lataustehokkuutta, mutta edeltäjiinsä verrattuna niiden käyttö vaatii runsaammin energiaa. (Wu et al., 2013.)

Varautuneet partikkelit lajitellaan sähkökenttäerottimilla. Sähkökentän muoto on tärkeässä roolissa partikkeleiden erotuksessa. Hankaussähköllä varattujen partikkelien erottamiseen voidaan käytännössä käyttää kolmea erilaista sähkökenttää: vapaapudotuskenttää, pyörivää kenttää ja leijupeti-hankaussähköerotin, jossa erotuselektrodit ovat samassa tilassa kuin missä partikkeleiden varautuminen tapahtuu. (Wu et al., 2013.) Vapaapudotuskentässä toisella laidalla on negatiivinen elektrodi ja toisella laidalla positiivinen elektrodi. Negatiivisesti varautuneet partikkelit hakeutuvat kohti kentän positiivista laitaa ja positiivisesti varautuneet kohti kentän negatiivista laitaa. Sähkökentässä varautuneisiin kappaleisiin vaikuttaa muun muassa kentän voima, painovoima ja eräät aerodynaamiset parametrit. Erotustehokkuuteen kuitenkin vaikuttaa lähinnä pintavaraus ja kentän voimakkuus. Vaikka va-

paapudotuskentällä on merkittäviä etuja mekanismin yksinkertaisuuden ja energiavaati-
muksien kannalta, se ei kuitenkaan ole kilpailukykyinen muiden sähköerottimien kanssa
kun otetaan huomioon erotustehokkuus. Erotustehokkuutta heikentää painovoiman vaiku-
tus. Raskailla kappaleilla painovoima vaikuttaa kappaleisiin enemmän kuin coulombin
voima, jolloin kappale putoaa suoraan alas eikä siirry sähkökentän mukana oikeaan koh-
taan. Toisen ongelman aiheuttavat runsaat kappaleiden väliset törmäykset, joiden vaiku-
tuksesta kappaleet voivat vaihtaa varausta ja erottua väärään paikkaan. Tätä voidaan hallita
esimerkiksi käyttämällä taipuvia elektrodeja tai seulaverkko tyypisiä elektrodeja. (Wu et
al., 2013.)

Vapaapudotuserotinta sopivammaksi on osoittautunut pyörivä-hankaussähköerotin, joka on
hyvin samankaltainen kuin aiemmin esitetty sähköstaattinen erotin. Pyörivässä hankaus-
sähköerottimessa partikkelit varataan edellä esitetyillä tavoilla ja varautuneet partikkelit
siirretään rullan päälle. Negatiivisesti varautuneet hiukkaset pysyvät kiinni rullassa kunnes
ne pyyhkäistään siitä irti ja positiivisesti varautuneet partikkelin karkaavat rullan päältä,
sähkökentän voiminen vaikutuksesta. Rullan alla on keräysastiat joihin kappaleet putoavat.
(Wu et al., 2013.) Molemmat menetelmät kärsivät hankaussähkölatauksen huonosta ennus-
tettavuudesta. Elektrodien jännitettä tulisi optimoida jatkuvasti partikkeleiden latauksen
mukaan. Sillä heikko jännite ei vedä partikkeleita puoleensa ja liian korkea jännite voi saa-
da partikkelit törmäämään elektrodeihin ja kimpoamaan väärään keräysastiaan. (Wu et al.,
2013.)

Leijupedin käyttö hankaussähköerottimessa ratkaisee kimpoilevien partikkeleiden ongel-
man. Siinä partikkeleiden lataaminen ja erottaminen tapahtuvat samaan aikaan. Partikkelit,
joiden varaus on liian alhainen erottuakseen, päätyvät ilmavirran mukana takaisin lataus-
kammioon. Leijupetiä hyödyntävää hankaussähköerotinta pidetään ylivoimaisena muovien
erottelussa, mutta sekään ei ole vapaa rajoituksista. Ongelmana on, että osa partikkeleista
voi varautua ja erottua muita nopeammin ja tällöin eroteltavan materiaalin koostumus
muuttuu kesken toiminnan. (Wu et al., 2013.) Kuvassa 18 on esitetty pyörivä-
hankaussähköerotin, vapaapudotuskenttä ja leijupetihankaussähköerotin.



Kuva 18 Pyörivä hankaussähköerotin, vapaapudotuskenttä ja leijupetihankaussähköerotin

Partikkeleiden latautuvuudella on suuri merkitys menetelmän erotustehokkuuteen. Latautuvuuteen voidaan vaikuttaa menetelmän valinnan lisäksi valitsemalla erotettavien partikkelien suhteen sopivat materiaalit latauskammioon. Partikkeleiden latautuminen tapahtuu pääsääntöisesti kolmella tavalla: hankautumalla lataajan seiniä vasten, hankautumalla samanlaisia partikkeleita vasten ja hankautumalla erilaisia partikkeleita vasten. Lataukseen käytetyllä käsittelyajalla on vaikutusta menetelmän erotustehokkuuteen. Aika pitää optimoida tilanteen mukaan, liian lyhyellä latausajalla partikkelit eivät ehdi latautua, mutta liian pitkä aika lisää partikkeli-seinä-kohtaamisia ja jo latautuneet partikkelit voivat vaihtaa varausta. Tämä heikentää erotustehokkuutta ja erottelusta saatujen jakeiden puhtautta. Myös ilmavirran nopeus, pyörimisnopeus ja tärinän frekvenssi vaikuttavat partikkelien latautumiseen ja ne on optimoitava aina eroteltavien materiaalien ja käytetyn menetelmän mukaan. Ympäröivällä ilmankosteudella on todettu olevan merkitystä partikkeleiden latautumiseen. Kasvava ilmankosteus laskee varauksen suuruutta mutta ei vaikuta sen napaisuuteen. Voidaan sanoa, että muovien erottelun erotustehokkuutta hankaussähköerottimella saadaan parannettua pitämällä ilmakosteus alhaisena, valitsemalla varaamisen käytettävä menetelmä ja varaajan materiaali eroteltavien muovijakeiden mukaan sekä optimoimalla latausaika. (Wu et al., 2013.)

Laboratoriokokeessa on erotettu PVC - ja PE-muoveja toisistaan vapaapudotushankaussähköerottimella partikkelikoon ollessa 1-2 mm. Tutkitun näytteen koostumus oli 50 %:a

PVC:tä ja 50 %:a PE:tä. Tutkimuksessa partikkelit saatiin erotettua niin, että vallitsevan jakeen puhtaus ylitti aina 95 %. Menetelmän erotustehokkuus on kuitenkin vahvasti riippuvainen eroteltavien partikkelien ominaisuuksista. Kokeessa oli käytetty rumpua partikkeleiden varaamiseen. (Tilmatine et al., 2009, 230-231)

Sähköstaattiset menetelmät vaativat usein, että erotteluun tuleva jäte on tasalaatuista ja hienojakoista. Vaadittu partikkelikoko on yleensä muutamien millimetrien luokkaa, jolloin jätteen esikäsittely vaatii runsaasti työtä. Nämä menetelmät sopivatkin parhaiten erottelun loppuvaiheeseen jolloin varsinainen lajittelu on jo tehty tai hyvin spesifisten jätteiden erotteluun.

3.4 Optinen erottaminen

Jätteiden lajittelussa voidaan käyttää erilaisia optisia erottimia, joilla tunnistetaan jäte sen ulkoisten ominaisuuksien mukaan. Optisissa menetelmissä kamera kuvaa jätteen ja tietokoneen algoritmien avulla kappale tunnistetaan sen värin, koon ja muodon perusteella. Tietokoneohjattu ilmavirta tai joissakin tapauksissa robottikoura joko päästää kappaleen jatkamaan matkaa linjalla tai poistaa sen jätevirrasta. (Delgado and Stenmark, 2005, 12)

Vanhimpana optisena menetelmänä voidaan pitää väriin perustuvaa menetelmää, jossa kamera tunnistaa kappaleen värin ja erottelee jakeet sen mukaisesti (Velis et al., 2010, 1036). Tätä on käytetty esimerkiksi Kymenlaakson Jäte Oy:ssä, jossa kotitalouksien energijätettä on kerätty yhdessä loppujätteen kanssa. Tämän menetelmän käyttö loppui Kymenlaakson Jäte Oy:ssä vuonna 2005. Kymenlaakson tapauksessa energijäte tuli lajitella oranssiin pussiin. Käsittelylinjaston ensimmäisenä vaiheena oli optinen erotin, joka poimi oranssit pussit loppujätteen seasta. (Ekholm et al., 2005). Näkyvään valoon perustuvien menetelmien heikkoutena on niiden herkkyys lajiteltavien jätteiden likaisuudelle. Sekalainen yhdyskuntajätteen seassa oleva biojäte likaa muun jätteen ja tämä aiheuttaa sen, että näkyvään valoon perustuvat optiset menetelmät eivät välttämättä toimi toivotusti. Näkyvään valoon perustuvat menetelmät eivät tunnista materiaalia pinnan alta, joten pinnoite, maali tai likakerros riittävät aiheuttamaan väärinlajittelua. (Delgado and Stenmark, 2005, 12-13.)

Näkyvään valoon perustuva materiaalin tunnistusmenetelmä perustuu kappaleeseen kohdistetun valon käyttäytymiseen sen kohdatessa kappaleen. Näkyvällä valolla eroteltavien kappaleiden on oltava vähintään 10 mm kokoisia. Näkyvälle valolle herkkä sensori voi lajitella kappaleet värin tai valonläpäisevyyden mukaan. Väriin perustavassa mittauksessa analyysi perustuu valon heijastukseen. Riippuen kappaleen ominaisuuksista, valo voi heijastua takaisin, absorboitua kappaleeseen tai läpäistä kappaleen. Sensori mittaa sille palautuneen valon ja laskee sen mukaan kappaleen laadun. Väriin perustuvalla sensorilla voidaan erotella esimerkiksi värillinen ja väritön PET toisistaan. Valon läpäisevyyteen perustuvassa menetelmässä anturi mitta kappaleen läpi kulkeneen valon. Tällä menetelmällä voidaan erotella esimerkiksi värillinen ja luonnollinen HDPE toisistaan. Eroteltavien kappaleiden olisi hyvä olla mahdollisimman samankokoisia, sillä erikokoiset kappaleet eivät välttämättä reagoi toivotulla tavalla ilmavirtaan, jolla kappaleita siirretään kuljettimilla. Hyvin järjestetyllä väriin perustuvalla optisella erottimella voidaan päästä jopa 95 % puhtauteen. (Delgado and Stenmark, 2005, 12)

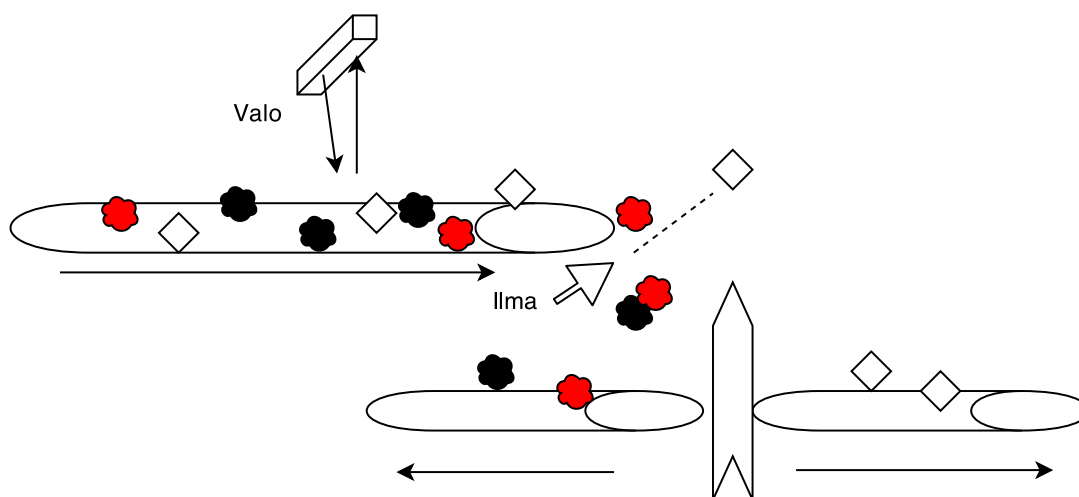
Näkyvän valon menetelmien ongelmiin on haettu ratkaisua NIR eli Near Infrared erottimissa, joissa valo tunkeutuu hieman kappaleen sisään ja näin ollen pinnalla oleva lika tai ohut pinnoite eivät ole yhtä suuri haitta kuin näkyvän valon menetelmissä. NIR-erottimet kykenevät tunnistamaan likaisemmat kappaleet ja toimivat likaisen jätteen erottelussa paremmin kuin näkyvään valoon perustuvat menetelmät. (Delgado and Stenmark, 2005, 18)

Näidenkin menetelmien osalta ongelmaksi muodostuu sekajätteen koostumus. NIR-menetelmät toimivat hyvin puhtaiden muovien lajittelussa, ja niitä onkin käytetty Euroopassa materiaalinkeräyslaitoksilla. Materiaalinkeräyslaitoksilla muovijakeet on saatu erilleen yli 90 % puhtaudeksi. (Morrish et al., 2010, Appedix 2.)

Spektroskooppisiin analyysihin perustuvat menetelmät ovat tapa erotella jättemateriaaleja toisistaan. Spektroskooppisiin analyysihin perustuvia menetelmiä on useita, mutta jätteiden lajittelussa käytetyin on NIR-erotin. NIR-erottimessa käytetään valoa, jonka aallonpituus on 700-2500 nm. NIR-erottimella saadaan eroteltua vaaleita muoveja toisistaan. Se ei toimi hyvin tummien muovien kanssa. NIR-erotuksen etuna on, että se kykenee tunnistamaan muoveja myös sekalaisen jätteen joukosta, sillä valo läpäisee materiaalia ja näin ollen absorptiospektristä on edelleen tunnistettavissa eroteltavan materiaalin ominaispiirteitä. Menetelmä on nopea ja kykenee erottelemaan muoveja myös kotitalousjätteestä. Erotustehokkuutta kuitenkin laskee eroteltavien jakeiden likaisuus tai maalattu pinta. (Delgado and

Stenmark, 2005, 18.) NIR-erotusta käytetään Euroopassa materiaalinkeräyslaitoksella muovilaatujen erotteluun sekä poistamaan kartonkia erilliskerätystä pakkausjätteestä (Merta et al., 2012, 62). Kalvomaisten muovien kohdalla optisilla menetelmillä tapahtuu runsaasti väärää lajittelua. Kaksivaiheisella lajittelulla voidaan kuitenkin päästä kohtuullisiin tuloksiin jopa kalvomaisten muovien kanssa. (Haig et al., 2012, 14-15.) MIR eli Mid-infrared sorter tunnistaa tummat kappaleet, toisin kuin NIR, mutta ongelmaksi muodostuu menetelmän hitaus, joka estää sen käytön automaattisissa erotuslinjastoissa. (Delgado and Stenmark, 2005, 17.)

Kuvassa 19 on esitetty optisen erottimen toimintaperiaate. Valonlähde lähettää valokeilan kohti materiaalivirtaa, valo heijastuu takaisin detektorille, joka analysoi heijasteen mukaan mitä materiaalia kappale on ja ohjaa ilmasuihkua, joka puhalttaa kappaleen seuraavalle kuljettimelle. Kappaleet joita ei tunnistetta tipahtavat suoraan seuraavalle kuljettimelle.



Kuva 19 Optisen erottimen toimintaperiaate

Esimerkkikuvaajaa optisten menetelmien tehokkuudesta ei esitetä tämän työn yhteydessä, sillä optiset menetelmät on aina rakennettava suunniteltua käyttöä varten ja yleispätevää esimerkkiä ei voi antaa. Optisilla menetelmillä voidaan luoda kattavia lajittelulinjastoja yhdistelemällä useita sensoreita. Erilaisia sensoreita ja tekoälyä yhdistämällä voidaan luoda jopa oppivia lajittelujärjestelmiä. Tällainen on suomalainen ZenRoboticsin valmistama lajittelurobotti, joka yhdistää useanlaisia sensoreita monimutkaiseen tekoälyyn. ZenRobotics käyttää muun muassa näkyvään valoon ja lähi-infrapunaan perustuvia sensoreita, sekä metallierottimia ja kosketukseen perustuvia antureita. Tekoäly ohjaa reaaliaikaisesti robot-

tikouria, jotka poimivat jätekappaleet materiaalivirrasta. ZenRobotics on julkaissut päivitetyn laitteistonsa, jolla onnistuu myös pahvien ja kovien muovien erottelu. (ZenRobotics 2014)

3.5 Muut erotteluun liittyvät menetelmät

3.5.1 Jätteen palakoon pienentäminen

Jätteiden palakokoa on usein tarpeen pienentää ennen muuta käsittelyä. Merkittävin syy palakoon pienentämiseen on sitä seuraavien menetelmien toimivuuden takaaminen. Suuret kappaleet koostuvat usein useista eri materiaaleista. Murskaamalla tai repimällä jäte, saadaan materiaalit eroteltua toisistaan. (Tchobanoglous et al., 1993, 255) Mekaaniset erottelumenetelmät erottelevat kappaleet toisistaan niiden ominaisuuksiin pohjautuen. Monia materiaaleja sisältävät kappaleet eivät erotu oikein. Esimerkkinä liian suuren kappaleen aiheuttamasta ongelmasta voi olla tilanne, jossa kappaleessa on rautametallin lisäksi muovia. Kappale voi erottua magneetilla rautametallin joukkoon, silloin kappaleessa kiinni oleva muovi kulkeutuu raudan joukkoon ja heikentää näin ollen kerätyn materiaalin puhtautta. Toisaalta, jos muovikappaleessa on metallia, joka ei ota kiinni magneettiin kulkeutuu metalli muovin mukana eteenpäin ja pienentää näin ollen magneetin erotustehokkuutta. Suuret kappaleet kulkeutuvat seulojen yli erottumatta niissä ja toisaalta ilmaerottimet vaativat kappaleiden oleva riittävän pienikokoisia. Suuret kappaleet ovat usein painavia ja silloin ne eivät erotu ilmaerottimella vaikka tiheyden puoleen niiden tulisi erottua (Rotter et al., 2004, 1019). Sekajäte on heterogeenistä ja sisältää monen kokoisia kappaleita, murskauksella jäte saadaan kokonsa puoleen homogeenisemmaksi ja näin paremmin erotusmenetelmiin reagoivaksi.

Kolme yleisimmin käytettyä menetelmää pienentää jätettä ovat vasaramurskain, repivä murskain ja leikkaava murskain. Vasaramurskaimen pyörivässä roottorissa olevat vasarat lyövät jätemateriaalia kunnes se on riittävän hienoa työntyäkseen pohjalla olevan ritilän läpi. Ennen vasaramurskainta jätteestä tulisi poistaa liian suuret kovet kappaleet. Liian suuret kappaleet voivat vaurioittaa murskainta. (Tchobanoglous et al., 1993, 255, 454.) Vasaramurskain kuluttaa paljon energiaa, mutta on tehokas menetelmä hienontamaan haurasta materiaalia. Sitä käytetäänkin usein yhdyskuntajätteen murskaukseen (Caputo and

Pelagagge, 2002, 429; Tchobanoglous et al., 1993, 256). Repijät sopivat vain karkeaan murskaukseen, niitä käytetään useimmiten pussien avaamiseen. Jäte kulkee samankaltaisen pyörivän roottorin läpi kun vasaramurskaimessa, mutta päätyy suoraan avoimelle kuljettimelle. Palakoko repijässä jää suuremmaksi ja heterogeenisemmaksi kuin vasaramurskaimella. Leikkaavissa murskaimissa jäte työnnetään leikkaavien terien välistä. Leikkurien terät pyörivät hitaammin kuin muissa murskaimissa, mutta terät ovat terävämpiä ja ne ovat pareittain kuin saksissa. Leikkureita käytetään myös jätepussien avaamiseen. (Tchobanoglous et al., 1993, 545.) Leikkureiden energian kulutus on vasaramurskaimia pienempi (Caputo and Pelagagge, 2002, 429). Suomalaisilla REF-laitoksilla on esimurskaimena yleisesti käytössä repivä murskain, jolla jäte murskataan 200 mm palakokoon ja jälkimurskaimena leikkaavamurskain, jolla jäte murskataan 50 – 75 mm palakokoon. Esimurskaimena on käytetty myös vasaramurskainta, jolla jäte murskataan 400 mm palakokoon. (Ekholm et al., 2005, 22-28.) Muita tapoja pienentää jätettä ovat lasinmurskaimet ja puunhienontimet, joita käytetään jo eroteltujen jakeiden käsittelyyn (Tchobanoglous et al., 1993, 258).

3.5.2 Tiivistäminen ja kuivaaminen

Monissa tilanteissa erotellut jätejakeet on tarpeen tiivistää joko jatkokäytön tai kuljetuksen vuoksi. Materiaalin tiivistäminen pienentää varastointitilan tarvetta sekä kuljetuskustannuksia. Paperia, pahvia, muovia ja alumiinia voidaan paalata. (Tchobanoglous et al., 1993, 570-573.) Polttoaineeksi tarkoitettu jäte voidaan pelletoida. Pelletit ovat helposti kuljetettavaa tiivistä polttoainetta, jota laitosten on helppoa käyttää. Energia- ja yhdyskuntajätteestä valmistettuja pellettejä voidaan käyttää polttolaitosten tukipolttoaineena (Ekholm et al., 2005, 28). Joissakin tilanteissa polttoon menevä jäte on syytä kuivata. Kuivatun jätteen poltto-ominaisuudet ovat parempia kuin märän jätteen. Kuivaus voi olla tarpeellinen esimerkiksi jos jätepolttainetta on tehty kotitalousjätettä sisältävästä jätteestä. Biojäte on märkää ja sekajätteessä on suhteellisen paljon biojätettä. Biojäte kastelee myös muut materiaalit, etenkin paperin. Ballistisen erottimen jälkeen myös märkä pahvi ja paperi ovat palavassa jakeessa, joten jae on kuivattava ennen jatkoa. (Rotter et al., 2004, 1020.)

Jätteen tiivistämiseen käytetyt menetelmät voidaan jakaa kolmeen ryhmään: puristimet, paalaimet ja pelletoijat. Puristimet voivat olla paikalleen asennettuja tai liikuteltavia. Jäte

voidaan syöttää puristimeen manuaalisesti tai mekaanisesti. Erikokoisia puristimia käytetään eritarkoituksiin jätteiden käsittelyssä. Puristimissa käytetään yleensä alle 6,8 barin painetta, joilla jäte puristetaan suurempiin säiliöihin siirtokuormaus tai käsittelylaitoksilla. Suuren paineen puristimilla jäte tiivistetään yleensä paaleiksi tai muuhun haluttuun muotoon. Tällöin puhutaan paalaimesta. Puristimet voidaan luokitella niiden käyttötarkoituksen mukaan:

- Kotitalouden ja kevyiden kaupanjätteiden tiivistämiseen käytettävät puristimet
- Kaupan ja kevyen teollisuusjätteen puristamiseen tarkoitetut puristimet
- Raskaan teollisuuden puristimet
- Siirtokuormausasemilla käytettävät puristimet.

Paalaimet ovat vaihtoehto puristimille. Kaikkia yleisimpiä kierrätettäviä materiaaleja voidaan paalata. Paalaimilla jätteet saadaan helposti kuljetettavaan muotoon. Paalaimet käyttävät yleensä 6,8-13 bar:in painetta ja tuotettujen paalien koot vaihtelevat. Paalien paino vaihtelee paalin koon ja materiaalin mukaan. Esimerkiksi aaltopahvipaalin paino vaihtelee 500-800 kg välillä paalin koosta riippuen. Kevyt paali voi olla kooltaan esimerkiksi 121 cm × 76 cm × 108 cm ja raskas paali 182 cm × 76 cm × 111 cm. Pellettoijilla jäte puristetaan sylinterin reikien läpi. Valmiit pelletit ovat halkaisijaltaan 1,3-2 cm ja pituudeltaan 1,3-2,3 cm. Jätteen pelletoinnissa tulee ottaa huomioon kosteuden hallinta. Jätteen kosteuden on oltava sopiva pelletoinnin onnistumiseksi. Kuivattuja pellettejä voidaan varastoida kuukausia. (Tchobanoglous et al., 1993, 570-573.) Pelletoinnin hyvänä puolena on varastoitavuus. Suomessa polttolaitokset eivät kesäaikaan tarvitse paljon polttoainetta, sen sijaan talvella lämmityskauden aikana polttoaineen tarve laitoksilla kasvaa. Kierrätyspolttoainetta käyttävät laitokset pystyvät toimimaan koko vuoden varastoimalla kesällä valmistetut pelletit seuraavaa talvea varten. (Ekholm et al., 2005, 31.)

3.6 Mekaanisten erottelumenetelmien energiankulutus

Mekaanisten erottelumenetelmien energiankulutus vaihtelee runsaasti. Energiankulutus tulee huomioida suunniteltaessa käsittelylinjastoja. Energiankulutus vaikuttaa taloudelliseen kannattavuuteen ja käsittelyn ympäristövaikutuksiin. Eniten energiaa kuluttavat muut kuin varsinaiset erotusmenetelmät. Suurimpia energiankuluttajia ovat murskaimet. Vasaramyllyn käyttö vaatii runsaasti energiaa. Myös kuivurit ja pelletioijat käyttävät energiaa runsaasti. Sen sijaan tiivistäjät ja kuljettimet eivät ole suuria energiankuluttajia. (Caputo and Pelagagge, 2002, 429; Pressley, 2015, .)

