

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

Mikko Ronkanen

RAKENNUS- JA PURKUJÄTEMATERIAALIN LAJITTELUN KEHITTÄMINEN

Työn tarkastajat:

Professori Timo Kärki

TkT Marko Hyvärinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Mikko Ronkanen

Rakennus- ja purkujätteen lajittelun kehittäminen

Diplomityö

2016

122 sivua, 62 kuvaa, 34 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Timo Kärki
TkT Marko Hyvärinen

Hakusanat: rakennus- ja purkujäte, mekaaninen lajittelu, materiaalin kierrätys, komposiitti, kiertotalous

Keywords: construction and demolition waste, mechanical separation, material recycling, composite, circular economy

Rakennus- ja purkujätteen hyödyntämisvaatimukset kiristyvät tulevaisuudessa, ja alalla toimivien yritysten on kehitettävä toimintaansa vaatimusten täyttämiseksi. Rakennus- ja purkujätteen joukosta hyödynnettäviä materiaaleja on muun muassa metalli, muovi, puu, kipsi, villa, pahvi ja paperi, sekä betoni. Hyödyntämisen edellytyksenä on kuitenkin toimiva materiaalinlajittelulaitteisto, jolla voidaan tuottaa soveltuvia jakeita eri käyttökohteisiin.

Tässä diplomityössä käsitellään rakennus- ja purkujätteen mekaanista lajittelua, sekä saatujen jakeiden hyödyntämistä komposiitin valmistuksessa. Työn kirjallisuusosassa käsitellään rakennus- ja purkujätteen nykytilannetta, sen mekaanista lajittelua, sekä puumuovikomposiitin valmistusta. Diplomityön kokeellisessa osassa lajitellaan sekalaista rakennus- ja purkujätettä Dieffenbacher Panelboard Oy:n valmistamalla ClassiCleaner-laitteistolla. Epäpuhtaimpien jakeiden hyödyntämistä tutkitaan komposiitin valmistuksessa.

Rakennus- ja purkujätteen laatu vaihtelee suuresti useista tekijöistä riippuen, mikä aiheuttaa haasteita lajittelulaitteiston toiminnalle. ClassiCleaner-laitteistolla saavutettiin neljää erilaista materiaaliainetta, joiden hyödyntäminen materiaalina on mahdollista soveltuvissa käyttökohteissa. Työssä valmistettujen komposiittien mekaaniset ominaisuudet ovat hyvällä tasolla.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Mikko Ronkanen

Improving the construction and demolition waste separation

Master's Thesis

2016

122 pages, 62 figures, 34 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Timo Kärki
D. Sc. Marko Hyvärinen

Keywords: construction and demolition waste, mechanical separation, material recycling, composite, circular economy

Requirements of recycling construction- and demolition waste are tightening and companies in waste business have to increase their performance to fulfill new legislation. Recyclable materials in construction- and demolition waste are for example metals, plastics, wood, gypsum, mineral wool, cardboards and papers and concrete. However, the recovery is conditional on effective material sorting apparatus capable of producing suitable verses for different applications.

This master's thesis deals with construction- and demolition waste mechanical sorting, as well as fractions derived from the exploitation of the manufacture of the composite material. In the theoretical part deals with construction- and demolition waste in the current situation, mechanical sorting, as well as the manufacture of wood-plastic-composite. In the experimental part of the thesis are sorted construction- and demolition waste with Dieffenbacher Panelboard Ltd ClassiCleaner-equipment. The use of impure fractions studied in the manufacture of composite material.

The quality of construction and demolition waste varies greatly depending on a number of factors, which pose a challenge to the operation of sorting system. ClassiCleaner equipment produce four different types of material fraction, with a utilization as material is possible to appropriate applications was archived. The mechanical properties of the composite prepared at work are at a good level.

ALKUSANAT

Haluan kiittää professori Timo Kärkeä mahdollisuudesta osallistua ajankohtaiseen ja mielenkiintoiseen projektiin ympäristön tulevaisuuden kehittämiseksi, sekä hyvältä ohjauksesta työn eri vaiheissa. Kiitos kuuluu myös Rauli Kinnuselle komposiitin valmistukseen liittyvien haasteiden ratkaisemista.

Suuri kiitos myös Pasi Marttilalle, sekä Jukka Horellille mahdollisuudesta osallistua kanssanne lasivillanpölyiseen, mutta antoisaan tehtävään. Kiitos neuvoista ja uusista näkökulmista, joita ammattitaidoistanne sain.

Valmistumiseni diplomi-insinööriksi on vaatinut paljon ja haluan kiittää perhettäni ja opiskelukavereitani kaikesta tuesta, jota olette antaneet. Valtava kiitos kuuluu myös Niinalle hauskoista hetkistä koko opintojeni ajan.