Seulojen energiankulutus on pieni verrattuna muihin käsittelymenetelmiin. Seulan energiankulutus kasvaa merkittävästi, mikäli siihen liitetään muita komponentteja. Esimerkiksi lasinrikkomiseen käytetyillä seuloilla energiankulutus voi olla moninkertainen kiekoseuloihin verrattuna.

Ilmaerottimet kuluttavat seuloja enemmän energiaa, mutta kulutus on kuitenkin merkittävästi alhaisempi kuin murskaimilla. Ilmaerotuksen energiankulutukseksi on arvioitu 2,4 kWh / jätetonni. (Caputo and Pelagagge, 2002) Tulee kuitenkin huomioida, että ilmaerottimien tehokas käyttö vaatii yhdyskuntajätteen osalta murskauksen. Liian suuret kappaleet eivät erotu tehokkaasti ilmaerottimella.

Yleisesti käytettyjen magneettierottimien energiankulutus vaihtelee välillä 0,6-3,3 kWh/t. Magneeteilla saadaan eroteltua arvokasta raaka-ainetta kohtuullisilla kustannuksilla. Pyörrevirtaerottimien energiankulutus on samaa suuruus luokkaa kuin magneeteilla, 0,2-5,4 kWh/t. Taulukossa 6 on esitetty eri lähteistä koottujen mekaanisten erottelumenetelmien energiankulutustietoja.

Taulukko 6 Mekaanisten erotusmenetelmien energiankulutustietoja

	Kapasiteetti t/h	Teho kW	Energian kulutus kWh/t	Lähde
Vasaramurskain	2	200	100	Caputo 2002
	4	250	62,5	Caputo 2002
	6	300	50	Caputo 2002
Repijä	6	25	4,2	Caputo 2002
	10	50	5	Caputo 2002
	15	50	3,3	Caputo 2002
	25	55	2,2	Caputo 2002
Tiivistäjä	6	5	0,8	Caputo 2002
Pelletöija	4	50	12,5	Caputo 2002
Kuivuri	6	140	23,3	Caputo 2002
Rumpuseula	15	20	1,3	Caputo 2002
	25	30	1,2	Caputo 2002
	45	62	1,4	Pressley 2015
Kiekkoseula (OCC)	45	7,5	0,17	Pressley 2015
Kiekkoseula	21	8,5	0,4	Pressley 2015
Kiekkoseula (repi- vä)	7	10	1,4	Pressley 2015
Lasia rikkova seula	9	30	3,3	Pressley 2015
Ilmaveitsi (Air knife)	36	164	4,5	Pressley 2015
Ballistinen erotin	60/220	5,5 / 11	1-1,8	(Komptech, 2014)
Ilmaseula	5	12	2,4	Caputo 2002
Magneetti	5	3,75	0,757	Caputo 2002
	10	6,2	0,62	Caputo 2002
	15	6,8	0,44	Caputo 2002
	2	4	2	Pressley 2015
	0,9	3	3,3	Combs 2012
	3,6	5	1,4	Combs 2012
Pyörrevirtaerotin	3	16	3,3	Pressley 2015
	1,8	8	5,3	Pressley 2015
	18,1	10	4,4	Pressley 2015
	5	2,2	0,4	Caputo 2002
	10	2,2	0,2	Caputo 2002
	15	2,2	0,15	Caputo 2002
Optinen erotin (lasi)	5	69	13,8	Pressley 2015
Optinen erotin (PET)	5	13	2,6	Combs 2012
	10	13	1,3	Pressley 2015
Optinen erotin (PEHD)	5	40	8	Combs 2012
	10	40	4	Pressley 2015

4 Mekaanisten erotteluprosessien luominen

4.1 Erotteluketjun tarkoitus

Kuten aiemmin tässä työssä on todettu, mikään mekaaninen erottelumenetelmä ei yksinään riitä erottelemaan kierrätettäviä jakeita yhdyskuntajätteestä. Tästä johtuen mekaanisia menetelmiä tulee yhdistellä kokonaisprosesseiksi. Mahdollisia tapoja yhdistellä eri menetelmiä on lukuisia ja kokonaisprosessin suunnittelu on riippuvainen monista tekijöistä.

Mekaanisen erottelun tarkoituksena voi olla erotella hyödynnettävät jätteet materiaalihyötykäyttöön ennen loppusijoitusta, jolloin tärkeää on eroteltavien jakeiden puhtaus. Toisaalta mekaanista erottelua voidaan käyttää esikäsittelemään jäte ennen kompostointilaitosta tai jätteenpoltttoa, jotta loppukäsittely toimisi parhaalla mahdollisessa tavalla. Mekaanisia erotusmenetelmiä käytetään myös jätepolttoaineen valmistamiseen, jolloin tärkeään rooliin nousee lopputuotteen laatu.

Jätteenpoltto on Suomessa lisääntynyt voimakkaasti viime vuosina. Aikaisemmin Suomessa on jätettä poltettu lähinnä rinnakkaispolttolaitoksissa, mutta päästökauppavaatimukset ja jätteenpolttoasetuksen mukanaan tuomat päästövähennysvaatimukset ovat asettaneet pienet rinnakkaispolttolaitokset taloudellisesti hankalaan asemaan ja niiden määrä on vähentynyt. Sen sijaan uusien jätteenpolttolaitosten määrä on kasvanut. Jätteenpolton kapasiteetti on moninkertaistunut viidessä vuodessa. (Pöyry, 2012 12-17.) Rinnakkaispolttolaitokset käyttävät hyvälaatuista kierrätyspolttoainetta. Niille jäte tulee usein läheisiltä teollisuuslaitoksilta. Hyvälaatuista kierrätyspolttoainetta ei yleensä valmisteta kotitalouksien jätteistä vaan teollisuuden ja palveluiden valmiiksi tasalaatuisesta ja hyvin polttoon soveltuvasta jätteestä. (Ajanko et al., 2005, 76.)

Jätteiden hyötykäyttöä materiaalina tulisi tehostaa EU:n jätehierarkiaan nojaten (2008/98/EY). Mekaaniset erotteluketjut voivat olla yksi menetelmä kierrätysmateriaalien talteenotossa. Kokonaisprosessien kannalta merkittäväksi nousee kokonaisuuden erotustehokkuus ja hinta. Erotusketjun pituus ja energiankulutus vaikuttavat prosessin hintaan. (Pressley et al., 2015)

4.2 Erotteluketjun suunnitteluun vaikuttavat tekijät

4.2.1 Lopputuotteiden laatu

Suunniteltaessa jätteenlajittelua ja siihen käytettäviä menetelmiä tulee miettiä mitä lopputuotteelle ja erotelluille jakeille on tarkoitus tehdä. Arinapoltttoon sopii erilainen jäte kuin esimerkiksi kaatopaikalle tai jätepolttoaineen valmistukseen. Käsittelyn kannalta merkittäviä asioita ovat orgaanisen aineen pitoisuus lopputuotteessa, lopputuotteen kosteus, tuotteen puhtaus ja tasakokoisuus. Myös eroteltavien rejektien ominaisuuksilla on merkitystä sen mukaan mikä niiden käyttötarkoitus tulee olemaan.

Kierrätyspolttoaineiden valmistuksessa tulee ottaa huomioon käyttötarkoitus, erilaisilla kattiloilla on erilaiset vaatimukset käytettävälle polttoaineelle ja polttoaineiden seoksille. Haluttu polttoaineen laatu vaikuttaa käytettäviin jalostusmenetelmiin. Mitä huonompilaatuista kierrätyspolttoaine on, sitä vähemmän sitä voidaan polttaa ja sen tarkempi tulee olla rinnakkaispolttoaineen ja kierrätyspolttoaineen suhteissa. Suomessa kierrätyspolttoaine REF on jaettu kolmeen laatuluokkaan ominaisuuksiensa mukaan. Standardoitujen laatuluokkaominaisuuksiensa lisäksi kierrätyspolttoaineiden osalta tulee huomiona niiden käyttöominaisuudet, kuten tehollinen lämpöarvo ja kosteus saapumistilassa sekä tuhkapitoisuus. (Ajanko et al., 2005, 46-48.) Kierrätyspolttoaineiden laatuluokkiin vaikuttavia ominaisuuksia ovat kuiva-aineen kloorin, rikin, typen, alumiinin, elohopean ja kadmiumin pitoisuus sekä kaliumin ja natrium yhteenlaskettu määrä. Raja-arvot esitetty liitteessä 2. Eurooppalainen SRF-luokitus on vahvistettu suomalaiseksi standardiksi vuonna 2012. Se jakaa kiinteät jätepolttoaineet viiteen luokkaan kolmen ominaisuuden mukaan. (Heino, 2012, 31)

Kierrätyspolttoaineen laatuvaatimukset rinnakkaispolttolaitoksissa riippuvat muun muassa polttotekniikasta, pääpolttoaineesta ja höyryn tulistusarvoista ja ovat näin ollen laitospaikoittaisia. Kattilatekniikassa on tapahtunut kehitystä ja kierrätyspolttoaineelle sopivia leijukeroskattiloita on otettu käyttöön eri puolilla Eurooppaa. Myös kaasutuslaitoksia on rakennettu huomioiden kierrätyspolttoaineiden vaatimukset. (Ajanko et al., 2005, 45-46) Suomessa Lahti Energian Kymijärvi II voimalaitos valmistui vuonna 2012, ollen Suomen en-

simmainen kaasutuslaitos jätteenpoltossa. Laitos käyttää 250 000 tonnia kierrätyspolttoainetta vuodessa. (Lahtienergia 2015.)

Merkittävin haitta-aine kaupan alan jätteissä on kloori ja kotitalouksien energiajätteessä ovat kloori ja kaliumin ja natriumin yhdistelmä sekä kadmium. Ajangon tutkimuksessa (2005) tutkittiin myös kuivajätteen materiaaliakohtaisia haitta-ainepitoisuuksia ja huomattiin, että kotitalouksien kuivajätteestä klooria sisälsivät eniten PVC-muovi siitä valmistetut pakkaukset ja nahka. Kloori oli merkittävä haitta-aine lähes kaikissa palavissa materiaaleissa. Kaliumin ja natriumin osalta hygieniatuotteet olivat merkittävin haitta-aineiden lähde. Kadmiumia oli kovassa muovissa ja nahassa. Elohopeaa esiintyi kalvomuoveissa ja kovissa muoveissa, mutta ei niistä valmistetuissa pakkauksissa. (Ajanko et al., 2005, 51)

Tutkimuksen kohteena oli kolme erilaista kierrätyspolttoaineen valmistusprosessia. Saadun kierrätyspolttoaineen laatu ja määrä vaihteli sekä prosessointitavan, että lähtömateriaalin mukaan. Suurin kierrätyspolttoaineen saanti oli menetelmällä, joka koostui esilajittelusta, kahdesta magneetista ja pyörrevirtaerottimesta sekä hihnapuhdistimista. Ensimmäinen prosessi oli suunniteltu kaupan ja teollisuuden jätteille, ei niinkään kotitalouksista peräisin olevalle jätteelle. Toinen prosessi koostui täryseulasta, magneettierottimista, rumpuseulasta ja tuuliseulasta. Magneettierottimia oli kolme, joista kaksi sijaitsi ennen rumpuseulaa ja yksi tuuliseulan jälkeen. Tämä, samoin kuin kolmas prosessi, joka koostui kahdesta magneettierottimesta, rumpuseulasta, kahdesta tuuliseulasta ja kuivausrummusta, oli suunniteltu käytettäväksi kotitalouksien energiajätettä sisältävän jätteen kanssa. Menetelmät, joissa käytössä oli rumpu- ja tuulierottimia pääsivät laadultaan hyviin tuloksiin, mutta syntyneen rejektin määrä oli runsasta ja polttoaineen saanti näin ollen pienempi. Rumpuseulaa käytävä menetelmä oli suunniteltu yhdyskuntien polttokelpoiselle jätteelle ja eräs rumpuseulan tehtävä oli biojätteen poistaminen, jossa se toimii hyvin. Poistamalla biojätettä rumpuseula poisti kosteutta jätteestä ja paransi kierrätyspolttoaineen tehollista lämpöarvoa. Menetelmällä, jossa oli kuivausrumpu, kierrätyspolttoaineen kosteus on merkittävästi alhaisempi kuin muilla prosesseilla. Samoin tehollinen lämpöarvo oli korkeampi. Haitta-aineiden osalta lopputuotteen laatu riippui suurelta osin lähtömateriaalista. (Ajanko et al., 2005.)

Rejektien koostumuksella on vaikutusta niiden jatko- tai loppukäsittelyyn. Mikäli magneettierottimella erotettuun metallijakeeseen kulkeutuu runsaasti paperia tai muovimateriaaleja, on ne poistettavan metallin joukosta, ennen kuin metallia voidaan ohjata kierrätykseen.

Tämä voidaan hoitaa esimerkiksi ilmaerottimilla. (Diaz et al., 2005, 145.) Metallien puhdistaminen on yleisesti helppoa ja kannattavaa toimintaa. Mikäli käsiteltävä jäte pitää sisällään runsaasti orgaanista ainetta on seulojen alitteen orgaanisen aineen pitoisuus tyypillisesti suuri (de Araújo Morais et al., 2008). Kaatopaikkojen orgaanisen aineen sijoituskielto aiheuttaa näissä tilanteissa sen, että seula-alitteet on käsiteltävä vielä vähintään orgaanisen aineen stabiloimiseksi tai poistettava niistä kompostoinnille haitalliset aineet ja kompostoinnilla alite

Materiaalin hyötykäyttö vaatii, että eroteltavat jakeet ovat puhtaita. Delgado ja Stenmark (2005) ovat selvittäneet muovien erotusmenetelmiä. Materiaalihyötykäyttöä varten muovimateriaalien tulisi olla hyvin puhtaiksi eroteltuja. Muovityyppien erotteluun on kehitetty useita menetelmiä. Monet erotusmenetelmät toimivat kuitenkin vain valmiiksi homogeenisen materiaalin erottelussa, sen sijaan sekalaisesta yhdyskuntajätteestä on vaikea saada eroteltua jätemuovia. Optisilla menetelmillä saadaan muovimateriaaleja erotettua jopa sekajätteestä, mutta optisten menetelmien heikkoudet, kuten liika spesifisyys ja herkkyys likaantumiselle, aiheuttavat hankaluuksia. (Delgado and Stenmark, 2005, 12-13) Kuitumateriaalien kerääminen sekajätteen seasta on vaikeaa, vaikkakin mahdollista. Näkyvään valoon perustuvat menetelmät ovat herkkiä likaantumiselle. Toimivimmaksi menetelmäksi nousee NIR -erotin. Optiset menetelmät ovat kuitenkin spesifisiä aina yhdelle kuitulaadulle kerrallaan. Saanto voi näin ollen jäädä pieneksi, vaikka materiaalin puhtaus riittäisi kierrätykseen. Mekaanisilla menetelmillä, kuten seuloilla saanto on suurta, mutta ne erottelevat jakeet vain kokonsa mukaan joten näissä tapauksissa eroteltu jae ei ole puhdasta vaan pitää sisällään monia aineita. Sekajätteestä erotetun kuitufraktion hyötykäytön ongelmaksi muodostuvat myös eroteltavan kuitufraktion kosteus ja biologinen likaantuminen. (Ojala, 2014, 23.)

Uusimmat Suomessa suunnitellut ja rakennetut jätteenpolttolaitokset ovat olleet arinapolttolaitoksia. Laitokset polttavat vain jätettä ja niihin ajetaan yhdyskuntajäte käsittelemättä. (Jätelaitosyhdistys, 2014a) Biojäte tulisi kerätä erilleen, mutta nykyisen erilliskeräyksen tason mukaan arinapolttolaitoksille menevästä jätteestä yhä noin 35 %:a on biojätettä. Arinapolttolaitoksille menee myös runsaasti kierrätyskelpoista pahvia, paperia ja ennen kaikkea muovia. (Pulkkinen, 2013, 17-18.) Kotitalouksista ei tällä hetkellä kerätä käytännössä kuin palautuspullojärjestelmässä kulkeva muovi. Arinapolttolaitoksille kulkeutuu myös metalleja ja lasia. Suuret määrät metalleja voivat olla ongelma myös arinapolttolai-

toksille. Suuret kappaleet kuten, polkupyörät ja vastaavat voivat tukkia polttolaitoksen jätteenkäsittelyä tai tuhkan kuljettimia. Lisäksi suuri alumiinin määrä voi häiritä polttoprosessia. (Yle, 2014a) Arinapolttolaitoksilla jätteestä ei yleensä erotella mitään ennen polttoa. Suuret metallikappaleet, esimerkiksi autojen konepellit tai suuri määrä vanteita, poistetaan havaitessa. Laitoksen toiminnan kannalta olisi hyvä erotella metallit, alumiini mukaan lukien, ennen jätemassan menoa polttoon. Jotta Suomi saavuttaisi EU:n tavoitteet olisi arinapolttolaitoksille menevästä materiaalista saatava erilleen kierrätyskelpoista materiaalia laajemminkin, ennen kaikkea keräyspahvia ja kierrätyskelpoista muovia. Sekajätteessä oleva biojäte ja hygieniatuotteet kuitenkin vaikeuttavat mekaanista erottelua likaamalla muutoin kierrätyskelpoisen materiaalin.

4.2.2 Lähtömateriaali

Jätteen koostumus vaikuttaa siihen, millä menetelmillä ja kuinka hyvin siitä saadaan eroteltua jakeita erilleen. Sekalainen yhdyskuntajäte on mekaanisen erottelun kannalta vaikeasti eroteltava. Sekalainen yhdyskuntajäte pitää sisällään monia erilaisia materiaaleja. Materiaalit eri kokoisina kappaleina ja mukana on runsaasti biojätettä, joka likaa muut jakeet. Jäte on usein kosteaa ja monet kappaleet koostuvat useasta materiaalista. Sen sijaan syntyipaikkalajitellut jakeet ovat pääsääntöisesti homogeenisempia ja puhtaampia jolloin ne ovat helpommin lajiteltavissa. Ajangon (2005) tutkimus osoittaa, että lajitellusta jätteestä saadaan aikaan parempaa kierrätyspolttoainetta kuin huonosti lajitellusta jätteestä. Lahdessa kotitalouksista kerätty energiajäte piti sisällään vain vähän epäpuhtauksia. Biojätettä joukossa oli 6 % mikä on merkittävästi vähemmän kuin muilla tutkituilla jätteillä. Taulukossa 7 on esitetty Ajangon tutkimuksessa käsitteletyt jätejakeet.

Taulukko 7 Jätejakeiden koostumus (Ajanko 2005)

	Biojäte %	Palava %	Muut haitta-aineet %
Lahden alueen energiajäte	6	92	2
Pietarsaaren kuivajäte	29	57	14
Jyväskylän kuivajäte	24	65	11

Lahdessa kerätystä energiajätteestä saatiin kahdella kappaleella 4.2.1 esitetyistä prosessilla REF 2 kuuluvaa kierrätyspolttoainetta. Sen sijaa Pietarsaaren kuivajätteestä, kaikilla kol-

mella laitoksella saatiin aikaan luokkaan kolme kuuluvaa kierrätyspolttoainetta. Myös käyttöominaisuudet olivat Lahden jätteestä saatavalla kierrätyspolttoaineella paremmat. Suomessa kierrätyspolttoaineet luokitellaan ominaisuuksiensa mukaan kolmeen luokkaan REF 1, REF 2, ja REF 3. Ominaisuuksiltaan parasta polttoainetta on REF 1 ja huonointa REF 3. Taulukosta 7 voisi ajatella, että Jyväskylän kuivajäte olisi ollut laadultaan parempaa, kuin Pietarsaaren kuivajäte, mutta Jyväskylän kuivajätteen seassa oli suuria epäpuhtauksia, jotka jouduttiin poistamaan manuaalisesti. Jyväskylän kuivajätteestä, saatu energia-polttoaine jäi kahdella laitoksella REF 3 ulkopuolelle ja lyhyimmällä käsittelyllä kyseistä jäte-erää ei edes voitu ajaa epäpuhtauksien määrästä johtuen. Jyväskylän kuivajätteestä valmistettu polttoaine ylitti natriumin ja kaliumin yhteenlasketulla pitoisuudella REF 3 raja-arvon lisäksi toisella prosessilla ylittyi elohopean ja toisella kadmiumin raja-arvo. Edellä esitetystä voidaan vetää johtopäätös, että mitä epätasaisempaa jäte on sitä vaikeampaa siitä on saada mekaanisesti jakeita erilleen. Lisäksi sekalainen jäte vaatii monimutkaisemman prosessin ja sen myötä erottelun energiankulutus ja hinta kasvavat. (Ajanko et al., 2005, 57-65) Taulukossa 8 on esitetty Ajangon tutkimuksessa saadut REF-laatulokat edellä kuvatuilla jätelakeilla ja käsittelyketjuilla.

Taulukko 8 REF:n laatu käsittelyn ja lähtömateriaalin mukaan (Ajanko et al., 2005)

	Käsittely 1	Käsittely 2	Käsittely 3
Lahden energiajäte	REF 2	REF 2	REF >3
Pietarsaaren kuivajäte	REF 3	REF 3	REF 3
Jyväskylän kuivajäte	-	REF >3	REF >3

Kun edellä olevaa tietoa verrataan yksittäisten menetelmien erotustehokkuuksiin voidaan sanoa, että hyviin erotustehokkuuksiin pääsemiseksi on tulevan jätteen oltava koostumukseltaan kyseiselle menetelmälle sopivaa. Tämä muodostaa yhdyskuntajätteen käsittelyssä pitkiä prosessiketjuja. Kotitalouksissa kerätty jäte sisältää biojätettä, joka likaa muut materiaalit ja vaikeuttaa niiden jatkokäyttöä. Jotta mekaaninen lajittelu onnistuisi, olisi ensimmäisenä poistettava biojäte eroteltavasta jakeesta ja sen jälkeen pyrittävä erottelemaan muut jakeet. Ajangon tutkimuksessa vain yhdessä prosessissa oli mukana pyörrevirtaerotin ei-magneettisten metallien erottamista varten. Sen vaikutus yhdyskuntajätteestä erotun kierrätyspolttoaineen haitta-aineiden pitoisuuteen oli varsin pieni, sillä suuri osa yhdyskuntajätteen alumiinista on sitoutunut muihin materiaaleihin. (Ajanko et al., 2005, 57-65.)

4.2.3 Kustannusten ja ympäristönäkökohtien huomioiminen käsittelyketjujen suunnittelussa

Suunniteltaessa jätteenkäsittelyprosesseja tulee huomioitavaksi myös muita kuin suoraan käsiteltävään jätteeseen tai lopputuotteisiin liittyviä tekijöitä. Yksi merkittävä tekijä ovat käsittelyn kustannukset. Erilaiset menetelmät aiheuttavat erilaisia investointi- ja käyttökustannuksia. Mitä pidempiä käsittelyketjut ovat, sitä kalliimmiksi investoinnit tulevat. (Caputo and Pelagagge, 2002) Investointikustannusten ja saadun hyödyn optimointi on tärkeässä roolissa käsittelyprosessien suunnittelussa.

Käyttökustannuksiin vaikuttaa merkittävästi menetelmän energiankulutus ja vaadittavan henkilöstön määrä. Murskaimet kuluttavat runsaasti energiaa, mutta ovat usein välttämättömiä muiden menetelmien toimimisen vuoksi. Sen sijaan magneetit, joilla saadaan jättees- tä eroteltua arvokasta materiaalia ovat sekä käyttö- että investointikustannuksiltaan koh- tuullisia. Nämä tekijät vaikuttavat siihen, että metallien, etenkin rautametallien erottamien yhdyskuntajätteestä on kannattavampaa kuin monien muiden materiaalin erottaminen. Rautametallien erottamisessa erotustehokkuus on hyvä, investointi- ja käyttökustannukset kohtuulliset ja tuotetun raaka-aineen hinta on hyvä verrattuna esimerkiksi lasin erottami- seen. Lasin erottamisessa sekä investointi- että käyttökustannukset ovat merkittävästi suu- rempia ja saatu hyöty on pienempi. Lasin määrä yhdyskuntajätteessä on alhainen ja sen saaminen puhtaana erilleen on vaikeaa. Toisena esimerkkinä voidaan ottaa kalvomaiset muovit, joille ei ole hyviä mekaanisia erotusmenetelmiä. Parhaimpiin lopputuloksiin on päästy käsinlajittelulla ja käsinlajittelua tukevalla Film Vacuum-menettelyllä, mutta tämä vaatii runsaasti työvoimaa (Pressley et al., 2015). Käsinlajittelulinjastojen investointikus- tannukset eivät ole suuria, mutta työturvallisuuteen liittyvät ilmanvaihto- ja hygieniakysy- mykset sekä palkkauskulut nostavat hintaa. NIR-menetelmää on otettu käyttöön kalvo- maisten muovien erotteluun joillakin materiaalinkeräyslaitoksilla, mutta teknisten ongel- mien vuoksi se ei toistaiseksi ole vahva kilpailija käsinlajittelulle. (Haig et al., 2012, 14)

Toinen merkittävä tekijä jätteenkäsittelyä suunniteltaessa on sen vaikutus ympäristöön. Jätteenkäsittelymenetelmät vaikuttavat jätehuollon ympäristövaikutuksiin. Materiaalikierrätyksellä ja jätteenpoltolla voidaan säästää neitseellisiä luonnonvaroja toisaalta jätteiden käsittely kuluttaa energiaa ja aiheuttaa näin päästöjä energiantuotannon kautta. Elinkaari- tarkastelujen näkökulmasta materiaalien kierrätys aiheuttaa pääosin positiivisen eli ympä-

ristöä säästävän vaikutuksen kun huomioidaan kierrätysmateriaalilla korvattavan neitseellisen raaka-aineen aiheuttama vaikutus. Taulukkoon 9 on koottu Ionescun työstä esimerkkejä jätteenkäsittelyn ympäristövaikutusindikaattoreista. (Ionescu et al., 2013; Zaman, 2010) Mekaanisten erotusmenetelmien osalta negatiiviset ympäristövaikutukset liittyvät usein menetelmien energiankulutukseen. (Coelho and Brito, 2013)

Taulukko 9 Ympäristövaikutusindikaattorit jätteenkäsittelymenetelmissä (Ionescu et al., 2013; Zaman, 2010)

	Ilmaston lämpeneminen (kg CO ₂ eq / t)	Happamoituminen (kg SO ₂ eq / t)	Myrkyllisyys (kg 1,4 DCB eq/ t)	Valokemiallinen otsonireaktio (kg C ₂ H ₂ eq/t)
Polttaminen	424,4	0,584	1178,6	-0,0077
Kaasutus	412,1	0,247	805,5	-0,0024
Kaatopaikkakäsittely	746,4	0,243	8,149	0,116
Metallinkeräys	-9855	-52	-47001	-2,9
Lasinkeräys	-722	-2,9	-141	-0,185
Puunkeräys	-166	-1,2	-93	-0,317
Paperinkeräys	-577	-3,3	-126	-0,237
Muovinkeräys	-1120	-7,1	-248	-1,2

Ionescu on työssään laskenut erilaiset Eurooppaan sijoittuvat mallit, joissa huomioitiin jätteenkäsittelyketjun ympäristövaikutukset. Työssä on huomattavaa, että kaikki esitetyt käsittelyketjut, joissa materiaalia kerättiin talteen ennen polttoa tai kaasutusta, aiheuttivat positiivisen eli ympäristöä säästävän vaikutuksen. Toinen merkittävä huomio on, että ei ollut suurta merkitystä ilmaston lämpenemisen tai happamoitumisen indikaattoreihin erotettiin jäte pääosin syntypaikkalajittelulla vai mekaanisella erottelulla. Sen sijaan myrkyllisyyttä kuvaava indikaattori oli 33 % parempi tapauksessa, joissa syntypaikkalajittelun taso oli korkea. Ionescun mukaan ilmastonmuutoksen kannalta ei ole merkitystä, kerättiin-
kö kierrätettävät jakeet erikseen vai erotettiin ne mekaanisesti yhdyskuntajätteen seasta. Tärkeää on, että jakeet, joiden uudelleenkäytöllä on suurimmat ympäristöä säästävät vaikutukset, saadaan erilleen jätteenkäsittelyprosessin aikana. (Ionescu et al., 2013.)

4.3 Erotustehokkuuden laskeminen jätteenkäsittelyprosessista

Jätteiden mekaaninen erottaminen vaatii usean eri osaprosessin käyttöä. Mitä tarkemmin jätteestä halutaan erotella materiaalia talteen, sitä enemmän eri menetelmiä tulee käyttää, sillä pääosa mekaanisista erotusmenetelmistä jakaa eroteltavan jätteen kahteen osaa. Koko erotteluketjun laskemiseen voidaan hyödyntää Diazin kehittämää RFTF menetelmää, jossa jokaisella prosessilla on määritelty talteenottokerroin (eng. Recovery Factor), eli tieto kuinka paljon osaprosessille saapuvasta materiaalista saadaan erotettu. Talteenottokerroin määritetään jokaiselle jätejakeelle erikseen. (Lee and Cho, 2006.) Ketjuttamalla näitä prosesseja saadaan luotua prosessi, jonka loppupisteistä saadaan kokonaisprosessista ulos kulkeneet virrat. Matriisiin U sijoitetaan alkuperäisen jätteen koostumus. Matriisiin R_i osaprosessin talteenottokertoimet. Kertomalla matriisi U matriisilla R_i saadaan virran X_i koostumus. Toinen osaprosessista poistuva virta saadaan kun ensin vähennetään talteenottokerroinmatriisi R yksikkömatriisista I ja kerrotaan matriisi U saadulla matriisilla. Edellä kuvattu laskenta on esitetty kaavassa 1. Käytetyt matriisit on esitetty kaavassa 2.

Kaava 1 Eroteltavien jätejakeiden koostumuksen laskeminen (Lee and Cho, 2006)

$$X_i = R_i U$$

$$Y_i = (I - R_i) U$$

R_i = Talteenottokerroin

U = Eroteltavan jakeen koostumus

X_i = Erotetun jakeen x koostumus

Y_i = Jakeen y koostumus

Kaava 2 Laskennassa tarvittavat matriisit

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \bullet \\ u_n \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & \bullet & 0 \\ 0 & r_2 & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & 0 \\ 0 & \bullet & 0 & r_n \end{bmatrix}$$

$$X_i = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \bullet \\ x_n \end{bmatrix}$$

$$Y_i = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \bullet \\ y_n \end{bmatrix}$$

Tässä työssä kokonaisprosessien erotustehokkuutta on arvioitu laskemalla edellä mainitulla menetelmällä massatase kolmelle erilaiselle käsittelyketjulle. Laskenta on tehty SciLab-ohjelmaa käyttäen ja laskentakoodit ovat tämän työn liitteinä 4-6. Liitteessä 3 on esitetty käytetyt talteenottokertoimet lähteineen. Luvussa 5 on tarkemmin esitelty esimerkkitapaukset, lähtömateriaalit ja saadut tulokset.

Erotteluketjujen energiankulutukset on laskettu käyttäen kirjallisuudesta otettuja energiankulutus tietoja eri osaprosesseille ja sijoittamalla ne matriisiin E_i . Matriisi E_i on tehty erikseen jokaiselle osaprosessille. Matriisilla E_i kerrotaan kuhunkin prosessiin tuleva virta U . Koko prosessin energiankulutus saadaan yksittäisten prosessien energiankulutuksen summasta. Energiankulutuksen laskenta on mukana liitteissä 4-6.

5 Laskennalliset esimerkit jätteenkäsittelyprosesseista

5.1 Esimerkkitapausten lähtötilanne

Tämän työn tarkoituksena on pohtia mekaanisen käsittelyn erotustehokkuutta. Aiemmissa luvuissa on käsitelty yksittäisiä erottelumenetelmiä, niiden käyttökokemuksia sekä syitä menetelmien yhdistämiselle. Tässä luvussa esitetään kolme erilaista simuloitua jätteiden käsittelyprosessia, joiden lähtökohtana on niiden soveltuvuus Suomeen. Työssä on vertailun vuoksi laskettu tapauksista 1 ja 2 useampi toisistaan hieman eroava versio. Kahdessa ensimmäisessä prosessissa käsitellään suomalaista sekajätettä. Ensimmäisen tapauksen on ajateltu sopivan arinapolttolaitoksen esikäsittelyksi ja tarkoituksena on kerätä vain helpoiten hyötykäytettävä materiaali ennen polttoa. Prosessin on ajateltu olevan kohtuullisen yksinkertainen ja mahdollisesti jopa laitoksiin jälkikäteen rakennettava. Toinen tapaus on laajempi materiaalienkeräyslaitos, jossa erottelun tehokkuuteen painotetaan enemmän ja erottelussa kerätään myös vaikeammin eroteltavia ja käytettäviä jakeita. Prosessissa pyritään mahdollisimman hyvään materiaalin hyötykäyttöasteeseen ja polttoon on ajateltu menevän vain jäte, jolla ei ole hyötykäyttöpotentiaalia materiaalina. Kolmannessa esimerkissä lähdetään liikkeelle toisesta näkökulmasta. Lähtökohtana on syntypaikkalajittelun tehostaminen ja laajentaminen koskemaan pakkausmuoveja. Ajatuksena on kerätä kierrätettävä jae kiinteistöiltä yhtenä kuormana ja erotella mekaanisesti jakeet toisistaan. Esimerkissä kolme lasketaan massatase laitokselle johon tulee valmiiksi lajiteltua jätettä.

Lähtömateriaalina tapauksissa 1.1-2.4 on HSY:n alueen sekajäte. Koostumus on otettu Pulkkinen vuonna 2013 julkaisemasta työstä Pääkaupunkiseudun sekajätteen määrä ja laatu vuonna 2012. Tapauksen 3 lähtömateriaali on muodostettu Ekopiste-pilotointi hankkeesta saaduista tuloksista (*Ekopistepilotointi*, 2012, 7-10). Alumiinin ja rautametallin suhde on otettu sekajätteestä (Pulkkinen, 2013). Pakkausmuovien jakautumiseen on käytetty ARVI-ohjelman yhteydessä tutkittua sekajätteen muovien koostumusta. (Anderson and Poliakova, 2015)

Laskennassa käytetyt talteenottokertoimet ovat peräisin erilähteistä ja osa on muodostettu laskennallisesti, sillä kaikkien erottelumenetelmien osalta suoria talteenottokertoimia ei

ollut saatavilla. Talteenottokertoimien luomiseen on käytetty eri esimerkkien puhtausasteita ja samankaltaiselle jakeelle annettuja talteenottokertoimia. Käytetyt talteenottokertoimet löytyvä liitteestä 3. Liitteestä löytyvät myös tiedot siitä, mistä lähteestä kerroin on ja onko se suoraan lähteestä vai lähteen perusteella muodostettu. Laskennassa edellisen vaiheen rejekti on aina seuraavan vaiheen syöte. Useimmissa vaiheissa kaikki rejektit käsitellään jollakin menetelmällä. Toisinaan eri menetelmien rejektejä yhdistellään ennen seuraavaa vaihetta. Tarkemmat prosessikuvaukset löytyvät esimerkkitapauksia käsittelevissä luvuista.

5.2 Materiaalin keräys polttoon menevän jätteen esikäsittelynä

Tapausten 1.1 ja 1.2 lähtökohdaksi on otettu Suomen nykytilanne, jossa jätteen arinapoltto on kasvattanut merkitystään jätteenkäsittelytapana. Nykyiset arinapolttolaitokset vaativat polttoainetta, eikä vasta tehtyjä investointeja voida kuolettaa ilman vuosikymmenten käyttöä. Tulee kuitenkin huomioida, että arinalle menee paljon polttoon soveltumatonta jätettä, joista osa on selkeästi hyödynnettävää ja jopa polttolaitoksen toimintaa häiritsevää. Yhdyskuntajätteen mukana polttolaitoksille menee alumiinia, rautametalleja ja lasia. Lisäksi polttoon menee biojätteen erilliskeräyksestä huolimatta runsaasti biojätettä, jonka tehokkaampi käyttötapa olisi kompostointi tai mädätys. Muovit, vaikka ovat hyvää polttoainetta, ovat osittain myös kierrätettävää raaka-ainetta. Ottamatta tässä työssä kantaa esikäsittelyn kustannusvaikutuksiin tai tilan tarpeeseen on tätä ketjua suunniteltaessa on ajateltu sen sopivuutta esimerkiksi jo olemassa olevien jätteenpolttolaitosten yhteyteen. Ketjun tavoitteena on olla lyhyt ja arvokkaimmat raaka-aineet tehokkaasti erotteleva.

Ketjun ensimmäinen prosessi on murskaus, jossa jäte murskataan vasaramurskaimella. Sen jälkeen jäte kulkee rumpuseulaan, jonka tavoitteena on erotella mahdollisimman suuri osa yhdyskuntajätteen sisältämästä biojätteestä. Biojätteen erottelulla on tässä ketjussa kaksi tarkoitusta. Tavoitteena on pienentää biojätteen määrää jätteessä, jotta seuraaviin prosesseihin menevä jätevirta pienenee, samalla tehostaen seuraavien prosessien toimintaa. Toinen syy on se, että mikäli biojäte on kompostointi tai mädätyskelpoista, saadaan siitä näillä käsittelyillä suurempi hyöty kuin polttamalla se arinalla. Arinalla polttaessa biojätteen huonona puolena on sen kosteus. Biojätteen lämpöarvo on merkittävästi alempi ja kosteus suurempi, kuin muoveilla ja papereilla, jotka ovat energiantuotannon kannalta hyvää polt-

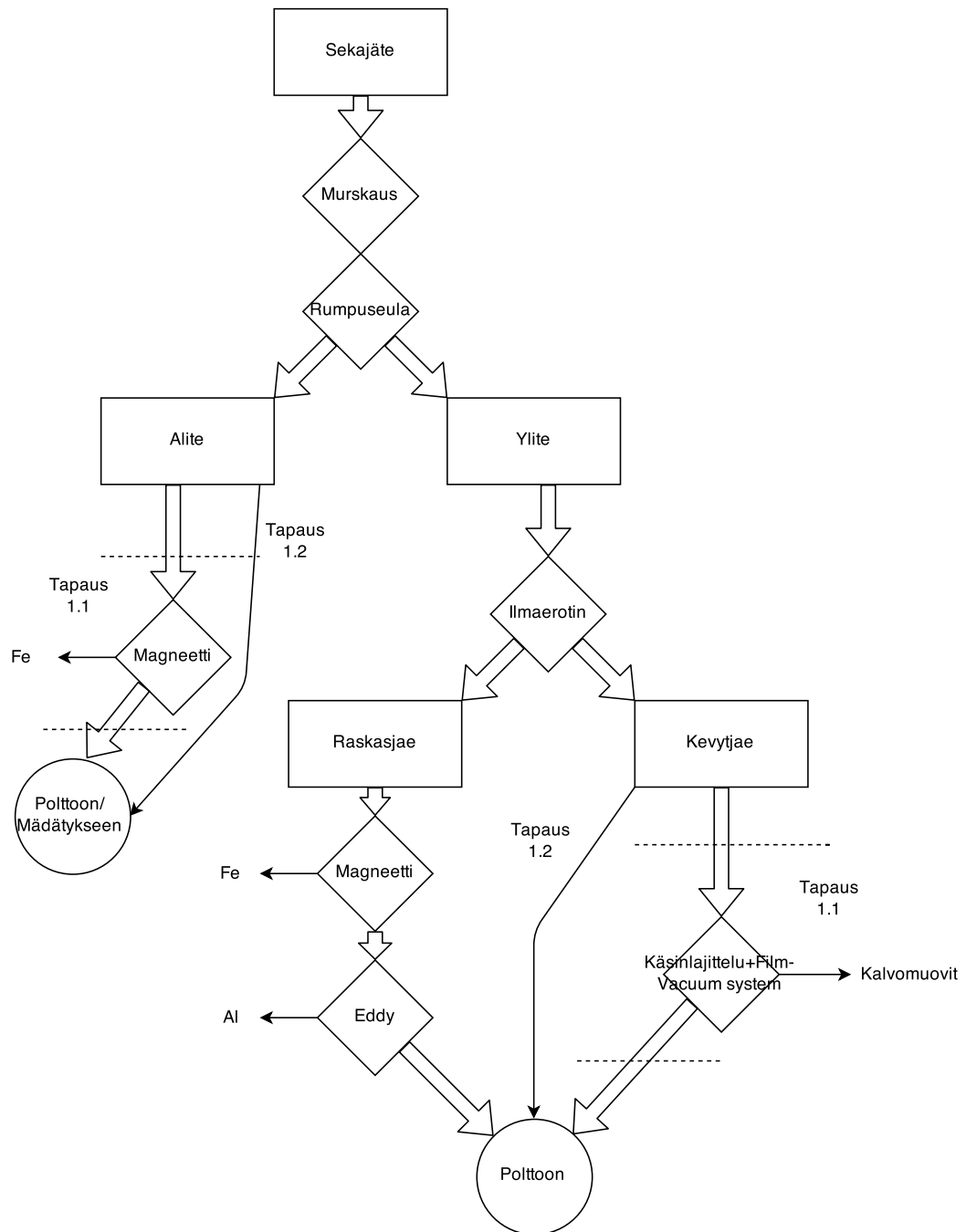
toainetta. Rumpuseulan alitteesta voidaan poistaa hihnamagneetilla rautametallit ennen mädätystä tai polttoa.

Rumpuseulan ylite johdetaan ilmaerottimeen, jolla jäte jaetaan kahteen osaan. Alitteeseen, joka pitää sisällään lasin, suuren osan metalleista, jäljellä olevasta biohajoavasta aineesta sekä muusta raskaasta materiaalista. Alite johdetaan magneettierottimelle, jolla erotetaan rautametallit. Rautametallien erotuksen jälkeen jäte johdetaan pyörrevirtaerottimelle, jolla saadaan talteen alumiini. Rautametallit ja alumiini ovat molemmat arvokkaita kierrätysmateriaaleja. Metallien kierrätys säästää luonnonvaroja ja metallit kestävät hyvin kierrätystä. Metallien jälkikäsittelyssä epäpuhtauksien poistaminen onnistuu saatuun hyötyyn nähden kohtuullisella lisävaivalla. Ilmaerotuksen ylite on kevyttä materiaalia, suurelta osin paperia, muovia ja kartonkia sekä jonkin verran epäpuhtauksia kuten alumiinia ja biohajoavaa materiaalia. Tässä vaiheessa jäte on hyvin polttoon soveltuvaa materiaalia.

Materiaalitehokkuuden kannalta myös kevyestä jakeesta olisi hyvä erotella kierrätysmateriaaleja. Muovien erottelu yhdyskuntajätteestä on vaikeaa. Kalvomuoveja erotellaan lähinnä käsinlajittelulla. Käsinlajittelua voidaan tehostaa Film-Vacuum-käsittelyllä, kuten Pressleyn (2015) työssä on esitetty. NIR-erotusta on tutkittu ja sitä on käytetty myös kalvomaisten muovien erotteluun, mutta teknisten vaikeuksien vuoksi sen ei koeta olevan vielä varteenotettava kilpailija käsinlajittelulle (Haig et al., 2012, 15). Pressleyn työssä on esitetty Film-Vacuum käsittelylle erotustehokkuudeksi 81 %, kun lähtömateriaalina on sekalainen yhdyskuntajäte. Lisäksi työssä on annettu tieto, että kaksi henkilöä käsittelee 10 tonnia jätettä tunnissa. (Pressley et al., 2015) Toisaalla sanotaan, että yksi henkilö voi käsin lajittelemalla saada talteen 30 kg kalvomuovia tunnissa (Haig et al., 2012, 14). Oletuksella, että kaikki kalvomainen pakkausmuovi olisi kierrätyskelpoista ja erottelu onnistuisi puhtaasti ja annetulla tehokkuudella saadaan erotellulle muoville pelkän lajittelun työkulmukseksi 60-300 € tuotettua kalvomuovitonnia kohden.

Suomessa kalvomuovien käsinlajittelu ei liene kannattavaa. Sekajätteessä oleva biojäte liikaa herkästi muovit, joten suurin osa sekajätteen muoveista voi olla kierrätyskelvotonta. Vertailun vuoksi tässä työssä on laskettu tapaukset 1.1 ja 1.2, jotka eroavat toisistaan kalvomuovien erottamisen ja rumpuseulan alitteen käsittelyssä. Tapauksessa 1.1 kalvomuovit erotetaan ilmaseulan ylitteestä käsin Film-Vacuum menetelmää hyödyntäen ja rumpuseulan alitteesta poistetaan rautametallit magneetilla. Tapauksessa 1.2 ei erotella kalvo-

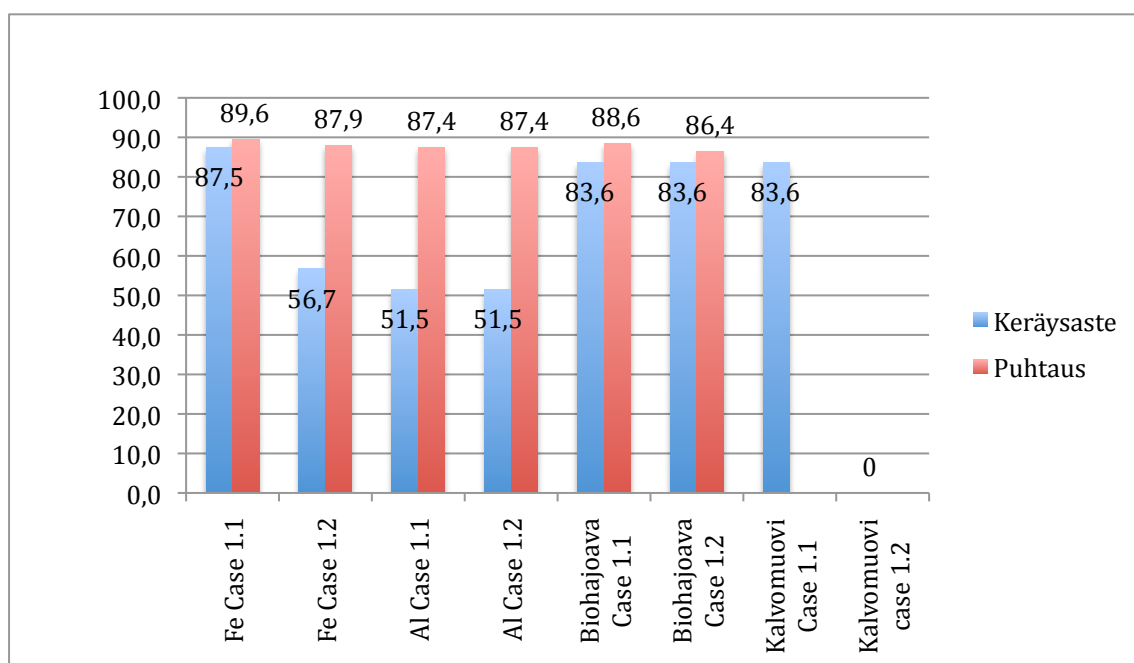
muoveja, eikä rautametalleja rumpuseulan alitteesta. Kuvassa 20 on esitetty ensimmäisen esimerkkitapauksen erotteluprosessit. Katkoviivat erottelevat vaihtoehtoiset toimintatavat toisistaan.



Kuva 20 Eroitteluprosessi tapaukset 1.1 ja 1.2

Liitteessä 7 on esitetty jätejakeittain materiaalivirrat tapauksissa 1.1 ja 1.2. Tapauksessa 1.1 rautametallien osalta erotustehokkuus on 87 % ja puhtaus 90 %. Tapauksessa 1.2 jää

rautametallien erotustehokkuus 57 %:iin ja puhtaus 88 %:iin. Ero johtuu rumpuseulan alitteen käsittelystä. Ilman rumpuseulan alitteen magneettierotusta erotustehokkuus jää alhaiseksi. Alumiinin osalta erotustehokkuus on molemmissa tapauksissa 51 % ja puhtaus 87 %. Kalvomaisten muovien erotustehokkuus tapauksessa 1.1 olisi 65 %, jos erotus tapahtuisi Pressleyn työssä esitetyllä tehokkuudella. Kuvassa 21 on esitetty esimerkkilaskelmissa 1.1 ja 1.2 saadut keräysasteet ja eroteltujen jakeiden puhtaudet. Kuvasta nähdään selvästi, että rumpuseulan alitteen käsittely magneettierottimella parantaa rautametallien keräysastetta merkittävästi. Lisäksi se parantaa biohajoavan jakeen puhtautta. Biohajoavan jakeen puhtauksissa oleva ero selittyy magneettierottimen puuttumisella.