Mikko Ronkanen

Tampereella 17.10.2016

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	11
1.1	Työn tausta.....	11
1.2	Työn tavoite ja rajausta.....	12
2	RAKENNUSJÄTE EUROOPASSA JA SUOMESSA.....	14
2.1	Rakennusjäte Euroopassa	15
2.2	Rakennusjäte Suomessa	18
2.3	Lainsäädäntö rakennusjätealalla	20
3	RAKENNUSJÄTTEEN KONEELLINEN EROTTELU.....	22
3.1	Pyörrevirtaerotin	24
3.2	Magneettierotin.....	25
3.3	Kiekko- ja rumpuseula.....	27
3.4	Ballistinen erotin.....	30
3.5	Ilmaerotin.....	31
3.6	Ilmanohjain	32
3.7	Upotus-kellutus.....	33
3.8	Kuivalla raskaalla väliaineella tehtävä erottelu	34
3.9	Antureihin perustuvat lajittelumenetelmät.....	35
3.9.1	Optinen tunnistin.....	36
3.9.2	Röntgensäteilykäsittely (XRT)	38
3.9.3	Lähialueen infrapuna (NIR).....	39
3.10	ClassiCleaner	40
4	PUUMUOVIKOMPOSIITIT	45
4.1	Puumuovikomposiittien koostumus.....	45
4.1.1	Puu	45

4.1.2	Muovit.....	47
4.1.3	Lisä- ja täyteaineet.....	51
4.2	Valmistusmenetelmät.....	52
4.2.1	Agglomerointi.....	53
4.2.2	Ekstruusio	55
4.2.3	Ruiskuvalu	57
5	AINEISTO JA MENETELMÄT.....	58
5.1	Näytteenotannon suorittaminen ja materiaalien käsinlajittelu.....	58
5.2	Materiaalien murskaus ja sekoitus.....	60
5.3	Seula-analyysi.....	60
5.4	Koneellinen lajittelu Dieffenbacher Panelboard Oy:ssa.....	60
5.5	Agglomerointi ja hienonnus.....	63
5.6	Ekstruusio	64
5.7	Materiaalin testausmenetelmät	65
5.7.1	Taivutuskimmomoduli ja taivutuslujuus	65
5.7.2	Vetolujuus.....	68
5.7.3	Iskusitkeys	68
5.7.4	Painaumakestävyys.....	70
5.7.5	Veden absorptio ja paksuusturpoama	71
6	TULOKSET	73
6.1	Toimipiste 1	73
6.1.1	Näytteen käsinlajittelu	73
6.1.2	Materiaalin murskaus.....	75
6.1.3	Sekoitetut jakeet.....	76
6.2	Toimipiste 2	77
6.2.1	Materiaalin käsinlajittelu	77
6.2.2	Materiaalin murskaus.....	78
6.2.3	Sekoitetut jakeet.....	79
6.3	Seula-analyysi.....	80
6.4	Koneellinen lajittelu Dieffenbacher Panelboard Oy:ssa.....	82
6.4.1	Toimipisteen 1 materiaali	82
6.4.2	Toimipisteen 2 materiaali	85
6.4.3	Jakeiden tiheydet.....	89

6.5	Lajiteltujen jakeiden koostumus	90
6.6	Koneellisesti lajittelematon referenssimateriaali	93
6.7	Komposiitin valmistus	95
6.7.1	Materiaalivalinta jakeista	95
6.7.2	Komposiitin raaka-aineet	96
6.7.3	Komposiitin valmistus	97
6.8	Komposiitin ominaisuudet	98
7	TULOSTEN TARKASTELU	102
7.1	Rakennus- ja purkujäte	102
7.2	Lajittelun tarkastelu	104
7.3	Komposiitin ominaisuuksien tarkastelu	107
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	112
	LÄHTEET	114
	LIITE	

Liite 1. Toimipisteiden käsinlajitellut materiaalit

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$a_2 - a_1$	Taipuman muutos testikappaleen keskellä
a_{CU}	Iskusitkeys loveamattomalle kappaleelle [kJ/m ²]
a_t	Paksuusturpoama
b	Testikappaleen leveys [mm]
D	Kuulan halkaisija [mm]
d	Painauksen halkaisijoiden keskiarvo [mm]
E_c	Törmäyksessä absorboitunut koekappaleeseen kohdistettu voima [J]
E_m	Taivutuskimmomoduli [GPa]
$F_2 - F_1$	Kuorman muutos kuorma-taipumakäyrän suoraviivaisella osalla [N]
F	Maksimivoima painaumakestävyyden määrittämisessä [N]
F_{max}	Maksimikuorma [N]
f_m	Taivutuslujuus [MPa]
g	Putoamiskiihtyvyys [m/s ²]
HB	Brinell-kovuus [N/mm ²]
h	Testikappaleen paksuus iskukokeessa
l_1	Tukien väli [mm]
s	Keskihajonta
t	Testikappaleen paksuus [mm]
t_1	Testikappaleen paksuus ennen vesiupotusta
t_2	Testikappaleen paksuus vesiupotuksen jälkeen
$\bar{x}$	Aritmeettinen keskiarvo
5ac67	ClassiCleaner jakeet 5ac, 6 ja 7
ABS	Akryylinitriilibutadieenistyreeni
ac	accept, erottimen ylite