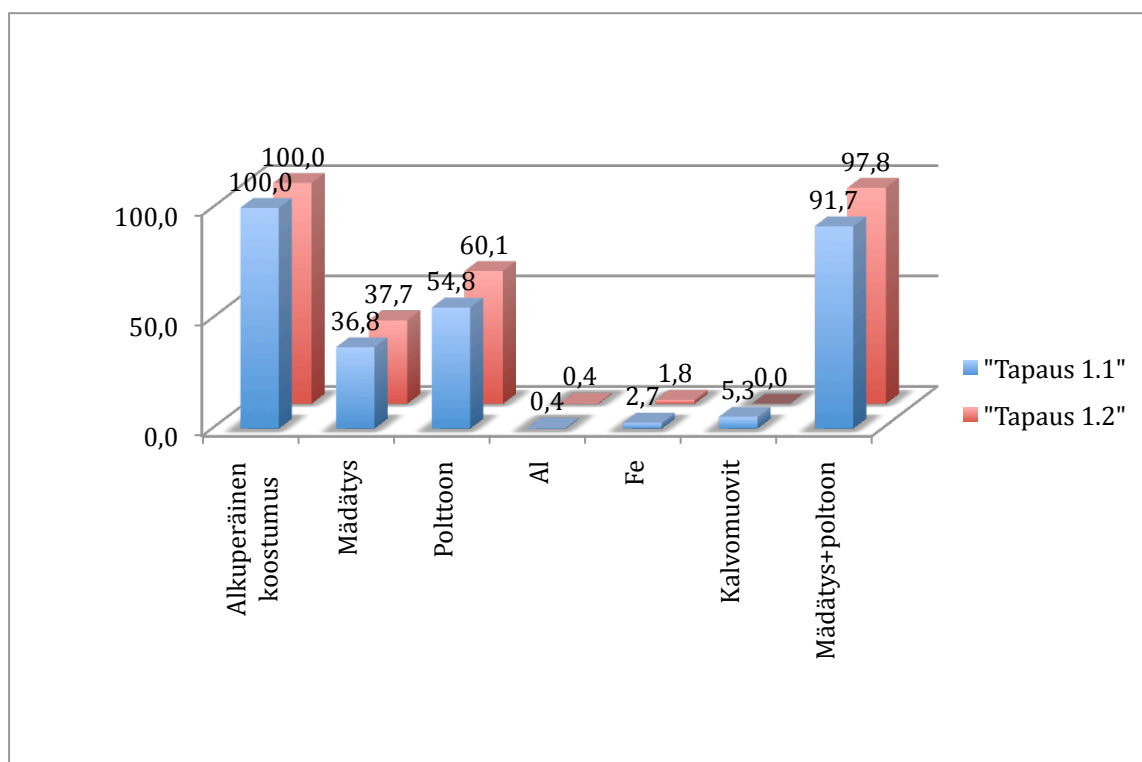


Kuva 21 Tapausten 1.1 ja 1.2 keräysasteet ja puhtaus

Poltettavan jätteen määrään vaikuttaa vahvasti, se mitä rumpuseulan alitteelle tehdään. Mikäli Rumpuseulan alite mädätetään ja kalvomuuvit erotetaan kiertoon, menee polttoon 54,8 % jätteestä. Rumpuseula erottaa 37,7 % jätteestä, joten poltettavan jätteen määrään rumpuseulan alitteen käsittelyllä on suuri merkitys. Erotettujen kalvomaisten muovien osuus on 5,3 % koko jätemäärästä ja ilmaseulan jälkeen kerättyjen metallien osuus on 2,2 %. Kuvassa 22 on esitetty materiaalivirrat tapauksessa, jossa rumpuseulan alite mädätetään ja muut ei-kierrätettävät jakeet menevät polttoon. Mädätyksessä rumpuseulan alite käsitellään anaerobisesti ja käsittelystä muodostuu biokaasua ja mädätysjäännöstä. Mädätysjäännös tulee kuivata ennen muuta käyttöä. Kuivauksen jälkeen mädätysjäännös on tuotteistet-

tavissa erilaisiin maanparannustarkoituksiin viherrakentamisessa tai lannoitteeksi. Määtysjäännös voidaan myös kuivata polttoa varten. Määtysjäännöksen käsittelyssä tulee kuitenkin huomioida määtysjäännöksessä olevat haitta-aineet ja niiden erottaminen. (Partanen, 2010, 126-127) Määtykseen menevän materiaalin haitta-aineiden pitoisuus esitetyillä käsittelyillä jää korkeaksi määtymisen kannalta. Kivet ja lasi saadaan poistettua määtysjäännöksestä painovoimaisesti, mutta muovi materiaalit pitäisi pyrkiä poistamaan tarkemmin ennen määtystä.

Lisäksi kuvassa on esitetty jae ”polttoon, ei määtystä” kuvaamaan tilannetta, jossa rum-puseulan alitetta ei määtettäisi vaan se yhdistettäisiin poltettavaan jakeeseen. Näin voitaisiin menetellä mikäli tapauksen 1.2 mukainen käsittely toteutettaisiin jo valmiin polttolaitoksen yhteydessä. Tässä tapauksessa tosin näinkin laajan käsittelyn rakentamista tuskin saataisiin kannattavaksi.



Kuva 22 Jätevirran jakautuminen tapaus 1.1 ja 1.2

5.3 Tehostettu mekaaninen erottelu, pääpaino hyödynnettävien jakeiden keräyksessä

Toiseksi esimerkiksi on otettu prosessi, jossa pyritään erottelemaan mahdollisimman paljon hyödyntämiskelpoisia jätteitä sekajätteestä. Myös tässä ketjussa lähtömateriaalina on sama HSY:n alueella kerätty sekajäte kuin ensimmäisessä esimerkissä. Tässä ketjussa pyritään keräämään metallit entistä tarkemmin talteen, sekä tehdään oletus, että rumpuseulan ja ballistisen erottimen seula-alitteet ovat mädätyskelpoisia. Kun jäte murskataan, merkittävä osa lasista joutuu seula-alitteisiin. Tämä hieno lasimateriaali on tarkoitus erotella Portugalissa käytetyllä RecGlass menetelmällä mädätysjäännöksestä. Metallit erotetaan seula alitteista ennen mädätystä. Rumpuseulan tarkoituksena on tässäkin tapauksessa erotella biohajoava materiaali muusta jätteestä ennen muita erotusprosesseja.

Rumpuseulan ylite ohjataan ballistiselle erottimelle, jossa on lisänä seulaverkko. Seulaverkon tavoitteena on parantaa hienoa-aineksen ja biojätteen erotustehokkuutta. Rumpuseulan läpi kulkeutunut hienoa-aine valuu seulaverkon läpi ja yhdistetään rumpuseulan alitteeseen. Ballistisella erottimella jäte jaetaan muilta osin kahteen osaan. Raskaaseen ja kolmiulotteiseen, joka vierii erotinta alaspäin ja kevyeen ja litteään, joka kulkee hihnaa ylöspäin. Ballistisella erottimella erotettuna pahvi ja paperit kulkevat kevyen jakeen joukkoon samoin suuri osa muoveista. Sen sijaan pysyvät kappaleet kuten kivet metallit, vielä ehjänä säilyneet suuremmat lasikappaleet, puu ja ehjät kovamuoviset kappaleet päätyvät raskaan jakeen joukkoon. Löydettyjen lähtötietojen mukaan lasia ei olisi jäljellä lainkaan rumpuseulan ja ballistisen erottimen seulaverkon jälkeen käsiteltäessä murskattua jätettä.

Ballistisen erottimen raskaasta jakeesta erotetaan ensin magneetilla rauta ja tämän jälkeen pyörrevirtaerottimella alumiini. Lasin optisesta erottamisesta ei ole hyötyä tässä tapauksessa, sillä näkyvään valoon perustuva optinen erotin toimii huonosti tilanteessa, jossa jäte on kovin likaista. Mikäli rumpuseulan jälkeen seuraavana vaiheena olisi käytetty tuuliseulaa ballistisen erottimen sijasta, olisi mahdollisesti järkevää erotella lasia optisesti. Menetelmän toiminnan epävarmuuden, hinnakkuuden ja lasin pienen määrän takia esimerkkiprosessissa lasin erotus tehdään vain mädätysjäännöksestä.

Ballistiselta erottimelta tuleva kevyt jae pitää sisällään pahvia, paperia ja muoveja. Kevyen jakeen joukkoon kulkeutuu myös metalleja. Magneettiset metallit poistetaan magneetilla ja alumiini pyörrevirtaerottimella. Biojätteen määrästä johtuen kierrätyskelpoisen kuituaineksen kerääminen sekajätteen joukosta voi olla mahdoton, etenkin kun jäte murskataan ennen rumpuseulaa. Pressley esittää työssään, että sekajätteessä voitaisiin saada kuitumateriaali talteen kiekkoseulalla 60 %:n erotustehokkuudella. Pressleyn esimerkeissä jätettä ei kuitenkaan ajettu murskaimen läpi ennen seuloja. Alumiinin erottamisen jälkeen erotetaan kevyestä jakeesta kierrätyskelpoiset muovit. Tässä työssä on oletettu pakkausmuovien olevan kierrätyskelpoista materiaalia.

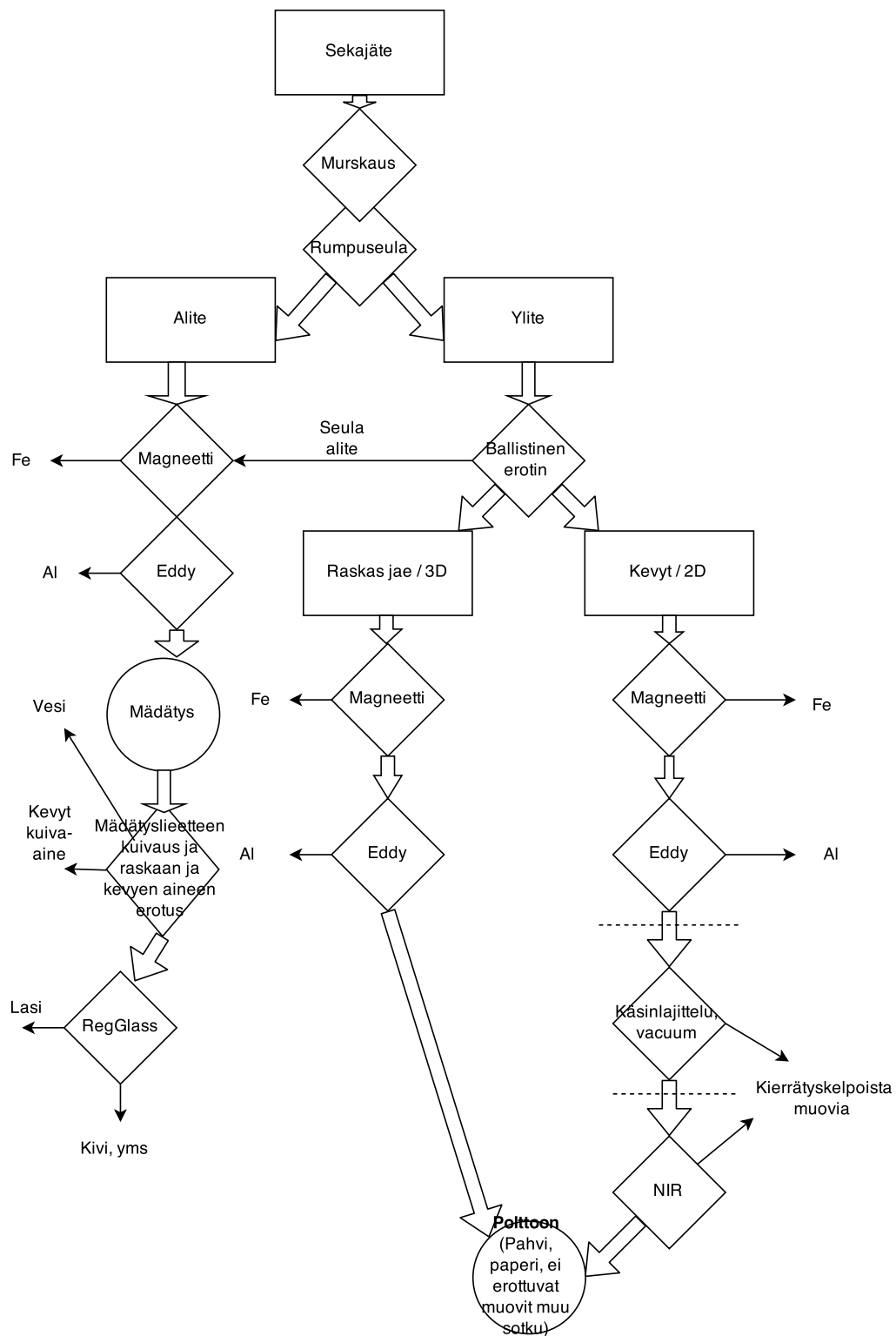
Kovia pakkausmuoveja erotetaan simuloitussa esimerkkiprosessissa NIR-erottimella. Materiaalinkeräyslaitoksilla Euroopassa muovilaatujen puhtausasteeksi on saatu yli 90 %. Materiaalinkeräyslaitoksilla on eroteltu pääasiassa erilaatuisia muovipulloja jakeesta, joka on kierrätysmuovien lisäksi sisältänyt pahvia, paperia ja pienempiä määriä muita jätteitä. Eroteltujen jakeiden suurin puhtautta laskeva tekijä on ollut muu kuin toivottu muovityyppi, muiden materiaalien osuus on ollut noin 1 %. On huomattava, että materiaalinkeräyslaitoksille tuleva jäte on puhtaampaa kuin suomalainen sekajäte. Optisille menetelmille ei ollut saatavilla tietoa kuinka siitä puhtaasti muovi saadaan eroteltua sekajätteessä. Euroopassa muoveista noin 40 % käytetään pakkauksiin. ARVI-tutkimusohjelmassa selvitettiin sekajätteen joukossa olevien muovien koostumusta Suomessa. Tutkimus on tehty lajittelututkimuksen yhteydessä vuoden 2015 helmi-maaliskuussa. Tutkimuksissa todettiin, että sekajätteen joukossa Suomessa on 16-18 % muoveja ja suurimpana jakeena LDPE- kalvot. Jätteen joukossa olevan muovin koostumus on tutkimuksen mukaan seuraava:

- 27 % LDPE-muovi
- 6 % PEHD-muovi
- 11% PET-muovi
- 20 % PP-muovi
- 8 % PS-muovi
- 7 % Sekoitemuovit
- 13 % Muut
- 7 % Ei muovit

Esimerkkilaskelmissa käytettävän kovan pakkausmuovin koostumus on laskettu Arvi-ohjelman tuloksista. (Anderson and Poliakova, 2015.) Laskelmissa on oletettu, että kovan pakkausmuovin koostuvan PET, PS, PP, HDPE ja sekoitemuovista. Muovityyppien suhteellinen jakauma kovassa pakkausmuovissa on oletettu samaksi kuin kyseisten muovityyppien jakauma ARVI-ohjelman tuloksissa. Lisäksi on oletettu, että kalvomaiset pakkausmuovit ovat puhtaasti LDPE:tä. Esimerkkilaskelmissa käytetty kovan pakkausmuovin koostumus on seuraava:

- 15 % PET
- 8 % HDPE-muovia
- 27 % PP-muovia
- 10 % PS-muovia
- 26 % Muita muoveja ja sekoitemuoveja

Materiaalinkeräyslaitoksilta saatuja puhtauksia ja edellä esitettyä muovijätteen koostumusta hyödyntäen on luotu talteenottokertoimet, joita on käytetty simulaatiossa. Vertailun vuoksi on esitetty myös kalvomuovin erottamien käsinlajitteluna Film-Vacuum menetelmää hyödyntäen tapauksessa 2.2, käyttäen samoja kertoimia kuin tapauksessa 1.1:ssä. Esimerkkitapaus 2.1 ei erottele kalvomuoveja. Kuvassa 23 on esitetty edellä kuvattu erotteluprosessi.

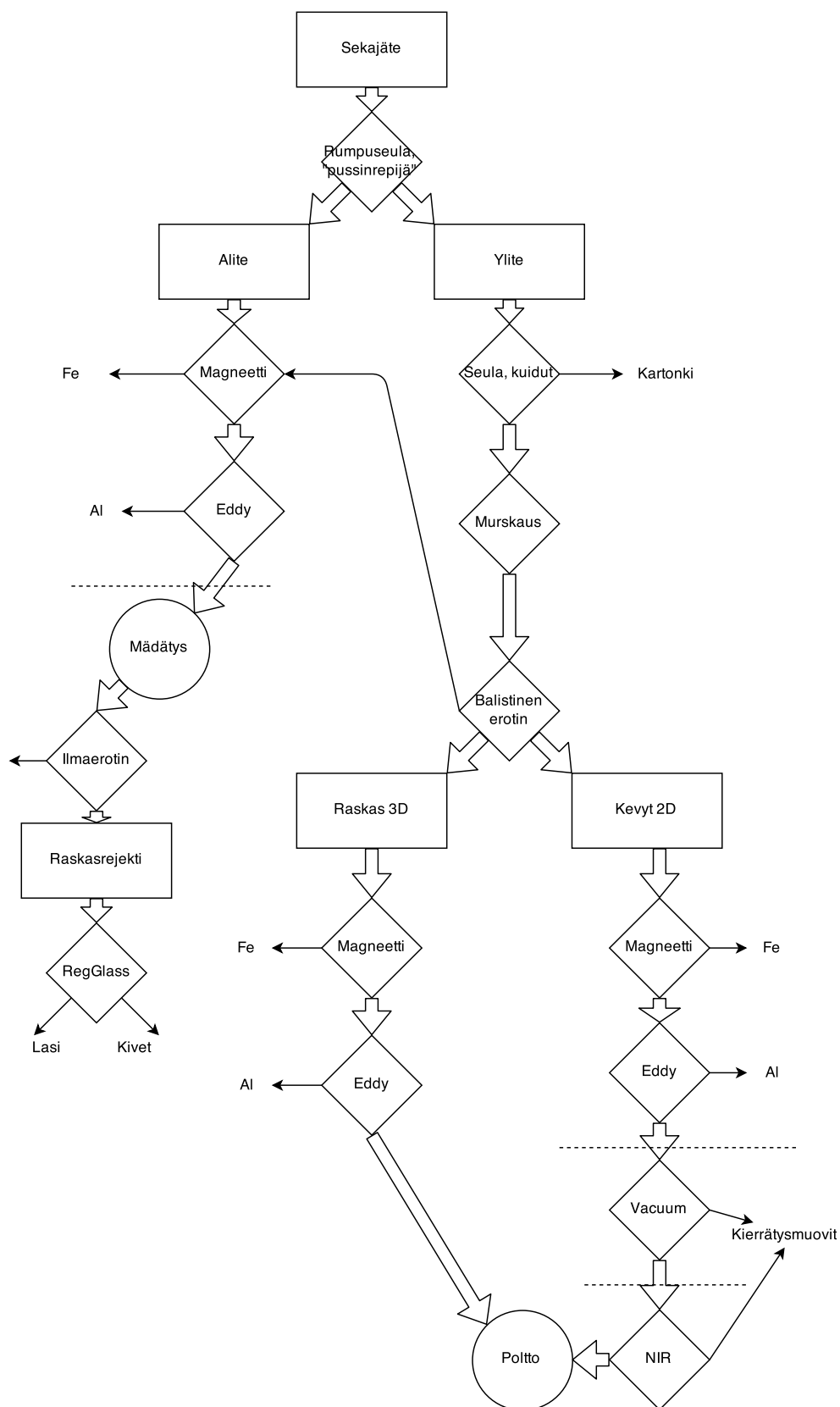


Kuva 23 Erotteluprosessi esimerkkiprosesseissa 2.1 ja 2.2

Sekajätteen joukossa on runsaasti kuitumateriaaleja. On mahdollista saada osa kuitujättees-
tä eroteltua sekajätteen joukosta, vaikka biojäte ja kosteus huonontavatkin kuitujätteen
uudelleenkäyttö mahdollisuuksia. Kuvassa 24 on esitetty tapaukset 2.3 ja 2.4, joissa pak-

kauskartonkia erotellaan ennen murskausta sekajätteen joukosta. Kaupallisia seuloja kuitumateriaalin erottamiseen on olemassa mutta tietoja erotustehokkuuksista ja puhtausasteista ei ollut saatavilla. Simulaatiossa on käytetty Pressleyn esittämää erotustehokuutta OCC:lle (old corrugated containers). Pressley esittää, että seula erottaa 60 % OCC:sta. Simulaation materiaalivirrat eivät kuitenkaan ole todenmukaisia, sillä Pressleyn työssä ei ole annettu eroteltavan jakeen puhtautta, jonka avulla olisi voinut laskea suhteellisen koostumuksen erotetulle jakeelle. Tapauksissa 2.3 ja 2.4 on laskettu, että rumpuseulan jälkeen jäljellä olevasta kartongista erottuu seulalla 60 %. Puhtautta jakeelle ei ole laskettu.

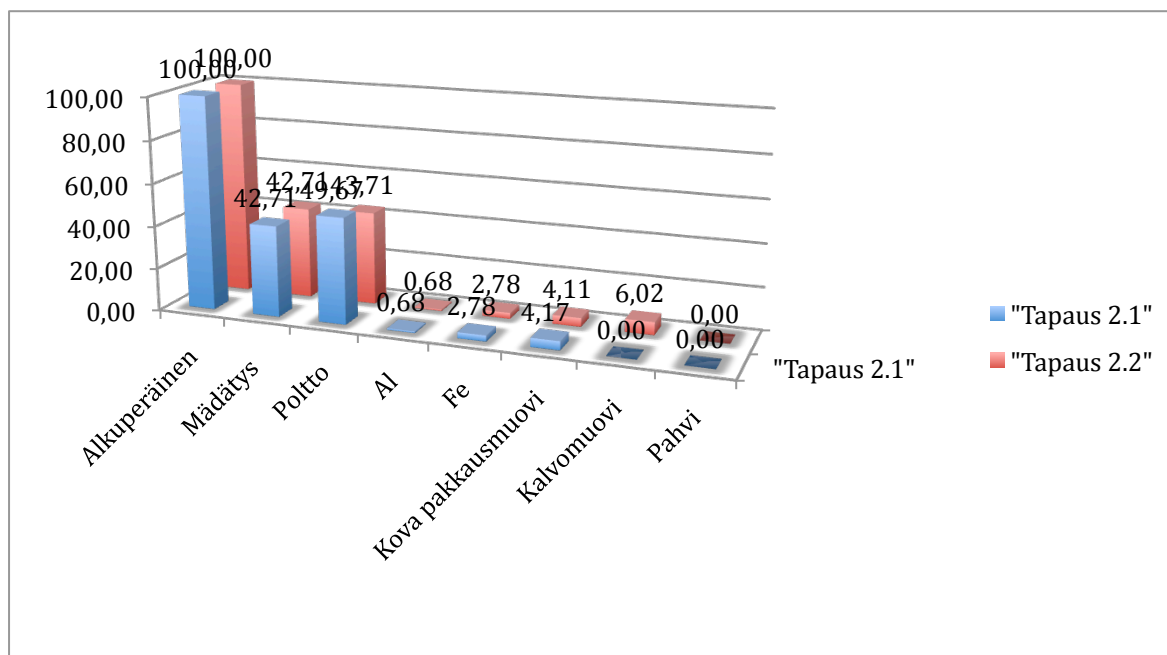
Liitteessä 5 on esitetty esimerkkitapausten 2.1 ja 2.4 laskentakoodit. Tapausten 2.2 ja 2.3 koodit saadaan helposti muokattua tapausten 2.1 ja 2.4 laskennoista. Kalvomuovien ja pahvin talteenottokertoimet eivät huomioi lainkaan erotuksen puhtautta. Myös kovien muovien talteenottokertoimien luomisessa on jouduttu tekemään oletuksia, sillä NIR-menetelmä tulee aina optimoida tapauskohtaisesti.



Kuva 24 Esimerkkitaupukset 2.3 ja 2.4

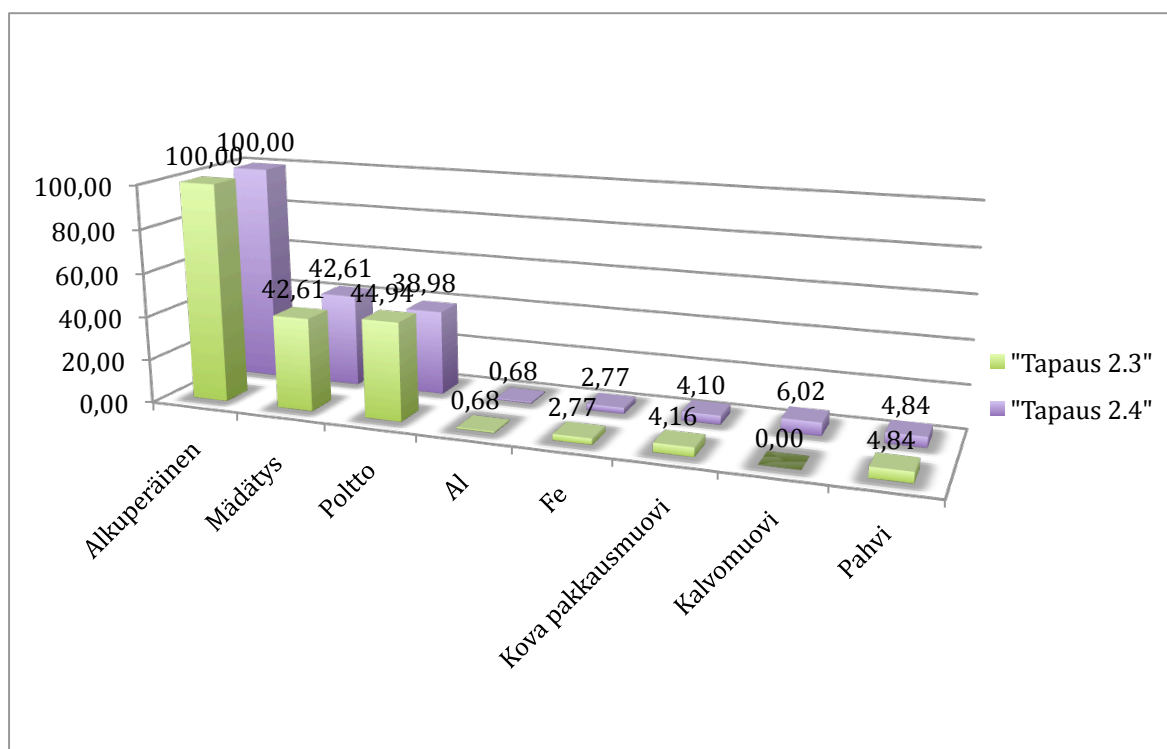
Esimerkkitapauksissa 2.1 ja 2.2 mädätykseen menee lähes 43 % sekajätteestä. Mädätykseen menevän jätteen määrän nousu verrattuna tapauksiin 1.1 ja 1.2 johtuu ilmaseulan korvaamisesta ballistisella erottimella. Ballistisen erottimen seula-alite ohjataan mädätykseen. Tämä tehostaa biohajoava materiaalin erottumista. Toisaalta sekajätteessä ollut lasi kulkeutuu mädättämöön. Mädättämön jälkeistä lasin erotusta ei ole laskettu. Biojätteen puhtaus on 82,5 %. Suurin osa haitta-aineista on lasia ja kovaa pakkausmuovia. Metalleja mädättämöön ei juurikaan mene, sillä seula-alitteista poistetaan sekä rauta- että alumiini ennen mädättämöä. Mädättämöön menevän jätteen osalta ei ole merkitystä käsitelläkö jäte tapauksien 2.1 ja 2.2 vai tapauksien 2.3 ja 2.4 tavalla. Erot prosessien välillä tulevat esiin kun katsotaan polttoon menevän jätteen määrää ja koostumusta. Kuvissa 25 ja 26 on esitetty materiaaliveirrat tapauksissa 2.1-2.4.

Raudan ja alumiinin erottamisen osalta kaikki versiot ovat yhtä tehokkaita. Pientä eroa on havaittavissa vain eroteltujen metallijakeiden puhtaudessa. Raudan erotustehokkuus on esimerkkiprosesseissa ollut noin 88 % ja puhtaus 86,2 - 86,6 %. Rautametallien joukkoon menee paperia, kalvomuovia ja muita kevyitä materiaaleja. Alumiinin osalta erotustehokkuus on 87 % ja puhtaus 86,5 - 86,7 %. Kovat pakkausmuovit erotetaan NIR-menetelmällä kaikissa tapauksissa. Kovista pakkausmuoveista esimerkin oletuksilla saadaan erilleen 47 %:a muovien puhtausasteen ollessa 96,4-98,0 %. Yksittäisten muovilaatujen osalta puhtaus on alempi, mutta optisesti erotetusta jakeesta 98 % on kovia pakkausmuoveja. Erotetut kovat pakkausmuovit ovat noin 4,2 %:a koko jätemäärästä. Pakkausmuovien erottaminen näkyy polttoon menevän jätteen määrässä. Tapauksissa 2.2 ja 2.4 erotetaan kalvomuovit käsinlajittelulla Film-Vacuum menetelmää hyödyntäen. Käsinlajittelulla kalvomuoveista saadaan simulaation mukaan eroteltua 74 %:a. Erotettu kalvomuovi on noin 6 %:a koko jätemäärästä. Jos sekä kalvo-, että kovamuoviset pakkaukset erotetaan simulaation mukaisesti niin, polttoon menevä jätemäärä pienenee 10 %:a Muovit ovat lämpöarvonsa puolesta hyvää polttoainetta, joten näinkin suuri muovien poistaminen poltettavan jätteen joukosta vaikuttaa polttoaineena käytetyn jätteen poltto-ominaisuuksiin.



Kuva 25 Esimerkkitapausten 2.1 ja 2.2 materiaalivirrat prosentteina

Tapauksissa 2.3 ja 2.4 prosessi eroaa tapauksista 2.1 ja 2.2. Tapaukset 2.3 ja 2.4 pyrkivät erottelemaan kuitupakkauksia. Kuitupakkausten erottaminen tehdään seulalla ennen murskausta. Simulaation mukaan erotettu pahvi on 4.8 % koko jätemassan määrästä. Myös pahvi on hyvää polttoainetta ja sen poistamisella voi olla vaikutusta poltettavan jätteen ominaisuuksiin polton kannalta. Kuvassa 26 on esitetty tapausten 2.3 ja 2.4 materiaalivirrat. Kartonkipakkausten ja kalvomuovien osalta ei ole laskettu erotettujen jakeiden puhtauksia. Kartonkipakkausten erotustehokkuus prosessissa on simulaation mukaan 57 %:a.



Kuva 26 Esimerkkitapausten 2.3 ja 2.4 materiaalivirrat prosentteina.

Taulukoon 10 on kerätty tapauksen kaksi eri skenaarioiden materiaalivirrat. Mädätykseen menevä materiaali lasketaan materiaalihyötykäytöksi, mikäli mädätysjäännös on käyttökelpoista viherrakentamisessa tai vastaavassa toiminnassa. Esimerkkitapauksissa tulee huomioida, että sekajätteen sisältämä lasi on mädätysjäännöksessä ja sieltä erotettavissa hyötykäyttöön. Taulukosta 10 nähdään, että tapauksessa 2.4, joka pyrkii erottelemaan kovat pakkausmuovit, kalvomuovit, pahvin, metallit ja biojätteen, polttoon menee 39,4 % jätteen määrästä. Tällöin mädätys mukaan laskettuna materiaalihyötykäyttöön menee 61 % sekajätteestä. Ilma mädätystä materiaalihyödyntämiseen menee 18,4 % jätteenmäärästä. Palavia materiaaleja materiaalihyödyntämiseen saadaan simulaation mukaan parhaimmillaan 15, %. Metalleja kaikki esitetyt skenaariot poistavat yhtä tehokkaasti.

Taulukko 10 Materiaalivirrat esimerkkitapauksessa 2.

	<i>Tapaus 2.1</i>	<i>Tapaus 2.2</i>	<i>Tapaus 2.3</i>	<i>Tapaus 2.4</i>
Polttoon	49,7	43,7	44,9	39,0
Mädätykseen	42,7	42,7	42,6	42,6
Metallit materiaalihyötykäyttöön	3,4	3,4	3,4	3,4
Palavat materiaalihyötykäyttöön	4,2	10,2	9,1	15
Materiaalihyötykäyttö, myös mädätys	50,4	56,3	55,4	61,0
Materiaalihyötykäyttö, ei mädätystä	7,7	13,6	12,5	18,4

Taulukossa 11 on esitetty kaikkien tapauksen kaksi skenaarioiden erotustehokkuudet ja erotettujen jakeiden puhtaudet, siltä osin kuin ne on laskettu. Taulukosta huomataan, että erotustehokkuudet eivät juurikaan vaihtelee skenaarioiden välillä. Tämän simulaation tuloksista voidaan päätellä, että metallien ja biojätteen erottaminen mekaanisesti onnistuu yleensä hyvin, sen sijaan muovien ja kuitumateriaalien mekaaninen erottaminen on vaikeampaa. Muovien ja kuitumateriaalien keräysasteet jäävät verrattain alhaisiksi. Tulee kuitenkin huomioida, että verrattuna metalleihin, muovien ja kuitupakkausten osalla potentiaali on suuri, sillä muovisia ja pahvisia pakkausmateriaaleja menee sekajätteen joukkoon huomattavasti suurempi määrä kuin metalleja. Erotettujen jakeiden koostumus ja materiaalivirrat jätelajeittain on esitetty liitteessä 8.

Taulukko 11 Tapaus 2 jakeiden erotustehokkuus ja puhtaus.

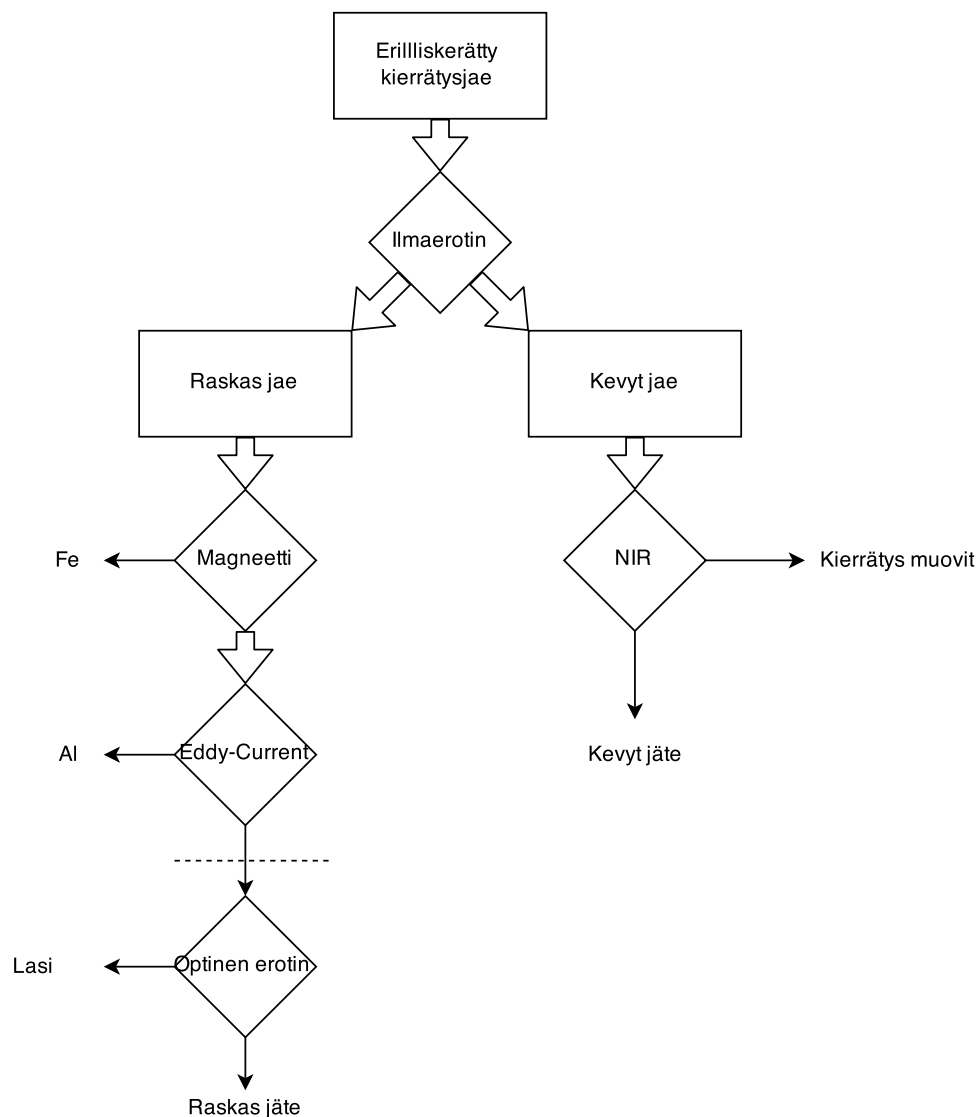
	<u>Fe 2.1</u>	<u>Fe 2.2</u>	<u>Fe 2.3</u>	<u>Fe 2.4</u>
Erotustehokkuus	88,00	88,00	88,00	88,00
Puhtaus	86,28	86,28	86,48	86,48
	<u>Al 2.1</u>	<u>Al 2.2</u>	<u>Al 2.3</u>	<u>Al 2.4</u>
Erotustehokkuus	87,00	87,00	87,00	87,00
Puhtaus	86,59	86,59	86,73	86,73
	<u>Bio 2.1</u>	<u>Bio 2.2</u>	<u>Bio 2.3</u>	<u>Bio 2.4</u>
Erotustehokkuus	90,14	90,14	90,14	90,14
Puhtaus	82,40	82,40	82,59	82,59
	<u>KovaM 2.1</u>	<u>KovaM 2.2</u>	<u>KovaM 2.3</u>	<u>KovaM 2.4</u>
Erotustehokkuus	47,05	47,05	47,05	47,05
Puhtaus	96,46	97,86	96,56	97,97
	<u>Kalvo 2.1</u>	<u>Kalvo 2.2</u>	<u>Kalvo 2.3</u>	<u>Kalvo 2.4</u>
Erotustehokkuus	0,00	74,38	0,00	74,38
Puhtaus	0,00	-	0,00	-
	<u>Pahvi 2.1</u>	<u>Pahvi 2.2</u>	<u>Pahvi 2.3</u>	<u>Pahvi 2.4</u>
Erotustehokkuus	0,00	0,00	57,00	57,00
Puhtaus	0,00	0,00	-	-

5.4 Erilliskerätty kierrätysjäte

Mekaanisella erottelulla on vaikeaa saada yksittäisiä kierrätettäviä jakeita erilleen sekajätteestä. Erotetut jakeet eivät välttämättä ole riittävän puhtaita jatkokäyttöä ajatellen. Sen sijaan mekaaniset erottelumenetelmät sopivat hyvin jakamaan jätteen kahteen jakeeseen ominaisuuksiensa mukaan. Kun mekaanisen prosessin lähtömateriaali on koostumukseltaan selkeää, erotustehokkuudet ovat korkeita. Erilliskerätystä kierrätettävästä jätteestä saadaan mekaanisesti erotettua kierrätettävät jakeet puhtaammin kuin sekajätteestä.

Kuluttajat ja pienet yritykset kokevat usein kierrättämisen vaikeaksi. Usein kuluttajien ja pienien yritysten ongelmat tiivistyvät kolmeen ydinkysymykseen: rahaan, tilaan ja osaamiseen. Kierrätyksestä ei koeta saatavan taloudellista hyötyä, tiloja jätteiden lajitteluun ei ole ja liian tarkat vaatimukset aiheuttavat vaikeuksia hahmottaa kokonaisuutta. (Roos et al., 2004) Kierrätettävien jätteiden yhdistetty kerääminen kiinteistöittäin voisi tuoda ratkaisun näihin kysymyksiin. Esimerkiksi Belgiassa kerätään yhdistetysti PMC-jatetta, eli muovi-, metalli- ja kartonkipakkauksia ja kyseinen jae erotellaan mekaanisesti (Merta et al., 2012).

Kierrätettävien jakeiden yhdistetty kerääminen helpottaisi logistiikkaa ja ottaisi huomioon kuluttajien kokemat ongelmat. Esimerkiksi muovi, lasi ja metalli voitaisiin kerätä yhdellä kuormalla kiinteistöittäin ja ohjata materiaalinkeräyslaitokselle. Materiaalinkeräyslaitoksella erotettaisiin jakeesta ensin kevyt ja raskas jae ilmaerottimella. Tämän jälkeen raskaasta jakeesta rautametallit magneetilla ja alumiini pyörrevirtaerottimella. Jäljelle jäävä raskas jae olisi pääosin lasia, joka voitaisiin lajitella optisesti joko materiaalinkeräyslaitoksella tai ohjata lasiteollisuudelle jatkokäsitteltäväksi. Ilmaseulan ylitteessä olisi pääosin muovia, joka lajiteltaisiin optisesti. Biojätteen keräily pidettäisiin entisellään ja sekajätteen keräily ja poltto arinalaitoksissa voisi toimia kuten uusimpien investointien mukaan on jo tehty. Kuvassa 27 on esitetty edellä kuvattu käsittelyprosessi. Vaihtoehtoisesti myös kartonki voitaisiin kerätä kierrätysjakeen joukossa, jolloin erotteluketjua tulisi muuttaa.



Kuva 27 Erilliskerätyn kierrätysjakeen käsittelyketju

Edellä esitetyn keräilymenetelmän hyvänä puolena voidaan pitää sen helppoutta kuluttajille. Yhä useammille kiinteistöille oli mahdollista sijoittaa kierrätysjäteastia, kun yhdellä astialla voitaisiin korvata aiemmat lasi-, metalli- ja energiajäteastiat. Kiinteistöjen ja huoneistojen jätehuollon tilantarve ongelma pienenesi, kun astioita ei tarvitsisi olla niin paljon pienissä tiloissa. Tämä mahdollistaisi vaatimuksien tiukentamisen, sillä syntypaikkalajittelu toimii tehokkaimmin niillä kiinteistöillä, joita koskevat tiukimmat vaatimukset. Edellä esitetyn tapauksen mukaan kiinteistöille jäisivät vielä paperin- ja pahvinkeräysastiat. Pahvin yhdistäminen kierrätysjakeeseen voisi olla mahdollista, mutta tässä työssä sitä mallia ei ole laskettu. Tätä järjestelmää kehitettäessä voitaisiin hyödyntää Suomen hyviä kokemuksia biojätteen erilliskeräyksestä, tuottajavastuun nojalla toteutetusta paperinkeräyksestä ja

olemassa olevista alueellisista järjestelmistä. 1.1.2016 päättyy energijätteen keräily pääkaupunkiseudun talouksilta, tässä olisi potentiaalinen koeryhmä edellä esitettyyn kierrätyskokeiluun mikäli löytyisi taho, jolla olisi mahdollisuudet ja tahtotila erottelulinjaston luomiseen.

Ekopiste pilotointi-hankkeessa vuonna 2012 tutkittiin ekopisteiden materiaalivirtoja. Tässä kokeilussa oli mukana myös pakkausmuovin kerääminen. Pirkanmaalla kerättiin kierrätyskelpoista muovijaetta erilliskeräyspisteillä. Jätepisteisiin sai tuoda sekalaista pakkausmuovia. Tutkimuksessa muovia ei kerätty kiinteistökohtaisilla pisteillä. Tässä työssä on hyödynnetty Ekopiste pilotointi-hankkeen tuloksia luomalla niiden mukaan oletettu koostumus kierrätysjakeelle.

Kierrätysjakeen koostumuksena on käytetty seuraavaa:

- muovia 20 %
- lasia 49 %
- rautametalleja 17,3 %
- alumiinia 6,7 %,
- lasin epäpuhtauksia 1 %
- muovien epäpuhtauksia 6 %.

Taulukossa 12 on esitetty erilliskeräyksen nykyinen saanto, teoreettinen maksimisaanto ja oletussaanto, jota on käytetty koostumuksen määrittelyyn. Taulukon tiedot ovat peräisin työstä Pohjois-Suomen pakkausjätteiden hyödyntäminen. Teoreettinen maksimisaanto on johdettu sekajätteen lajittelututkimuksista ja oletussaanto johdettu Ruotsin erilliskeräyksen keskiarvon ja Norbottenin erilliskeräyksen avulla. (Moliis et al., 2012, 16-18)

Taulukko 12 Pakkausmateriaalien saanto

	Nykyinen saanto erilliskeräyksellä kg/as/a	Teoreettinen maksimisaanto kg/as/a	Oletussaanto kg/as/a
Muovi	0,8	25,6	5
Lasi	1,95	6,4	2,7
Metalli	0,8	6,4	2,7

Erilliskerätystä kierrätysjakeesta saadaan edellä esitetyllä mekaanisella järjestelmällä erotettua erittäin hyvin lasi, alumiini ja rauta. Muovijakeen puhtaus saatiin hyväksi, vaikka muovien erottelua vaikeuttaa muovin heterogeeninen koostumus. Muovia kulkeutui jonkin verran ilmaseulan alitteen mukana jätteeksi. Ylitteen käsittelyssä on käytetty samaa muovilaatujen jakaumaa kuin esimerkkitapauksessa kaksi. NIR-erotus muoveille on laskettu niin, että tuleva materiaali on kaikille muovilaaduille sama. Erotettu muovi esitetään muovien kokonaissummana erottelematta muovilaatuja toisistaan. Tapauksen 3 Scilab-koodi on esitetty liitteessä 6.

Taulukossa 12 on esitetty prosessin läpi kulkevat virrat. Erilliskerätystä kierrätysjakeesta saadaan simulaation mukaan talteen 88 % alumiinista puhtausasteen ollessa liki 100 %. Hävinneestä alumiinista kaksi kolmasosaa kulkeutuu jo ilmaerottimelta kevyen jakeen joukkoon päätyen kevyen jakeen jäterejektiin. Rautametalleista talteen saadaan 96 % liki 100 %:n puhtausasteella. Suurin osa kadonneesta rautametallista joutuu myös kevyen jakeen jäterejektiin. Simulaatiossa käytettyjen arvojen mukaan lasi päättyy kokonaisuudessaan raskaaseen rejektiin. Mallissa on oletettu, että raskaan jakeen optinen erotus poistaa vain lasia 93 %:n tehokkuudella. Loppuosa lasista joutuu raskaan jakeen jäterejektiin. Mikäli raskasta jätettä ei lajiteltaisi optisesti vaan ohjattaisiin jae suoraan pyörrevirtaerottimen jälkeen lasiteollisuudelle, olisi toimitettavan jakeen puhtaus 89 % ja suurimpana haitta-aineena muovit ja muovien epäpuhtaudet. Suurin hävikki tulee pakkausmuoveissa. Pakkausmuoveista talteen saadaan simulaation mukaan 82 %. Suurin osa väärään jakeeseen menevästä pakkausmuovista kulkeutuu ilmaerottimelta raskaan jakeen joukkoon, josta osa mallin mukaan menee raskaan jakeen jäterejektiin. NIR-erottimen läpi mennyt pakkausmuovijäte oli liki 100 % pakkausmuovia. Yksittäisten muovilaatujen puhtaus NIR erotuksessa on yleensä 90 - 99 % mutta suurimpana haitta-aineena ovat yleensä muut muovityypit. Tässä työssä puhtautta ei raportoida yksittäisten muovilaatujen tarkkuudella, sillä käytetty pakkausmuovin koostumus ja laskennassa tehdyt oletukset aiheuttavat virhemarginaalia laskentaa, joten liian tarkka raportointi ei ole järkevää.

Taulukko 13 Erilliskerätyn kierrätysjakeen jakautuminen käsittelyn aikana.

Lähtömateriaali	Alkup. Koostumus %	Kerätty muovi %	Kerätty Al %	Kerätty Fe %	Kerätty lasi %	Raskas jäte %	Kevyt jäte %
Muovi	20	16,32	0,02	0,00	0,00	2,98	0,68
Lasi	49	0,00	0,00	0,00	45,57	3,43	0,00
Metalli Fe	17	0,00	0,00	16,61	0,00	0,34	0,34
Metalli Al	7	0,01	5,91	0,00	0,00	0,18	0,60
Lasin epäpuhtaudet	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,66
Muovin epäpuhtaudet	6	0,01	0,01	0,01	0,00	2,02	3,95
SUMMA	100	16,34	5,94	16,63	45,57	9,29	6,23

5.5 Esimerkkitapausten laskennallinen energiankulutus

Esimerkkitapausten energiankulutus on laskettu luvussa 3.6 esitettyä taulukkoa 6 hyödyntäen. Eniten energiaa kuluttava vaihe on murskaus. Esimerkkitapauksissa on käytetty vasaramurskainta, jonka käyttö aiheuttaa pääosan koko erotteluketjun energiankulutuksesta. Esimerkkitapauksissa 1.1-2.2 koko jätemassa murskataan vasaramurskaimella ennen rumpuseulaa. Tapauksissa 2.3 ja 2.4 vasaramurskain on sijoitettu rumpuseulan ja kartonginerotusseulan jälkeen ennen ballistista erotinta. Tämä näkyy koko ketjun energiankulutuksessa, sillä näissä tapauksessa murskaimelle tulee merkittävästi vähemmän jätettä. Film-Vacuum-erottelun lisääminen vaikuttaa kokonaisenergian kulutukseen vain vähän. Tapaus 3:n energiankulutus on pieni verrattuna muihin erotteluprosesseihin. Merkittävänä syynä siihen on murskauksen puute. Laskelmassa ei ole huomioitu mahdollista paalausta, joka nostaa käsittelyn energiankulutusta. Taulukkoon 14 on kerätty tämän työn esimerkkiprosessien laskennalliset energiankulutukset sekä Loimi-Hämeen jätehuollon REF-linjan keskimääräinen energiankulutus. Loimi-Hämeen jätehuollon REF-laitoksen energiankulutus on vaihdellut 49 kWh/t ja 68 kWh/t välillä ollen keskimäärin 55 kWh/t (LHJ Group, 2011). Loimi-Hämeen jätehuollon REF-laitos koostuu esimurskaimesta, pussinrepijystä, täryseulasta, magneetista, repivästä murskaimesta, rumpuseulasta, toisesta magneetista, rumpuseulasta, tuuliseulasta, kolmannesta magneetista ja pyörrevirtaerottimesta

(Ajanko et al., 2005). Energiankulutuksen osalta esimerkkitapaukset ovat samalla tasolla Loimi-Hämeen REF-laitokset kanssa.

Taulukko 14 Esimerkkitapausten laskennallinen energiankulutus

	kWh/t _{jätettä}
Tapaus 1.1	53,6
Tapaus 1.2	53
Tapaus 2.1	57,7
Tapaus 2.2	58,1
Tapaus 2.3	36,1
Tapaus 2.4	36,4
Tapaus 3	7,2
Loimi-Hämeen REF-Laitos	55

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Jätehuollon kehittämisessä tärkeänä näkökohtana on jätteen hyötykäyttö. EU:n jätehierarkian mukaan syntyneet jätteet tulisi ensisijaisesti hyödyntää materiaalina ja toissijaisesti energiana. Jätteen energiahyötykäyttö on lisääntynyt Suomessa ja sen myötä jätteen hyötykäyttöaste on hyvä, mutta Suomi ei täytä sille asettuja kierrätysvelvoitteita nykyisillä toimintatavoilla. Tämän työn tavoitteena oli tarkastella mahdollisia teknisiä ratkaisuja, joilla yhdyskuntajätteen kierrättämistä voitaisiin tehostaa.

Syntypaikkalajittelun osalta voidaan todeta, että mitä helpommaksi ja edullisemmaksi kulluttajille se on tehty, sitä paremmin se toimii. Biojätteen laskennallinen erotustehokkuus syntypaikkalajittelulla jäi 44 %:iin. Eräänä syynä siihen on, että biojätteen kiinteistökohtaiset keräysvaatimukset eivät koske kaikkia kiinteistöjä. Niilläkin alueilla, joissa keräysvelvoite on laaja, on sekajätteestä yli 10 % biojätettä. Laskennallinen biojätteen erotustehokkuus tämän työn esimerkkitapauksissa vaihteli 83 - 90 %:n välillä. Puhtaus mekaanisesti erotetulla biojätteellä on laskelmien mukaan 80 - 88 %:a. Biojätteen joukkoon mekaanisessa erottelussa päätyy muun muassa kiviä, lasia ja muovinkappaleita. Epäpuhtauksien määrä vaikeuttaa mädätysprosessia ja mädätysjäännöksen hyötykäyttöä. Kivet, lasi ja muut rasakat materiaalit saadaan erotettua mädätysjäännöksestä painovoimaisesti mutta muovien osalta tulisi pyrkiä tarkempaan erotteluun ennen mädätysprosessia.

Metallien osalta syntypaikkalajittelulla saadaan talteen 75 %:a metalleista. Metallien osalta syntypaikkalajittelulla saavutetaan kohtuullisen hyvä kierrätysaste. Tulee kuitenkin huomioda, että metallia kierrätykseen tulee paljon muistakin lähteistä kuin kotitalouksista. Mekaanisten erotteluketjujen osalta raudan kierrätysasteeksi saatiin 56-88 %:a riippuen siitä, kulkivatko kaikki materiaalivirrat magneettierottimien kautta. Esimerkkitapausten ei- rautametallit erotettiin 51-87 % :in tehokkuudella, riippuen tässäkin tapauksessa siitä ajetaan kaikki materiaalivirrat pyörrevirtaerottimien läpi.

Lasista syntypaikkalajittelulla saadaan talteen 49 %. Tämän työn esimerkeissä lasia ei kerätty erikseen käsittelyprosessin aikana, sillä lasin optinen erottaminen on kallista sekä on-

nistuminen epävarmaa kun jäte on likaista. Laskelmien mukaan murskatusta sekajätteestä peräisin oleva lasi päätyy seula-alitteiden mukana mädättämölle. Mädätysjäännöksestä lasi voitaisiin erotella hyötykäyttöön.

Pahvin ja paperin osalta syntypaikkalajittelu on tehokkaampaa kuin mekaaninen erottelu, sillä syntypaikkalajittelun erotustehokkuus pahville ja paperille on 61 %. Tässäkin on parantamisen varaa. Mekaanisella erotuksella saadaan simulaatiossa laskennallisesti erotettua 57 % pahvista mutta ei lainkaan paperia. Kuitumateriaalien osalta mekaanisen erottamisen ongelmaksi muodostuu materiaalin kastuminen ja likaantuminen, joka heikentää sen hyötykäyttömahdollisuuksia. Pahvin ja paperin kierrätyksen kohdalla tulisi miettiä keinoja tehostaa syntypaikkalajittelua entisestään.

Toinen mekaanisesti vaikeasti eroteltava materiaalityyppi ovat muovit. Muovit ovat heterogeeninen materiaalityyppi, joiden erottaminen tiheyden mukaan pahvista ja paperista on vaikeaa. Muovityyppejä on useita ja ne käyttäytyvät eri tavoin. Lisäksi osa muoveista, kuten PVC ja sekoitemuovit, ei ole kierrätyskelpoisia. Syntypaikkalajittelun osalta erotustehokkuus on nykyään noin 13 %. Suurin osa kierrätetystä muovista on kaupan ja teollisuuden pakkauksia. Sekalaisesta yhdyskuntajätteestä muovien erottaminen on vaikeaa, mutta ei mahdotonta. Kalvomaisten muovien osalta parhaaseen erotustehokkuuteen on päästy tehostetulla käsinlajittelulla ja kovien pakkausmuovien osalta optisiin menetelmiin perustuvalla erottelulla. Parhaimmillaan tämän työn esimerkkilaskelmissa kovamuovisista pakkauksista saatiin erilleen 47 % ja kalvomuovisista käsinlajittelulla 74 %. Vaikka erotetut prosentiosuudet ovat pieniä, muovien osalta puhutaan kuitenkin merkittävistä massavirroista, sillä pakkausmuovien osuus sekajätteestä on noin 16 %:a. Muovien kierrätyksen osalta tulisi kuitenkin kehittää erilliskeräyksen toimivuutta tai yhdistetyn erilliskeräysjärjestelmän luomista, kuten esimerkkitapauksessa 3 on esitetty. Tämänkaltaisia menetelmiä on käytössä muualla Euroopassa.

Biojätteen mekaaninen erottaminen sekajätteestä perustuu seulojen käyttöön. Tämän työn esimerkeissä biojäte erotetaan rumpuseulalla ja ballistisen erottimen seulaverkolla. Seuloilla saadaan biojäte hyvin erilleen, mutta sekaan menee lasia, kiveä, pieniä metallikappaleita ja kovamuovikappaleita. Metallit seula-alitteesta saadaan erotettua magneeteilla ja pyörrevirtaerottimilla. Lasi, kivet ja muovi sen sijaan menevät mädätysjäännökseen. Kartongin erottamiseen suunnitellulla kiekko-seulalla voidaan erottaa pahvia sekajätteen joukosta,

mutta erotetun jakeen puhtauden ja hyötykäyttöpotentiaalin arviointi on vaikeaa pelkästään yleisesti jaossa olevien tietojen perusteella.

Metallien erottamiseen käytetään erilaisia magneetteja ja pyörrevirtaerottimia. Molemmat ovat pitkän aikaa käytössä olleita ja jo hyviksi havaittuja menetelmiä, joiden toimivuuteen voidaan vaikuttaa ennen kaikkea eroteltavan jätteen esikäsittelyllä. Ballistiset erottimet ja ilmaerottimet jakavat jätteen kahteen tai joissakin tapauksissa kolmeen jakeeseen, jotka eroavat toisistaan tiheydensä ja aerodynaamisten ominaisuuksiensa mukaan. Ilmaerotinta ja ballistista erotinta käytetään jakamaan jätevirta jatkokäsittelyä varten. Jos tavoitteena on materiaalinkierrätys, ei näillä saada erilleen suoraan kierrätettävää jätettä, mutta polttoaineen valmistuksessa nämä voivat olla viimeisenä vaiheena.

Muovityyppien erottamiseen on suunniteltu monia menetelmiä, mutta useat niistä vaativat jo lähtömateriaalin olevan puhdasta muovijätettä tai muuten hyvin tasalaatuista. Optisista menetelmistä NIR-erotusta voidaan käyttää myös erottelemaan muovisia sekajätteen joukosta, vaikka myös sen ongelmaksi muodostuu eroteltavien jakeiden likaisuus ja tämän myötä erotustehokkuuden lasku. NIR-erotusta voidaan käyttää myös kuitumateriaalien erotukseen.

Lupaavia menetelmiä jätteiden mekaaniseen erotteluun on kehitteillä. Eräs lupaavimmista menetelmistä erottaa palava ja ei-palava jäte toisistaan on leijupetierotin, jolla on saatu laboratorioluokan kokeissa ilmaerotusta parempia tuloksia. Lisäksi mädätysjätteen käsittely RecGlass-menetelmällä kierrätyslasin erottamiseksi voi nostaa lasin kierrätysastetta. Erilaiset sähköstaattiset menetelmät ovat toimivia tasalaatuisten jakeiden erottamiseen, mutta sekajätteen erotteluun käytettäessä ne vaatisivat muita menetelmiä enemmän esikäsittelyä.

Taulukkoon 15 on kerätty tässä työssä lasketut syntypaikkalajittelun erotustehokkuudet ja esimerkkitapauksen 2.4 erotustehokkuudet. Vertaamalla näitä laskennallisia tuloksia huomataan, että mekaanisella erottelulla voidaan saada biojäte ja metallit erotettua syntypaikkalajittelua tehokkaammin sekajätteestä. Lasin ja kuitumateriaalien osalta syntypaikkalajittelu on mekaanista erottelua tehokkaampaa. Muovien osalta menetelmien tehokkuuden arvioiminen on näiden tietojen pohjalta epävarmaa. Taulukon mukaan näyttää, että muovien erotustehokkuutta voitaisiin parantaa merkittävästi mekaanisella lajittelulla. Toisaalta

tulee huomioida, että kotitalouksilla ei ole ollut merkittäviä mahdollisuuksia muovien syntypaikkalajitteluun, joten parantamalla muovien syntypaikkalajittelun mahdollisuuksia voitaisiin sillä päästä muovien osalta lähes samaan tasoon lasin syntypaikkalajittelun kanssa.

Taulukko 15 Syntypaikkalajittelun ja mekaanisen erottelun erotustehokkuusvertailu.

	Syntypaikkalajittelun erotustehokkuus %	Esimerkkitapaus 2.4 mukainen erotustehokkuus %
Biojäte	44	90
Metalli	75	88
Lasi	48	-
Muovi	12	47 (kovat) / 74 (kalvo)
Paperi	60	-
Pahvi	60	57

Taulukossa 16 on esitetty laskennallinen kierrätysaste, johon olisi mahdollista päästä mikäli kaikki syntypaikkalajiteltu sekajäte Suomessa ohjattaisiin esimerkkien 2.1-2.4 mukaisiin lajittelulaitoksiin. Kierrätysastelaskelmat olettavat, että erilliskerättävät jakeet pysyvät ennallaan. Syntypaikkalajittelun yhdistäminen mekaaniseen kierrätyslaitokseen nostaisi biojätteen ja metallien osalta kierrätysasteen todella korkealle, yli 90 %:iin. Muovien osalta kierrätysaste nousisi tilanteessa, jossa olisi mukana kalvomaisten muovien erottaminen 63 %:iin. Ilman kalvomaisten muovien erottamista päästäisiin 32 % kierrätysasteeseen kun yhdistetään nykyinen muovin syntypaikkalajittelu ja kovien pakkausmuovien mekaaninen erottaminen. Pahvin mekaanisella erottamisella olisi noin 10 % vaikutus pahvin ja paperin kierrätysasteeseen.

Taulukko 16 Laskennallinen kierrätysaste

Kierrätysaste, kun kaikki sekajäte ohjataan mekaaniseen erotteluun	Tapaus 2.1	Tapaus 2.2	Tapaus 2.3	Tapaus 2.4
Bio	94	94	94	94
Metalli	97	97	97	97
Muovi	32	61	32	61
Pahvi+ paperi	61	61	72	72

Tapauksen 1.1 mukaisella mekaanisella laitoksella saataisiin biojätteen kierrätysaste nostettu 90 %:iin ja metallien kierrätysaste 95 %, tapauksessa 1.2 biojätteen kierrätysaste pysyisi samana kuin tapauksessa 1.1 mutta metallien kierrätysaste jäisi 87 %:in. Film Vacuum-menetelmän avulla saataisiin muovin kierrätysaste nostettua parhaimmillaan 38 %:iin

Lasin, muovien ja kartongin erottamisen suhteen tulisi kiinnittää lisähuomiota syntypaikkalajittelujärjestelmien kehittämiseen. Mekaanisen erottamisen ja syntypaikkalajittelun yhdistäminen tuntuu erotustehokkuuden kannalta optimaaliselta vaihtoehdolta, mikäli se saadaan tehtyä sekä taloudellisesti järkeväksi, että kuluttajille helpoksi. Muovinkeräyksen yhdistäminen jo olemassa olevaan lasin ja metallinkeräykseen voisi olla kestävä ratkaisu muovin kierrätysasteen nostamiseksi.

LÄHTEET

- 2008/98/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 19.11.2008 jätteistä ja tiettyjen direktiivien kumoamisesta EYVL N:o L312, 22.11.2008
- Ajanko, S., Moilanen, A., Juvonen, J., 2005. Jätteiden syntypaikkalajittelujärjestelmän ja käsittelytekniikan vaikutus kierrätyspolttoaineen laatuun. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT, tiedotteita 2317.) ISBN 915-38-6753-6
- Allegrini, E., Maresca, A., Olsson, M.E., Holtze, M.S., Boldrin, A., Astrup, T.F., 2014. Quantification of the resource recovery potential of municipal solid waste incineration bottom ashes. *Waste Manag.* 34, 1627–1636. doi:10.1016/j.wasman.2014.05.003
- Anderson, R., Poliakova, V. 2015. Tutkittua tietoa sekajätteen muoveista. *Uusiuutiset*. 4/2015.
- Beunder, E.M., van Olst, K.A., Rem, P.C., 2002. Shape separation on a rotating cone. *Int. J. Miner. Process.* 67, 145–160.
- Caputo, A.C., Pelagagge, P.M., 2002. RDF production plants: I Design and costs. *Appl. Therm. Eng.* 22, 423–437.
- Coelho, A., Brito, J. de, 2013. Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part I: Energy consumption and CO2 emissions. *Waste Manag.* 33, 1258–1267. doi:10.1016/j.wasman.2013.01.025
- De Araújo Morais, J., Ducom, G., Achour, F., Rouez, M., Bayard, R., 2008. Mass balance to assess the efficiency of a mechanical–biological treatment. *Waste Manag.* 28, 1791–1800. doi:10.1016/j.wasman.2007.09.002
- De Boom, A., Degrez, M., Hubaux, P., Lucion, C., 2011. MSWI boiler fly ashes: Magnetic separation for material recovery. *Waste Manag.* 31, 1505–1513. doi:10.1016/j.wasman.2011.01.002
- Delgado, C., Stenmark, Å., 2005. Tecnological reference paper on recycling plastics. [verkkodokumentti] [viitattu 20.5.2015] saatavissa

http://s3.amazonaws.com/zanran_storage/www.wastexchange.co.uk/ContentPages/42718187.pdf

Dias, N., Teresa Carvalho, M., Pina, P., 2012. Characterization of Mechanical Biological Treatment reject aiming at packaging glass recovery for recycling. *Miner. Eng.* 29, 72–76. doi:10.1016/j.mineng.2011.10.004

Diaz, L.F., Savage, G.M., Eggerth, L.L., Rosenberg, L., Diaz, L.F., UNEP International Environmental Technology Centre., CalRecovery, I., 2005. Solid waste management. United Nations Environment Programme, Paris.

Dodbiba, G., Fujita, T., 2004. Progress in Separating Plastic Materials for Recycling. *Phys. Sep. Sci. Eng.* 13, 165–182. doi:10.1080/14786470412331326350

Dodbiba, G., Shibayama, A., Miyazaki, T., Fujita, T., 2003. Separation Performance of PVC and PP Plastic Mixture Using Air Table. *Phys. Sep. Sci. Eng.* 12, 71–86. doi:10.1080/1478647031000139385

Ekholm, E., Korkala, R., Nummela, E., 2005. REF-laitosten tarve- ja toimivuusselvitys. Raportti, Jätelaitosyhdistys, [verkkodokumentti] [viitattu 20.5.2015] Saatavissa http://www.jly.fi/REF-laitosselvitys_loppuraportti.pdf

Ekopistepilotointi, 2012. Loppuraportti [verkkodokumentti] [viitattu 20.5.2015] saatavissa <http://www.pyr.fi/ekopistepilotti-raportti.pdf>

Etelä-Karjalan Jätehuoltomääräykset, 2014. [verkkodokumentti] päivitetty 20.10.2014 [viitattu 20.5. 2015] saatavissa http://www.ekjh.fi/Dokumentit/Jh_maaraykset/jh-maaraykset2015.pdf

Gente, V., La Marca, F., Lucci, F., Massacci, P., 2003. Electrical separation of plastics coming from special waste. *Waste Manag.* 23, 951–958. doi:10.1016/S0956-053X(03)00088-6

Haig, S., Morrish, L., Morton, R., Wilkinson, S., 2012. Film reprocessing technologies and collection shemes (Final Raport). [verkkodokumentti] [viitattu 20.5.2015] saatavissa <http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Film%20reprocessing%20technologies%20and%20collection%20schemes.pdf>

- Hakola, P., 2013. Tekstiilikierrätys Suomessa, Yritysten asenteet ja teot tekstiilikierrätyksessä, [verkkojulkaisu] Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö, Hämeen Ammattikorkeakoulu, Forssa. Saatavissa http://www.poistotekstiilit.fi/DowebEasyCMS/sivusto/Dokumentit/Tekstiilikierr%C3%A4tys%20Suomessa_Piritta%20Hakola.pdf
- Hansen, T.L., Jansen, J. la C., Davidsson, Å., Christensen, T.H., 2006. Effects of pre-treatment technologies on quantity and quality of source-sorted municipal organic waste for biogas recovery. *Waste Manag.* 27, 398–405. doi:10.1016/j.wasman.2006.02.014
- Hearn, G.L., Ballard, J.R., 2005. The use of electrostatic techniques for the identification and sorting of waste packaging materials. *Resour. Conserv. Recycl.* 44, 91–98. doi:10.1016/j.resconrec.2004.08.001
- Heino, A., 2012. Kierrätyspolttoaine markkinat Euroopassa. [verkkodokumentti] Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, [viitattu 20.5.2015]. Diplomityö. Saatavissa https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/77194/AnniHeino_Diplomity%C3%B6_7.5.2012.PDF?sequence=1
- Ionescu, G., Rada, E.C., Ragazzi, M., Mărculescu, C., Badea, A., Apostol, T., 2013. Integrated municipal solid waste scenario model using advanced pretreatment and waste to energy processes. *Energy Convers. Manag.* 76, 1083–1092. doi:10.1016/j.enconman.2013.08.049
- Jätelaitosyhdistys a. Alueelliset jätelaitokset. [verkkodokumentti][Viitattu 16.1.2015] Saatavissa <http://www.jly.fi/jly2.php?treeviewid=tree1&nodeid=2>
- Jätelaitosyhdistys b. Energiahyödyntäminen Suomessa. [verkkodokumentti] [Viitattu 5.5.2015] Saatavissa <http://www.jly.fi/energia5.php?treeviewid=tree3&nodeid=5>
- Jätelaitosyhdistys c. Hyödyntäminen. [verkkodokumentti] [Viitattu 5.5.2015]. Saatavissa <http://www.jly.fi/jateh4.php?treeviewid=tree2&nodeid=4>
- Jätehuoltomääräykset HSY, 2012. [verkkodokumentti] päivitetty 2012 [viitattu 20.5.2015]. Saatavissa <https://www.hsy.fi/sites/Esitteet/EsitteetKatalogi/Jatehuoltomaaraykset2012.pdf>

- Jujun, R., Yiming, Q., Zhenming, X., 2014. Environment-friendly technology for recovering nonferrous metals from e-waste: Eddy current separation. *Resour. Conserv. Recycl.* 87, 109–116. doi:10.1016/j.resconrec.2014.03.017
- Komptech, 2014. Ballistor, Stationaty Ballistic separator. [verkkodokumentti] päivitetty 1.12.2014, [viitattu 5.5.2015] Saatavissa <http://komptechamericas.com/wp-content/uploads/2014/12/1-Ballistor-Brochure.pdf>
- L 6.6.2014/410. Laki jätelain muuttamisesta.
- Lahtienergia, Kymijärvi-ii-voimalaitos, [verkkodokumentti] [viitattu 9.3.2015] Saatavissa <http://www.lahtienergia.fi/lahti-energia/energian-tuotanto/kymijaervi-ii-voimalaitos>
- Lau, S.T., Cheung, W.H., Kwong, C.K., Wan, C.P., Choy, K.K.H., Leung, C.C., Porter, J.F., Hui, C.W., Mc Kay, G., 2005. Removal of batteries from solid waste using trommel separation. *Waste Manag.* 25, 1004–1012. doi:10.1016/j.wasman.2005.04.009
- Lee, S.-J., Cho, H.-C., 2006. Optimum Design of RDF Processing System Using RFTF Method. *Geosystem Eng.* 9, 15–20.
- LHJ Group, 2010. Vuosiraportti ja ympäristöselonteko 2009. [verkkodokumentti] [viitattu 20.5.2015] saatavissa http://www.lhj.fi/UserFiles/lhj/File/Aineistopankki/Raportit/LHJ_Raportti09.pdf
- Machinex, 2014, Esite, [verkkodokumentti] [viitattu 20.5.2015] Saatavissa http://www.machinexrecycling.com/images/stories/VD-5218_Brochure_Sparateur-ANG-LR.pdf
- Merta, E., Mroueh, U.-M., Meinander, M., Punkkinen, H., Vähä-Nissi, M., Kortet, S., 2012. Muovipakkausten kierrätyksen edistäminen Suomessa. (TEM raportteja 11/2012).[verkkodokumentti] Työ- ja elinkeinoministeriö, [viitattu 20.5.2015] Saatavissa http://www.tem.fi/files/32830/11_2012_muovipakkausten_kierrätyksen_edistäminen_suomessa.pdf
- Moliis, K., Dahlbo, H., Retkin, R., Myllymaa, T., 2012. Pohjois-Suomen pakkausjätteiden hyödyntäminen. Ympäristöministeriön raportteja 26/2012, Ympäristöministeriö, Ympäristönsuojeluosasto, Helsinki, ISBN 978-952-11-4118-8.

- Morrish, L., Morton, R., Myles, N., Wilkinson, S., 2010. Near Infrared sorting of household plastic packaging. [verkkodokumentti] [viitattu 20.5.2015] saatavissa <http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/NIR%20Good%20practice%20guidance%20for%20existing%20NIR%20users%20>
- Nasrullah, M., Vainikka, P., Hannula, J., Hurme, M., Kärki, J., 2015. Mass, energy and material balances of SRF production process. Part 3: Solid recovered fuel produced from municipal solid waste. Waste Manag. Res. 0734242X14563375.
- Nilmara Dias, Carvalho, M.T., 2012. Novel Equipment to Separate contaminant from Glass Cullet. [verkkodokumentti] CERENA, instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Portugal, [viitattu 20.5.2015] Saatavissa http://www.researchgate.net/profile/Nilmara_Dias/publication/260246428_Novel_equipment_to_separate_contaminant
- Ojala, J., 2014. Sekajätteestä erotetun kuitufraktion laatuominaisuuksien tutkimus ja hyödyntämispotentiaalin selvitys. Oulun Yliopisto, Kansainvälinen vihreän kemian ja biotuotannon koulutusohjelma. Diplomityö.
- Partanen, E., 2010. Määtysjäätöksen tuotteistamismahdollisuudet Kymenlaaksossa. [verkkodokumentti] Lappeenranta teknillinen yliopisto. Diplomityö, [Viitattu] Saatavissa https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/66351/EsaPartanen_madatys_jaantos_diplomityo2010_LutPub.pdf
- Pfister, K., 2013. Ehdotus valtioneuvostonasetukseksi kaatopaikoista. [verkkodokumentti] Muistio, [viitattu 20.5.2015]. Saatavissa
- Pirkanmaan ELY-keskus, 2014. |Ymparisto |Pakkausten tuottajavastuu| [verkkodokumentti]. [Viitattu 16.1.2015] Saatavissa http://www.ymparisto.fi/fiFI/Kultus_ja_tuotanto/Jatteen_ja_jatehuolto/Tuottajavastuu/Pakkaukset
- Pirkanmaan ELY-keskus, 2013. |Ymparisto |Keräyspaperitilastot| [verkkodokumentti] [Viitattu 16.1.2015] saatavissa http://www.ymparisto.fi/fiFI/Kartat_ja_tilastot/Jatetilastot/-Tuottajavastuun_tilastot/Keräyspaperitilastot

- Plastic Europe, 2010. Plastics-the facts 2010, [verkkodokumentti] [viitattu 20.5.2015]
 Saatavissa <http://www.plasticseurope.org/document/plastics---the-facts-2010.aspx?FolID=2>
- Pöyry, 2012. Selvitys jätteen energiakäytöstä ja päästökaupasta. (Raportti 52A16339)
 Työ- ja elinkeinoministeriö. [verkkodokumentti] [viitattu 20.5.2015] saatavissa
http://www.tem.fi/files/33506/Selvitys_jatteen_eneriakaytosta_ja_paastokaupasta_25.6.2012.pdf
- Pressley, P.N., Levis, J.W., Damgaard, A., Barlaz, M.A., DeCarolus, J.F., 2015. Analysis of material recovery facilities for use in life-cycle assessment. *Waste Manag.* 35, 307–317. doi:10.1016/j.wasman.2014.09.012
- Pulkkinen, S. 2013. Pääkaupunkiseudun kotitalouksien sekajätteen määrä ja laatu vuonna 2012, HSY:n julkaisuja. (no. 2/2012) [verkkodokumentti] saatavissa
http://www.jly.fi/2_2013_pks_kotitalouksien_sekajatteen_maaja_ja_laatu_lr.pdf
- Romero-Güiza, M.S., Peces, M., Astals, S., Benavent, J., Valls, J., Mata-Alvarez, J., 2014. Implementation of a prototypal optical sorter as core of the new pre-treatment configuration of a mechanical–biological treatment plant treating OFMSW through anaerobic digestion. *Appl. Energy* 135, 63–70. doi:10.1016/j.apenergy.2014.08.077
- Roos, I., Kojo, R., Sillanpää, L., 2004. Kerrostalon jätehuolto asukkaan näkökulmasta kehittämisen perusteita (No. 12), [verkkodokumentti] Työtehoseuran raportteja ja ohjeita. [viitattu 20.5.2015]. Saatavissa <http://www.tts.fi/tts/julkaisut/files/tr12.pdf>
- Rotter, V.S., Kost, T., Winkler, J., Bilitewski, B., 2004. Material flow analysis of RDF-production processes. *Waste Manag.* 24, 1005–1021. doi:10.1016/j.wasman.2004.07.015
- Ruan, J., Li, J., Xu, Z., 2011. An environmental friendly recovery production line of waste toner cartridges. *J. Hazard. Mater.* 185, 696–702. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.09.074
- Ruan, J., Xu, Z., 2011. Environmental friendly automated line for recovering the cabinet of waste refrigerator. *Waste Manag.* 31, 2319–2326. doi:10.1016/j.wasman.2011.06.004

- Sahimaa, O., 2014. Lajitteluohje sekajätteen koostumustutkimuksiin. [verkkodokumentti] Aalto Yliopisto. Yhdyskunta ja ympäristötekniikan laitos, Diplomityö, [viitattu 20.5.2015]. Saatavissa http://www.jly.fi/diplomityo_Olli_Sahimaa.pdf
- Savage, G.M., Diaz, L.F., Goldstein, N., 2005. A compost screening primer. *BioCycle* 2005.
- Sekito, T., Matsuto, T., Tanaka, N., 2006. Application of a gas–solid fluidized bed separator for shredded municipal bulky solid waste separation. *Waste Manag.* 26, 1422–1429. doi:10.1016/j.wasman.2005.10.015
- Shapiro, M., Galperin, V., 2005. Air classification of solid particles: a review. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 44, 279–285. doi:10.1016/j.cep.2004.02.022
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S.A., 1993. Integrated solid waste management: engineering principles and management issues. McGraw-Hill, New York.
- Teirasvuo, N., 2011. Syntypaikkalajittelun sekajätteen koostumuksen sekä palamistekniik-
ten ominaisuuksien selvitys Etelä-Karjalan alueella. [verkkodokumentti]. Lappeenran-
nan teknillinen yliopisto, teknillinen tiedekunta. Diplomityö [viitattu 20.5.2015].
Saatavissa <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/69663/nbnfi-fe201104291476.pdf?sequence=3>
- Tilastokeskus, 2013. Jätetilasto, Julkaisematon aineisto. Sähköposti Juha Espo 4.9.2013.
- Tilmatine, A., Medles, K., Bendimerad, S.-E., Boukholda, F., Dascalescu, L., 2009. Elec-
trostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plas-
tic/plastic mixtures. *Waste Manag.* 29, 228–232. doi:10.1016/j.wasman.2008.06.008
- United States., Environmental Protection Agency., Office of Solid Waste and Emergency
Response., 1994. Composting: yard and municipal solid waste. Technomic Pub. Co. ;
U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Re-
sponse, Lancaster, Pa.; [Washington, D.C.
- VNA 14.2.2013/151. Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta.
- VNA 27.6.2013/526. Valtioneuvoston asetus juomapakkausten palautusjärjestelmästä.

VNA 2.5.2013/331. Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista.

VNA 27.6.2013/528. Valtioneuvoston asetus keräyspaperin erilliskeräyksestä.

VNA 3.7.2014/518. Valtioneuvoston asetus pakkauksista ja pakkausjätteistä,

VNA 5.7.2014/519. Valtioneuvoston asetus sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta.

Velis, C.A., Longhurst, P.J., Drew, G.H., Smith, R., Pollard, S.J.T., 2010. Production and Quality Assurance of Solid Recovered Fuels Using Mechanical—Biological Treatment (MBT) of Waste: A Comprehensive Assessment. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 40, 979–1105. doi:10.1080/10643380802586980

Wu, G., Li, J., Xu, Z., 2013. Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review. *Waste Manag.* 33, 585–597. doi:10.1016/j.wasman.2012.10.014

Yle, 2014a. “Emme halua nähdä yhtään tölkkiä sekajätteessä” – 40 miljoonaa pantitonta palautuu kierrätykseen | Yle Uutiset | yle.fi, [verkkodokumentti]. [viitattu 20.5.2015] Saatavissa http://yle.fi/uutiset/emme_halua_nahda_yhtaan_tolkkia_sekajatteessa__40_miljoonaa_pantitonta_palautuu_kierratykseen/7463140.

Yle, 2014b. ”Uusi jätteenpolttolaitos rakennetaan Saloon” - Lounais-Suomen jäterallikeskittyy | yle Uutiset | yle.fi [verkkodokumentti] [viitattu 5.5.2015] Saatavissa http://yle.fi/uutiset/uusi_jatteenpolttolaitos_rakennetaan_saloon_-_lounais-suomen_jateralli_keskittyy/7588996.

Ympäristöministeriö, 2014. Valtioneuvoston kirjelmä eduskunnalle ehdotuksesta Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviksi (jätedirektiiviin muuttaminen). [verkko dokumentti] [viitattu 20.5.2015] Saatavissa https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/Kirjelma/Documents/u_36+2014.pdf

Zaman, A.U., 2010. Comparative study of municipal solid waste treatment technologies using life cycle assessment method. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 7, 225–234.

ZenRobotics, 2014. Advanced-robotics, [ZenRobotics www-sivut] [viitattu 17.4.2015] Saatavissa <http://zenrobotics.com/advanced-robotics/case-zenrobotics-recycler>.

Suomalaisen sekajätteen koostumus ja jätemäärät Suomessa

Laskennassa käytetty sekajätteenkoostumus, (Pulkkinen 2012)

Suomalaisen sekajätteen koostumus	kg/as/a	%
Keittiöjäte	44,5	25,3
Puutarha ja muu biojäte	25	14,2
Keräyspaperi	11,4	6,5
Keräyspahvi ja kartonki	15,1	8,6
Muu paperi, pahvi	3,8	2,2
Muovit	31,8	18,1
Lasi	4,1	2,3
Metallit	5,3	3,0
Sähkö- ja elektroniikkaromu	1,5	0,9
Puu	3,4	1,9
Tekstiili ja vaatteet	10,2	5,8
Vaipat ja siteet	12,5	7,1
Sekalaiset pakkaukset	1,4	0,8
Muu palava	3,3	1,9
Muu palaton	1,8	1,0
Sekalaiset jätteet (ei pakkauksia)	0,3	0,2
Vaaralliset jätteet	0,6	0,3
SUMMA	176	100

Laskennassa käytetty jätemäärä Suomessa (Tilastokeskus)

Jätejake	Määrä t/a
Sekajäte	1384367
Erilliskerättävät jätteet:	
Biojäte	363259
Kotikomposti (arvio)	54500
Erikseen kerätyt ravintorasvat	11728
Metallijäte, metallipakkaukset	123915
Muovi, muovipakkaukset	36127
Lasi, lasipakkaukset	30476
Puu, puupakkaukset	68532
Tekstiili	253
Paperi ja kartonki, pakkaukset	364902
Muut Pakkaukset	75916
Muu erilliskerätty. mm REF	158760
SER	64330
Ongelmajätteet	18318

REF Laatuluokat

	Yksikkö	REF 1	REF 2	REF 3
Klooripitoisuus kuiva-aineessa	m-%	< 0,15	< 0,5	< 1,5
Rikkipitoisuus kuiva-aineessa	m-%	< 0,2	< 0,3	< 0,5
Typpipitoisuus kuiva-aineessa	m-%	< 1,0	< 1,5	< 2,5
Kalium- ja natriumpitoisuus kuiva-aineessa	m-%	< 0,2	< 0,4	< 0,5
Alumiinipitoisuus kuiva-aineessa	m-%	¹	²	²
Elohopeapitoisuus kuiva-aineessa	mg/kg	> 0,1	< 0,2	< 0,5
Kadmiumpitoisuus kuiva-aineessa	mg/kg	< 1	< 4	< 5

¹ Metallista alumiinia ei sallita, mutta on hyväksyttävissä ilmoitustarkkuuden rajoissa

² Lajittelulla ja käsittelyllä pyritään poistamaan

³ Sovitaan erikseen

(Ajanko et al., 2005)

Käytetyt talteenottokertoimet.

Laskennassa käytetyt talteenottokertoimet tapaukset 1 ja 2

	Rumpuseula	Ilma- erotin	Ballistinen erotin	Ballistisen seula	Magneetti	Pyörre- virta- erotin	Optinen PS	Optinen PET	Optinen HDPE	Optinen PP
Keittiöjäte	0,85	0,1	0,508	0,4	0	0	0,00019	0,00026	0,00014	0,00047
Puutarha ja muu biojäte	0,81	0,1	0,508	0,4	0	0	0,00019	0,00026	0,00014	0,00047
Keräyspaperi	0,05	0,66	0,911	0,02	0,0013	0,00023	0,00019	0,00026	0,00014	0,00047
Keräyspahvi ja kartonki	0,05	0,66	0,911	0,02	0,0013	0,00023	0,00019	0,00026	0,00014	0,00047
Muu paperi, pahvi	0,05	0,66	0,911	0,02	0,0013	0,00023	0,00019	0,00026	0,00014	0,00047
PVC	0,08	0,85	0,786	0,052	0	0,00055	0,00431	0,00593	0,00323	0,01077
Pakkausmuovi (kova)	0,08	0,85	0,786	0,052	0	0,00055	0,10374	0,14375	0,07740	0,32591
Pakkausmuovi (kalvo)	0,05	0,85	0,972	0,014	0,005	0,00051	0,00176	0,00242	0,00132	0,00440
Muut muovit	0,05	0,85	0,786	0,052	0	0,00055	0,00331	0,00455	0,00248	0,01035
Lasi	0,10	0	0	1	0	0	0,00019	0,00026	0,00014	0,00047
Alumiinipakkaus	0,35	0,09	0,638	0,043	0	0,87	0,00114	0,00157	0,00086	0,00285

Muu metallipakkaus	0,35	0	0,638	0,043	0,88	0	0,00114	0,00157	0,00086	0,00285
Muu metalli	0,35	0,02	0,638	0,043	0,88	0	0,00114	0,00157	0,00086	0,00285
Sähkö- ja elektroniikkaromu	0,35	0,02	0,638	0,043	0,44	0,11	0,00114	0,00157	0,00086	0,00285
Puu	0,05	0,13	0,429	0,11	0,0086	0	0,00019	0,00026	0,00014	0,00047
Tekstiili ja vaatteet	0,05	0,23	0,853	0	0,0009	0	0,00019	0,00026	0,00014	0,00047
Vaipat ja siteet	0,05	0,23	0,973	0,03	0,0009	0	0,00019	0,00026	0,00014	0,00047
Sekalaiset pakkaukset	0,08	0,85	0,786	0,163	0,0013	0,00023	0,00019	0,00026	0,00014	0,00047
Muu palava (Vaahtomaiset tms.)	0,08	0,85	0,911	0,02	0,02	0,002	0,00019	0,00026	0,00014	0,00047
Muu palaton (Kivi, keramiikka)	0,35	0	0,231	0,163	0	0	0,00019	0,00026	0,00014	0,00047
Sekalaiset jätteet (ei pakkauksia)	0,35	0,23	0,786	0,043	0,0013	0,00023	0,00019	0,00026	0,00014	0,00047
Vaaralliset jätteet	0,35	0	0	0,043	0,44	0,11	0,00019	0,00026	0,00014	0,00047

Talteenottokertoimet, tapaus 3

	Magneetti	Pyörrevirta- erotin	Ilmaerotin	Optinen Lasi	LDPE	PP	PET	PS	Muut muovit	PEHD
Muovia	0,00	0,0055	0,85	0	0,28	0,21	0,11	0,1	0,20	0,06
Lasi	0	0	0	0,93	0,00014	0,00047	0,00026	0,00019	0,0005	0,00014
Metalli Fe	0,98	0	0,02	0	0,00157	0,00285	0,00157	0,0011	0,0024	0,00157
Metalli Al	0	0,97	0,09	0	0,00157	0,00285	0,00157	0,0011	0,0024	0,00157
Epäpuhtaudet lasi	0,00012	0,0023	0,66	0	0,00014	0,00047	0,00026	0,00019	0,0005	0,00014
Muovien epäpuhtaudet	0,005	0,005	0,66	0	0,00014	0,00047	0,00026	0,00019	0,0005	0,00014

Talteenottokertoimien lähteet:

Rumpuseula: Sovellettu Pressleyn artikkelin ja de Araújo'n artikkelin tietoja (de Araújo Moraes et al., 2008; Pressley et al., 2015).

Ilmaerotin: Sovellettu taulukkoa artikkelista (Velis et al., 2010)

Ballistinen: Sovellettu taulukkoa artikkelista (Velis et al., 2010)

Pyörrevirtaerotin: Luotu hyödyntäen Nasrullahin tutkimuksia ja Pressleyn antamaan erotustehokkuutta (Nasrullah et al., 2015; Pressley et al., 2015)

Magneetti: Luotu hyödyntäen Nasrullahin tutkimuksia ja Pressleyn antamaan erotustehokkuutta (Nasrullah et al., 2015; Pressley et al., 2015)

Optinen PE; PET PP PS: Recovey factor on luotu Pressleyn antaman erotustehokkuuden ja Morrishin dokumentin esimerkkitaulukon avulla ja ARVI-tutkimusohjelman tulosten perusteella (Morrish et al., 2010; Pressley et al., 2015; Anderson and Polikova 2015)

SciLab-koodi

Tapaus 1.1.

```

//Kevyestä jakeesta kalvomuovit käsin erottelulla(film-vacuum) ja rautametallit
// myös rumpuseulan alitteesta.

//Lähtötiedot
U=[25 14.045 6.404 8.483 2.135 0.618 8.539 8.09 1.742 2.303 0.674 1.292 1.011 0.843 1.91 5.73
7.022 0.787 1.854 1.011 0.169 0.337]'
I=eye(22,22)
R_tr=diag([0.85 0.81 0.05 0.05 0.05 0.08 0.08 0.05 0.05 0.1 0.35 0.35 0.35 0.35 0.05 0.05 0.05
0.08 0.08 0.35 0.35 0.35])
R_ilma=diag([0.1 0.1 0.66 0.66 0.66 0.85 0.85 0.85 0.85 0 0.09 0 0.02 0.02 0.13 0.23 0.23 0.85
0.85 0 0.23 0])
R_mag= diag([0 0 0.0013 0.0013 0.0013 0 0 0.005 0 0 0 0.88 0.88 0.44 0.009 0.009 0.009 0.0013
0.02 0 0.002 0.44])
R_eddy=diag([0 0 0.00023 0.00023 0.00023 0.00055 0.00055 0.00055 0.00051 0 0.87 0 0 0.11 0
0 0 0.00023 0.002 0 0.00023 0.11])
R_film=diag([0 0 0 0 0 0 0.81 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0])

//Rumpuseula alite X_tr, Ylite Y_tr Alite magneetilla ylite ilma erottimelle
Y_tr=(I-R_tr)*U
X_tr=R_tr*U

// Rumpuseulan alitteen käsittely, X_trmag alitteesta poistettu rauta, Y_trmag. muu rumpuseulan
alite

X_trmag=R_mag*X_tr
Y_trmag=(I-R_mag)*X_tr

//Rumpuseulan ylitteenkäsittely, X_ilma ilmaseulan ylite polttoon (tai muovin erotukseen) T_ilma
ilmaseulan alite magneetille

X_ilma=R_ilma*Y_tr
Y_ilma=(I-R_ilma)*Y_tr

//ilmaseulan alitteen käsittely.X_ilmamag poistettu rauta, Y_ilmamag Eddyyn, X_eddy poistettu
alumiini, Y_eddy polttoon

X_ilmamag=R_mag*Y_ilma
Y_ilmamag=(I-R_mag)*Y_ilma
Y_eddy=(I-R_eddy)*Y_ilmamag
X_eddy=R_eddy*Y_ilmamag

// Ilmaseula ylitteen käsinlajittelu, kalvomaisedet muovi

X_film=R_film*X_ilma
Y_film=(I-R_film)*X_ilma

//Loppuvirrat X_poltto kaikki paitsi metallit polttoon, Y_poltto biojäte mädätykseen metallitk
iertoon X_fe erotettu magneettinen X_al erotettu ei magneettinen, X_dig mädätykseen Y_
polttovaihtoehto, jos ei mädätystä Y_poltto= Po,ttoon menevä+ mädätykseen menevä

X_fe=(X_trmag+X_ilmamag)
X_poltto=(Y_trmag+Y_film+Y_eddy)
X_al=X_eddy
Y_poltto=Y_film+Y_eddy
X_dig=Y_trmag

```

X_film=X_film

//Energian kulutus

```
E_Mursk=diag([50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50])
E_Trommel=diag([1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3])
E_Mag=diag([0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6])
E_Ilma=diag([2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4])
E_Eddy=diag([0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2])
E_Vac=diag([2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2])
E_Ball=diag([1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4 1.4])
```

```
E_1=E_Mursk*U
E_2=E_Trommel*U
E_3=E_Mag*X_tr
E_4=E_Ilma*Y_tr
E_5=E_Mag*Y_ilma
E_6=E_Eddy*Y_ilmamag
E_7=E_Vac*X_ilma
```

```
E_kok=E_1+E_2+E_4+E_5+E_6+E_7
(sum(E_kok))/100
```

SciLab-koodi

Tapaus 2.1 ja 2.4

//Tapaus 2.1, laitokselle tuleva materiaali sama kuin tapaus1, käsittely eroaa

```
U=[25 14.045 6.404 8.483 2.135 0.618 8.539 8.09 1.742 2.303 0.674 1.292 1.011 0.843 1.91 5.73
7.022 0.787 1.854 1.011 0.169 0.337]'
I=eye(22,22)
R_tr=diag([0.85 0.81 0.05 0.05 0.05 0.08 0.08 0.05 0.05 0.1 0.35 0.35 0.35 0.35 0.05 0.05 0.05
0.08 0.08 0.35 0.35 0.35])
R_ilma=diag([0.1 0.1 0.66 0.66 0.66 0.85 0.85 0.85 0.85 0 0.09 0 0.02 0.02 0.13 0.23 0.23 0.85
0.85 0 0.23 0])
R_mag= diag([0 0 0.0013 0.0013 0.0013 0 0 0.005 0 0 0 0.88 0.88 0.44 0.009 0.009 0.009 0.0013
0.02 0 0.002 0.44])
R_eddy=diag([0 0 0.00023 0.00023 0.00023 0.00055 0.00055 0.00055 0.00051 0 0.87 0 0 0.11 0
0 0 0.00023 0.002 0 0.00023 0.11])
R_ball=diag([0.508 0.508 0.911 0.911 0.911 0.786 0.786 0.972 0.786 0 0.638 0.638 0.638 0.638
0.429 0.853 0.973 0.786 0.911 0.231 0.786 0])
R_ballseul=diag([0.4 0.4 0.02 0.02 0.02 0.052 0.052 0.014 0.052 1 0.043 0.043 0.043 0.043 0.11 0
0.003 0.163 0.02 0.163 0.043 0.043])
R_nirPET=diag([0.00026 0.00026 0.00026 0.00026 0.00026 0.00593 0.14375 0.00242 0.00455
0.00026 0.00157 0.00157 0.00157 0.00157 0.00026 0.00026 0.00026 0.00026 0.00026 0.00026
0.00026 0.00026])
R_nirPE=diag([0.00014 0.00014 0.00014 0.00014 0.00014 0.00323 0.0774 0.00132 0.00248
0.00014 0.00086 0.00086 0.00086 0.00086 0.00014 0.00014 0.00014 0.00014 0.00014 0.00014
0.00014 0.00014])
R_nirPP=diag([0.00047 0.00047 0.00047 0.00047 0.00047 0.01077 0.3259 0.00440 0.01035
0.0027 0.00285 0.00285 0.00285 0.00285 0.00047 0.00047 0.00047 0.00047 0.00047 0.00047
0.00047 0.00047])
R_nirPS=diag([0.00019 0.00019 0.00019 0.00019 0.00019 0.0043 0.104 0.0018 0.0033 0.00019
0.0011 0.0011 0.0011 0.0011 0.00019 0.00019 0.00019 0.00019 0.00019 0.00019 0.00019
0.00019])
```

//Rumpuseula alite X_{tr} , Ylite Y_{tr} , Alite magneetille, ylite ilmaerottimelle
 $Y_{tr}=(I-R_{tr})*U$
 $X_{tr}=R_{tr}*U$

//Rumpuseulan ylitteen käsittely
 $X_{ball}=R_{ball}*Y_{tr}$
 $X_{ballseul}=R_{ballseul}*Y_{tr}$
 $Y_{ball}=(I-(R_{ball}+R_{ballseul}))*Y_{tr}$

//Seula alitteiden yhdistäminen ja käsittely magneetilla, $X_{seulamag}$ on erotettu rauta, $Y_{seulamag}$ jatkaa eddylle
 $X_{seulat}=X_{tr}+X_{ballseul}$
 $X_{seulamag}=R_{mag}*X_{seulat}$
 $Y_{seulamag}=(I-R_{mag})*X_{seulat}$

// Seula alitetttn Eddy, $X_{seulaeddy}$ on erotettu alumiini, $Y_{seulaeddy}$ mädättämöön

$X_{seulaeddy}=R_{eddy}*Y_{seulamag}$
 $Y_{seulaeddy}=(I-R_{eddy})*Y_{seulamag}$

// ballistisen erottimen raskaan jakeen käsittely 1. magneetti, 2.eddy,
 $X_{ballRasMag}=R_{mag}*Y_{ball}$
 $Y_{ballRasMag}=(I-R_{mag})*Y_{ball}$

$X_{ballRasEddy}=R_{eddy}*Y_{ballRasMag}$

$Y_{ballRasEddy} = (I - R_{eddy}) * Y_{ballRasMag}$

//Ballistisen kevyen jakeen käsittely

$X_{ballKevMag} = R_{mag} * X_{ball}$

$Y_{ballKevMag} = (I - R_{mag}) * X_{ball}$

$X_{ballKevEddy} = R_{eddy} * Y_{ballKevMag}$

$Y_{ballKevEddy} = (I - R_{eddy}) * Y_{ballKevMag}$

//Muovien erottelu

//Kovat muovit

$X_{PP} = R_{nirPP} * Y_{ballKevEddy}$

$X_{PS} = R_{nirPS} * Y_{ballKevEddy}$

$X_{PE} = R_{nirPE} * Y_{ballKevEddy}$

$X_{PET} = R_{nirPET} * Y_{ballKevEddy}$

$Y_{muu} = (I - (R_{nirPP} + R_{nirPE} + R_{nirPET} + R_{nirPS})) * Y_{ballKevEddy}$

// Loppuvirrat, fe. al kierrätykseen, dig, mädätykseen

$X_{fe} = X_{seulamag} + X_{ballRasMag} + X_{ballKevMag}$

$X_{al} = X_{seulaeddy} + X_{ballRasEddy} + X_{ballKevEddy}$

$X_{dig} = Y_{seulaeddy}$

$X_{poltto} = Y_{ballRasEddy} + Y_{muu}$

$X_{muovit} = (R_{nirPP} + R_{nirPE} + R_{nirPET} + R_{nirPS}) * Y_{ballKevEddy}$

//Energiankulutus

$E_{Murks} = \text{diag}([50 \ 50])$

$E_{Trommel} = \text{diag}([1.3 \ 1.3])$

$E_{Mag} = \text{diag}([0.6 \ 0.6])$

$E_{Ilma} = \text{diag}([2.4 \ 2.4])$

$E_{Eddy} = \text{diag}([0.2 \ 0.2])$

$E_{Vac} = \text{diag}([2 \ 2])$

$E_{Ball} = \text{diag}([1.4 \ 1.4])$

$E_{Nir} = \text{diag}([10 \ 10])$

$E_1 = E_{Murks} * U$

$E_2 = E_{Trommel} * U$

$E_3 = E_{Ball} * Y_{tr}$

$E_4 = E_{Mag} * X_{seulat}$

$E_5 = E_{Eddy} * Y_{seulamag}$

$E_6 = E_{Mag} * Y_{ball}$

$E_7 = E_{Eddy} * Y_{ballRasMag}$

$E_8 = E_{Mag} * X_{ball}$

$E_9 = E_{Eddy} * Y_{ballKevMag}$

*//E_10=E_Vac**

$E_{11} = E_{Nir} * Y_{ballKevEddy}$

$E_{kok} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 + E_7 + E_8 + E_9 + E_{11}$

$(\text{sum}(E_{kok}))/100$

//Case 2, laitokselle tuleva materiaali sama kuin edellisessä, käsittely eroaa,, OCC mukaan
murskaus vaihtaa paikkaa. Kalvomuovien erottelu mukana.

```
U=[25 14.045 6.404 8.483 2.135 0.618 8.539 8.09 1.742 2.303 0.674 1.292 1.011 0.843 1.91 5.73
7.022 0.787 1.854 1.011 0.169 0.337]'
I=eye(22,22)
R_tr=diag([0.85 0.81 0.05 0.05 0.05 0.08 0.08 0.05 0.05 0.1 0.35 0.35 0.35 0.35 0.05 0.05 0.05
0.08 0.08 0.35 0.35 0.35])
R_ilma=diag([0.1 0.1 0.66 0.66 0.66 0.85 0.85 0.85 0.85 0 0.09 0 0.02 0.02 0.13 0.23 0.23 0.85
0.85 0 0.23 0])
R_mag= diag([0 0 0.0013 0.0013 0.0013 0 0 0.005 0 0 0 0.88 0.88 0.44 0.009 0.009 0.009 0.0013
0.02 0 0.002 0.44])
R_eddy=diag([0 0 0.00023 0.00023 0.00023 0.00055 0.00055 0.00055 0.00051 0 0.87 0 0 0.11 0
0 0 0.00023 0.002 0 0.00023 0.11])
R_ball=diag([0.508 0.508 0.911 0.911 0.911 0.786 0.786 0.972 0.786 0 0.638 0.638 0.638 0.638
0.429 0.853 0.973 0.786 0.911 0.231 0.786 0])
R_ballseul=diag([0.4 0.4 0.02 0.02 0.02 0.052 0.052 0.014 0.052 1 0.043 0.043 0.043 0.043 0.11 0
0.003 0.163 0.02 0.163 0.043 0.043])
R_nirPET=diag([0.00026 0.00026 0.00026 0.00026 0.00026 0.00593 0.14375 0.00242 0.00455
0.00026 0.00157 0.00157 0.00157 0.00157 0.00026 0.00026 0.00026 0.00026 0.00026 0.00026
0.00026 0.00026])
R_nirPE=diag([0.00014 0.00014 0.00014 0.00014 0.00014 0.00323 0.0774 0.00132 0.00248
0.00014 0.00086 0.00086 0.00086 0.00086 0.00014 0.00014 0.00014 0.00014 0.00014 0.00014
0.00014 0.00014])
R_nirPP=diag([0.00047 0.00047 0.00047 0.00047 0.00047 0.01077 0.3259 0.00440 0.01035
0.0027 0.00285 0.00285 0.00285 0.00047 0.00047 0.00047 0.00047 0.00047 0.00047 0.00047
0.00047 0.00047])
R_nirPS=diag([0.00019 0.00019 0.00019 0.00019 0.00019 0.0043 0.104 0.0018 0.0033 0.00019
0.0011 0.0011 0.0011 0.00019 0.00019 0.00019 0.00019 0.00019 0.00019 0.00019 0.00019
0.00019])
R_film=diag([0 0 0 0 0 0 0.81 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0])
R_OCC=diag([0 0 0 0.6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0])
```

//Rumpuseula alite X_tr, Ylite Y_tr Alite magneetilla ylite ilma erottimelle

Y_tr=(I-R_tr)*U

X_tr=R_tr*U

//Rumpuseulan ylitteen käsittely

//OCC sitten murkaus--> ballisinen

X_OCC=R_OCC*Y_tr

Y_OCC=(I-R_OCC)*Y_tr

X_ball=R_ball*Y_OCC

X_ballseul=R_ballseul*Y_OCC

Y_ball=(I-(R_ball+R_ballseul))*Y_OCC

//Seula alitteiden yhdistäminen ja käsittely magneetilla, X_seulamag on eroettu rauta, Y seulamag
jatkaa eddylle

X_seulat=X_tr+X_ballseul

X_seulamag=R_mag*X_seulat

Y_seulamag=(I-R_mag)*X_seulat

// Seula alittettn Eddy, X_seulaeddy on eroettu alumiini, Y_seulaeddy mädättämöön

X_seulaeddy=R_eddy*Y_seulamag

Y_seulaeddy=(I-R_eddy)*Y_seulamag

// ballistisen erottimen raskaanjakeen käsittely 1. magneetti, 2.eddy,

$X_{ballRasMag} = R_{mag} * Y_{ball}$
 $Y_{ballRasMag} = (I - R_{mag}) * Y_{ball}$

$X_{ballRasEddy} = R_{eddy} * Y_{ballRasMag}$
 $Y_{ballRasEddy} = (I - R_{eddy}) * Y_{ballRasMag}$

//Ballistisen kevyen jakeen käsittely
 $X_{ballKevMag} = R_{mag} * X_{ball}$
 $Y_{ballKevMag} = (I - R_{mag}) * X_{ball}$

$X_{ballKevEddy} = R_{eddy} * Y_{ballKevMag}$
 $Y_{ballKevEddy} = (I - R_{eddy}) * Y_{ballKevMag}$

// ballistisen ylitteen käsinlajittelu, kalvomaisedet muovi

$X_{film} = R_{film} * Y_{ballKevEddy}$
 $Y_{film} = (I - R_{film}) * Y_{ballKevEddy}$

//Kovat muovit

$X_{PP} = R_{nirPP} * Y_{film}$
 $X_{PS} = R_{nirPS} * Y_{film}$
 $Y_{muu} = (I - (R_{nirPP} + R_{nirPE} + R_{nirPET} + R_{nirPS})) * Y_{film}$
 $X_{PE} = R_{nirPE} * Y_{film}$
 $X_{PET} = R_{nirPET} * Y_{film}$

// Loppuvirrat, fe. al kierrätykseen, dig, mädätykseen

$X_{fe} = X_{seulamag} + X_{ballRasMag} + X_{ballKevMag}$
 $X_{al} = X_{seulaeddy} + X_{ballRasEddy} + X_{ballKevEddy}$

$X_{dig} = Y_{seulaeddy}$
 $X_{poltto} = Y_{ballRasEddy} + Y_{muu}$

X_{PP}
 X_{PE}
 X_{PET}
 X_{OCC}

//Energiankulutus

$E_{Murks} = \text{diag}([50 \ 50])$
 $E_{Trommel} = \text{diag}([1.4 \ 1.4])$
 $E_{Mag} = \text{diag}([0.6 \ 0.6])$
 $E_{Ilma} = \text{diag}([2.4 \ 2.4])$
 $E_{Eddy} = \text{diag}([0.2 \ 0.2])$
 $E_{Vac} = \text{diag}([2 \ 2])$
 $E_{Ball} = \text{diag}([1.4 \ 1.4])$
 $E_{Nir} = \text{diag}([10 \ 10])$
 $E_{OCC} = \text{diag}([0.17 \ 0.17])$

$E_1 = E_{Trommel} * U$
 $E_2 = E_{OCC} * Y_{tr}$
 $E_3 = E_{Murks} * Y_{OCC}$
 $E_4 = E_{Ball} * Y_{OCC}$
 $E_5 = E_{Mag} * X_{seulat}$
 $E_6 = E_{Eddy} * Y_{seulamag}$

$$E_7 = E_{\text{Mag}} * Y_{\text{ball}}$$

$$E_8 = E_{\text{Eddy}} * Y_{\text{ballRasMag}}$$

$$E_9 = E_{\text{Mag}} * X_{\text{ball}}$$

$$E_{10} = E_{\text{Eddy}} * Y_{\text{ballKevMag}}$$

$$E_{11} = E_{\text{Vac}} * Y_{\text{ballKevEddy}}$$

$$E_{12} = E_{\text{Nir}} * Y_{\text{film}}$$

$$E_{\text{kok}} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 + E_7 + E_8 + E_9 + E_{10} + E_{11} + E_{12} \\ (\text{sum}(E_{\text{kok}}))/100$$

SciLab-koodi

Esimerkkitapaus 3

```
// Lähtömateriaalina erilliskerätty, yksinkertainen käsittely
```

```
U_e=[20 49 17.3 6.7 1 6]
I=eye(6,6)
R_ilmaer=diag([0.85 0 0.02 0.09 0.66 0.66])
R_mager=diag([0 0 0.98 0 0.0013 0.005])
R_eddyer=diag([0.0055 0 0 0.97 0.00023 0.0051])
R_optiC=diag([0 0.93 0 0 0 0])
R_nirPE=diag([0.06 0.00014 0.00157 0.00157 0.00014 0.00014])
R_nirPP=diag([0.21 0.00047 0.00285 0.00285 0.00047 0.00047])
R_nirPET=diag([0.11 0.00026 0.00157 0.00026 0.00026 0.00026])
R_nirMU=diag([0.20 0.005 0.0024 0.0024 0.0005 0.0005])
R_nirPS=diag([0.1 0.000186 0.00011 0.00011 0.000186 0.000186])
R_nirLDPE=diag([0.28 0.00014 0.00157 0.00157 0.00014 0.00014])
```

```
//Erotetaan kevyet raskaista
```

```
X_ilmaer=R_ilmaer*U_e
```

```
Y_ilmaer=(I-R_ilmaer)*U_e
```

```
//Erotetaan rauta
```

```
X_mager=R_mager*Y_ilmaer
```

```
Y_mager=(I-R_mager)*Y_ilmaer
```

```
//Erotetaan alumiini
```

```
X_eddyer=R_eddyer*Y_mager
```

```
Y_eddyer=(I-R_eddyer)*Y_mager
```

```
//Lasi
```

```
X_lasi=R_optiC*Y_eddyer
```

```
Y_lasi=(I-R_optiC)*Y_eddyer
```

```
//Muovien erottelu
```

```
X_muovit=(R_nirPP+R_nirPE+R_nirPET+R_nirMU+R_nirPS+R_nirLDPE)*X_ilmaer
```

```
X_Ilman sekoitemuoveja=(R_nirPP+R_nirPE+R_nirPET+R_nirPS+R_nirLDPE)*X_ilmaer
```

```
Y_muu=(I-(R_nirPP+R_nirPE+R_nirPET+R_nirMU+R_nirPS+R_nirLDPE))*X_ilmaer
```

```
//loppuvirrat
```

```
X_rauta=X_mager
```

```
X_AL=X_eddyer
```

```
X_lasi=X_lasi
```

```
X_kevytjäte=Y_muu
```

```
X_raskasjäte=Y_lasi
```

```
//Energiankulutus
```

```
E_Mag=diag([0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6])
```

```
E_Ilma=diag([2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4])
```

```
E_Eddy=diag([0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2])
```

```
E_Nir=diag([10 10 10 10 10 10])
```

```
E_OPC=diag([3.6 3.6 3.6 3.6 3.6 3.6])
```

$E_1 = E_{\text{Ilma}} * U_e$
 $E_2 = E_{\text{Mag}} * Y_{\text{ilmaer}}$
 $E_3 = E_{\text{Eddy}} * Y_{\text{mager}}$
 $E_4 = E_{\text{OPC}} * Y_{\text{eddyer}}$
 $E_5 = E_{\text{Nir}} * X_{\text{ilmaer}}$

$E_{\text{kok}} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5$
 $(\text{sum}(E_{\text{kok}}))/100$

Esimerkkitapaus 1.1 Materiaali koostumus	Alkuperäinen koostumus	Mädätys (poltto)	Poltto	Al	Fe	Kalvomuovit	EI mädätystä, kaikki polttoon
Keittiöjäte	25,00000	21,25000	3,75000	0,00000	0,00000	0,00000	25,00000
Puutarha ja muu biojäte	14,04500	11,37645	2,66855	0,00000	0,00000	0,00000	14,04500
Keräyspaperi	6,40400	0,31978	6,08064	0,00048	0,00311	0,00000	6,40042
Keräyspahvi ja kartonki	8,48300	0,42360	8,05466	0,00063	0,00411	0,00000	8,47826
Muu paperi ja pahvi	2,13500	0,10661	2,02720	0,00016	0,00104	0,00000	2,13381
PVC	0,61800	0,04944	0,56851	0,00005	0,00000	0,00000	0,61795
Pakkausmuovi, kova	8,53900	0,68312	7,85523	0,00065	0,00000	0,00000	8,53835
Pakkausmuovi, kalvo	8,09000	0,40248	2,38764	0,00063	0,00779	5,29147	2,79012
Muut muovit	1,74200	0,08710	1,65477	0,00013	0,00000	0,00000	1,74187
Lasi	2,30300	0,23030	2,07270	0,00000	0,00000	0,00000	2,30300
Alumiinipakkaus	0,67400	0,23590	0,09126	0,34684	0,00000	0,00000	0,32716
Muu metallipakkaus	1,29200	0,05426	0,10078	0,00000	1,13696	0,00000	0,15504
Muu metalli	1,01100	0,04246	0,09042	0,00000	0,87811	0,00000	0,13289
Sähkö- ja elektroniikkaromu	0,84300	0,16523	0,27860	0,03308	0,36610	0,00000	0,44382
PUU	1,91000	0,09464	1,80029	0,00000	0,01507	0,00000	1,89493
Tekstiili ja vaatteet	5,73000	0,28392	5,40578	0,00000	0,04030	0,00000	5,68970
vaipat ja siteet	7,02200	0,34794	6,62467	0,00000	0,04939	0,00000	6,97261
Sekalaiset pakkaukset	0,78700	0,06288	0,72387	0,00002	0,00022	0,00000	0,78675
Muu palava	1,85400	0,14535	1,70006	0,00050	0,00808	0,00000	1,84542
Muu palamaton	1,01100	0,35385	0,65715	0,00000	0,00000	0,00000	1,01100
Sekalaiset ei pakkaus	0,16900	0,05903	0,10966	0,00002	0,00029	0,00000	0,16869
Vaaralliset jätteet	0,33700	0,06605	0,10917	0,01349	0,14828	0,00000	0,17523
SUMMA	99,99900	36,84040	54,81161	0,39668	2,65884	5,29147	91,65201
Keräysaste		83,56		51,46	87,50	65,41	
Puhtaus		88,56		87,44	89,56		

Esimerkkitapaus 1.2 Materiaali koostumus	Alkuperäinen koostumus	Mädätys (poltto)	Poltto	Al	Fe	Ei mädätystä kaikki polttoon
Keittiöjäte	25,00000	21,25000	3,75000	0,00000	0,00000	25,00000
Puutarha ja muu biojäte	14,04500	11,37645	2,66855	0,00000	0,00000	14,04500
Keräyspaperi	6,40400	0,32020	6,08064	0,00048	0,00269	6,40084
Keräyspahvi ja kartonki	8,48300	0,42415	8,05466	0,00063	0,00356	8,47881
Muu paperi ja pahvi	2,13500	0,10675	2,02720	0,00016	0,00090	2,13395
PVC	0,61800	0,04944	0,56851	0,00005	0,00000	0,61795
Pakkausmuovi, kova	8,53900	0,68312	7,85523	0,00065	0,00000	8,53835
Pakkausmuovi, kalvo	8,09000	0,40450	7,67911	0,00063	0,00576	8,08361
Muu muovi	1,74200	0,08710	1,65477	0,00013	0,00000	1,74187
Lasi	2,30300	0,23030	2,07270	0,00000	0,00000	2,30300
Alumiinipakkaus	0,67400	0,23590	0,09126	0,34684	0,00000	0,32716
Muu metallipakkaus	1,29200	0,45220	0,10078	0,00000	0,73902	0,55298
Muu metalli	1,01100	0,35385	0,09042	0,00000	0,56673	0,44427
Sähkö- ja elektroniikkaromu	0,84300	0,29505	0,27859	0,03308	0,23628	0,57365
Puu	1,91000	0,09550	1,80029	0,00000	0,01421	1,89579
Tekstiili ja vaatteet	5,73000	0,28650	5,40578	0,00000	0,03772	5,69228
Vaipat ja siteet	7,02200	0,35110	6,62467	0,00000	0,04623	6,97577
Sekalaiset pakkaukset	0,78700	0,06296	0,72387	0,00003	0,00014	0,78683
Muu palava	1,85400	0,14832	1,70006	0,00050	0,00512	1,84838
Muu palamaton	1,01100	0,35385	0,65715	0,00000	0,00000	1,01100
Sekalaiset, ei pakkaus	0,16900	0,05915	0,10966	0,00002	0,00017	0,16881
Vaaralliset jätteet	0,33700	0,11795	0,10918	0,01349	0,09638	0,22713
SUMMA	99,99900	37,74434	60,1031	0,39668	1,75491	97,8474
Keräysaste		83,56		51,46	56,70	
Puhtaus		86,44		87,44	87,87	

Tapaus 2.1	Lähtö-							
Materiaalikoostumus	materiaalin	Mädätys	Poltto	Al	Fe	Kova	Kalvo	Pahvi
koostumus						muovi	muovi	
Keittiöjäte	25,00000	22,75000	2,24798	0,00000	0,00000	0,00202		
Puutarha ja muu biojäte	14,04500	12,44387	1,59969	0,00000	0,00000	0,00144		
Keräyspaperi	6,40400	0,44120	5,94714	0,00147	0,00833	0,00587		
Keräyspahvi ja kartonki	8,48300	0,58443	7,87782	0,00195	0,01103	0,00777		
Muu paperi ja pahvi	2,13500	0,14709	1,98269	0,00049	0,00278	0,00196		
PVC	0,61800	0,07896	0,52788	0,00034	0,00000	0,01082		
Pakkausmuovi Kova	8,53900	1,09103	3,42544	0,00470	0,00000	4,01784		
Pakkausmuovi Kalvo	8,09000	0,50926	7,46202	0,00443	0,04045	0,07384		
Muu muovi	1,74200	0,17307	1,54116	0,00089	0,00000	0,02689		
Lasi	2,30300	2,30300	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		
Alumiinipakkaus	0,67400	0,03312	0,05427	0,58638	0,00000	0,00023		
Muu metallipakkaus	1,29200	0,05860	0,09603	0,00000	1,13696	0,00041		
Muu metalli	1,01100	0,04585	0,07515	0,00000	0,88968	0,00032		
Sähkö- ja elektroniikkaromu	0,84300	0,15880	0,26024	0,05193	0,37092	0,00111		
PUU	1,91000	0,29244	1,59955	0,00000	0,01719	0,00082		
Tekstiili ja vaatteet	5,73000	0,28392	5,38963	0,00000	0,05157	0,00488		
vaipat ja siteet	7,02200	0,36777	6,58421	0,00000	0,06320	0,00682		
Sekalaiset pakkaukset	0,78700	0,18070	0,60449	0,00018	0,00102	0,00060		
Muu palava	1,85400	0,17843	1,63325	0,00363	0,03708	0,00161		
Muu palamaton	1,01100	0,46097	0,54987	0,00000	0,00000	0,00016		
Sekalaiset, ei pakkaus	0,16900	0,06373	0,10480	0,00004	0,00034	0,00009		
Vaaralliset jätteet	0,33700	0,06348	0,10448	0,02076	0,14828	0,00000		
SUMMA	99,99900	42,70970	49,66780	0,67718	2,77882	4,16549		
Keräysaste		90,14		87,00	88,00	47,05		
Puhtaus		82,40		86,59	86,28	96,46		

Tapaus 2.2	Lähtö-							
Materiaalikoostumus	materiaalin	Mädätys	Poltto	Al	Fe	Kova	Kalvo	Pahvi
koostumus						muovi	muovi	
Keittiöjäte	25,00000	22,75000	2,24798	0,00000	25,00000	0,00202	0,00000	
Puutarha ja muu biojäte	14,04500	12,44387	1,59969	0,00000	14,04500	0,00144	0,00000	
Keräyspaperi	6,40400	0,44120	5,94714	0,00147	6,40400	0,00587	0,00000	
Keräyspahvi ja kartonki	8,48300	0,58443	7,87782	0,00195	8,48300	0,00777	0,00000	
Muu paperi ja pahvi	2,13500	0,14709	1,98269	0,00049	2,13500	0,00196	0,00000	
PVC	0,61800	0,07896	0,52788	0,00034	0,61800	0,01082	0,00000	
Pakkausmuovi Kova	8,53900	1,09103	3,42544	0,00470	8,53900	4,01784	0,00000	
Pakkausmuovi Kalvo	8,09000	0,50926	1,50445	0,00443	8,09000	0,01403	6,01738	
Muu muovi	1,74200	0,17307	1,54116	0,00089	1,74200	0,02689	0,00000	
Lasi	2,30300	2,30300	0,00000	0,00000	2,30300	0,00000	0,00000	
Alumiinipakkaus	0,67400	0,03312	0,05427	0,58638	0,67400	0,00023	0,00000	
Muu metallipakkaus	1,29200	0,05860	0,09603	0,00000	1,29200	0,00041	0,00000	
Muu metalli	1,01100	0,04585	0,07515	0,00000	1,01100	0,00032	0,00000	
Sähkö- ja elektroniikkaromu	0,84300	0,15880	0,26024	0,05193	0,84300	0,00111	0,00000	
PUU	1,91000	0,29244	1,59955	0,00000	1,91000	0,00082	0,00000	
Tekstiili ja vaatteet	5,73000	0,28392	5,38963	0,00000	5,73000	0,00488	0,00000	
vaipat ja siteet	7,02200	0,36777	6,58421	0,00000	7,02200	0,00682	0,00000	
Sekalaiset pakkaukset	0,78700	0,18070	0,60449	0,00018	0,78700	0,00060	0,00000	
Muu palava	1,85400	0,17843	1,63325	0,00363	1,85400	0,00161	0,00000	
Muu palamaton	1,01100	0,46097	0,54987	0,00000	1,01100	0,00016	0,00000	
Sekalaiset, ei pakkaus	0,16900	0,06373	0,10480	0,00004	0,16900	0,00009	0,00000	
Vaaralliset jätteet	0,33700	0,06348	0,10448	0,02076	0,33700	0,00000	0,00000	
SUMMA	99,99900	42,70970	43,71023	0,67718	99,99900	4,10568	6,01738	
Keräysaste		90,14		87,00	88,00	47,01	74,38	
Puhtaus		82,40		86,59	86,28	97,86		

Tapaus 2.3	Lähtö-							
Materiaalikoostumus	materiaalin	Mädätys	Poltto	Al	Fe	Kova	Kalvo	Pahvi
koostumus						muovi	muovi	
Keittiöjäte	25,00000	22,75000	2,24798	0,00000	0,00000	0,00202		0,00000
Puutarha ja muu biojäte	14,04500	12,44387	1,59969	0,00000	0,00000	0,00144		0,00000
Keräyspaperi	6,40400	0,44120	5,94714	0,00147	0,00833	0,00587		0,00000
Keräyspahvi ja kartonki	8,48300	0,48787	3,15113	0,00084	0,00474	0,00311		4,83531
Muu paperi ja pahvi	2,13500	0,14709	1,98269	0,00049	0,00278	0,00196		0,00000
PVC	0,61800	0,07896	0,52788	0,00034	0,00000	0,01082		0,00000
Pakkausmuovi Kova	8,53900	1,09103	3,42544	0,00470	0,00000	4,01784		0,00000
Pakkausmuovi Kalvo	8,09000	0,50926	7,46202	0,00443	0,04045	0,07384		0,00000
Muu muovi	1,74200	0,17307	1,54116	0,00089	0,00000	0,02689		0,00000
Lasi	2,30300	2,30300	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		0,00000
Alumiinipakkaus	0,67400	0,03312	0,05427	0,58638	0,00000	0,00023		0,00000
Muu metallipakkaus	1,29200	0,05860	0,09603	0,00000	1,13696	0,00041		0,00000
Muu metalli	1,01100	0,04585	0,07515	0,00000	0,88968	0,00032		0,00000
Sähkö- ja elektroniikkaromu	0,84300	0,15880	0,26024	0,05193	0,37092	0,00111		0,00000
PUU	1,91000	0,29244	1,59955	0,00000	0,01719	0,00082		0,00000
Tekstiili ja vaatteet	5,73000	0,28392	5,38963	0,00000	0,05157	0,00488		0,00000
vaipat ja siteet	7,02200	0,36777	6,58421	0,00000	0,06320	0,00682		0,00000
Sekalaiset pakkaukset	0,78700	0,18070	0,60449	0,00018	0,00102	0,00060		0,00000
Muu palava	1,85400	0,17843	1,63325	0,00363	0,03708	0,00161		0,00000
Muu palamaton	1,01100	0,46097	0,54987	0,00000	0,00000	0,00016		0,00000
Sekalaiset, ei pakkaus	0,16900	0,06373	0,10480	0,00004	0,00034	0,00009		0,00000
Vaaralliset jätteet	0,33700	0,06348	0,10448	0,02076	0,14828	0,00000		0,00000
SUMMA	99,99900	42,61314	44,94111	0,67607	2,77253	4,16083		4,83531
Keräysaste		90,14		87,00	88,00	47,05		57,00
Puhtaus		82,40		86,73	86,48	96,47		

Tapaus 2.4	Lähtö-							
Materiaalikoostumus	materiaalin	Mädätys	Poltto	Al	Fe	Kova	Kalvo	Pahvi
koostumus						muovi	muovi	
Keittiöjäte	25,00000	22,75000	2,24769	0,00000	0,00000	0,00231	0	0,00000
Puutarha ja muu biojäte	14,04500	12,44387	1,59949	0,00000	0,00000	0,00164	0	0,00000
Keräyspaperi	6,40400	0,44120	5,94631	0,00147	0,00833	0,00670	0	0,00000
Keräyspahvi ja kartonki	8,48300	0,48787	3,15069	0,00084	0,00474	0,00355	0	4,83531
Muu paperi ja pahvi	2,13500	0,14709	1,98241	0,00049	0,00278	0,00223	0	0,00000
PVC	0,61800	0,07896	0,53641	0,00034	0,00000	0,00229	0	0,00000
Pakkausmuovi Kova	8,53900	1,09103	3,08756	0,00470	0,00000	4,35572	0	0,00000
Pakkausmuovi Kalvo	8,09000	0,50926	1,50973	0,00443	0,04045	0,00875	6,01738	0,00000
Muu muovi	1,74200	0,17307	1,56647	0,00089	0,00000	0,00157	0	0,00000
Lasi	2,30300	2,30300	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0	0,00000
Alumiinipakkaus	0,67400	0,03312	0,05423	0,58638	0,00000	0,00028	0	0,00000
Muu metallipakkaus	1,29200	0,05860	0,09599	0,00000	1,13696	0,00046	0	0,00000
Muu metalli	1,01100	0,04585	0,07508	0,00000	0,88968	0,00038	0	0,00000
Sähkö- ja elektroniikkaromu	0,84300	0,15880	0,26114	0,05193	0,37092	0,00021	0	0,00000
PUU	1,91000	0,29244	1,59944	0,00000	0,01719	0,00093	0	0,00000
Tekstiili ja vaatteet	5,73000	0,28392	5,38894	0,00000	0,05157	0,00557	0	0,00000
vaipat ja siteet	7,02200	0,36777	6,58325	0,00000	0,06320	0,00778	0	0,00000
Sekalaiset pakkaukset	0,78700	0,18070	0,60441	0,00018	0,00102	0,00069	0	0,00000
Muu palava	1,85400	0,17843	1,63302	0,00363	0,03708	0,00184	0	0,00000
Muu palamaton	1,01100	0,46097	0,54985	0,00000	0,00000	0,00018	0	0,00000
Sekalaiset, ei pakkaus	0,16900	0,06373	0,10479	0,00004	0,00034	0,00010	0	0,00000
Vaaralliset jätteet	0,33700	0,06348	0,10448	0,02076	0,14828	0,00000	0	0,00000
SUMMA	99,99900	42,61314	38,68138	0,67607	2,77253	4,40318	6,01738	0,00000
Keräysaste		90,14		87,00	88,00	47,05	74,38	57,00
Puhtaus		82,59		86,73	86,48	97,97		