EEA	Etyyli etyyliakryaatti
EMA	Etyyli metyyliakryaatti
EVA	Etyylivinyyliasettaatti
EVOH	Etyleenivinyylialkoholi
FINES	ClassiCleaner jakeet 1, 2 ja 3
HPS	Heavy Particle Separator
IR	Infrapuna
MAH	KytKentäaine
MAPE	KytKentäaine
MAPP	KytKentäaine
NaCl	Natriumkloridi
NIR	Near-Infrared, lähialueen infrapuna
PCB	Polyklooratut bifenyylit
PE	Polyeteeni
PE-HD	Korkeatiheyksinen polyeteeni
PE-HMW	Suurimolekyylipainoinen polyeteeni
PE-LD	Matalatiheyksinen polyeteeni
PE-LLD	Lineaarinen matalatiheyksinen polyeteeni
PE-MD	Keskitiheyksinen polyeteeni
PE-UHMW	Erittäin suurimolekyylipainoinen polyeteeni
PET-A	Amorfinen polyetyleenitereftalaatti
PET	Polyetyleenitereftalaatti
PEX	Ristiinsilloitettu polyeteeni
PP	Polypropeeni
PS	Polystyreeni
PU	Polyuretaani

PVC	Polyvinyylikloridi
rej	reject, erottimen alite
SAS	Sand Separator
STS	Small Stone Separator
TS%	Thickness Swelling, paksuusturpoama
UV	Ultravioletti
WA%	Water Absorption, veden absorption
XRF	X-Ray Fluorescence, röntgenfluorenssi
XRT	X-Ray Transmission, röntgentransmissio
ZnCl ₂	Sinkkikloridi

1 JOHDANTO

Jätteiden kierrätykseen voidaan ohjata taloudellisilla tai lainsäädännöllisillä toimenpiteillä. Rakennus- ja purkujätettä tuotetaan Suomessa jätetyypeistä eniten, mikäli kaivuujätettä ei oteta huomioon. Kierrättäminen ja ympäristötietoisuus ovat nousevassa trendissä, mihin ohjataan niin lainsäädännön, kuin yleisen mielipiteenkin avulla. Työtä alalla riittää ja kierrätysala onkin myös voimakkaasti kehittyvässä vaiheessa. Jätteen kierrättäminen on kuitenkin haastava prosessi, joka vaatii tehokkaan ja taloudellisen tavan erottaa hyödynnettävät materiaalit toisistaan jatkokäsittelyä varten. Rakennus- ja purkujätteen erotteluun kohdistuvia haasteita ovat muun muassa suuri materiaalin laadun vaihtelu kausittain ja alueittain. Useimmiten kierrätysmateriaalin valmistuksessa on tehtävä kompromissi kapasiteetin, puhtauden ja kustannusten välillä. Yksittäinen lajittelukone harvoin tuottaa riittävän puhdasta jätettä hyötykäytettäväksi, joten useimmiten lajittelukoneita on ketjutettava lajittelutavoitteiden saavuttamiseksi.

Rakennus- ja purkujäte koostuu monista materiaalilajikkeista, joiden hyödyntämistä on pohdittava useisiin eri käyttökohteisiin. Kierrätysmateriaalin puhtaus on kriittinen tekijä käyttökohteita valittaessa, jolloin epäpuhtaimpien jakeiden hyödyntäminen on haastavinta. Epäpuhtaat jakeet voivat tarkoittaa sekoittuneita ja sisällöltään vaihtelevia materiaaleja, joiden hyödyntämistä komposiitin valmistuksessa tässä tutkimuksessa käsitellään. Komposiitin teollisessa valmistuksessa on perinteisesti käytetty tunnettuja ja useimmiten neitseellisiä raaka-aineita, mutta kierrätysmateriaalien käyttö ja sen tuomat mahdollisuudet ovat alkaneet kiinnostamaan alan toimijoita.

1.1 Työn tausta

Perinteinen lineaarinen talous on raaka-aineiden kulutuksen, sekä ympäristökuormituksen kannalta kustannustehoton. Tässä mallissa luonnonvaroista otetaan materiaalia, josta tehdään tuote, mikä käytön jälkeen hävitetään kaatopaikoille tai energiantuotantoon. Euroopan unioni pyrkiikin muuttamaan tätä perinteistä mallia kohti kiertotalousajattelua, jossa materiaalien arvo kiertää mahdollisimman pitkään uusissa kierrätystuotteissa ja raaka-aineissa. Kiertotalousajattelu koskeekin kaikkia aloja, kuitenkin pääsektorit kiertotalouden omaksumiselle ovat muovien ja kriittisten raaka-aineiden kierrätyksessä, ruokajätteen

vähentämisessä, rakennus- ja purkujätteen hyödyntämisessä, sekä biopohjaisten tuotteiden käytön lisäämisessä. (Henry 2016, s. 2–5, 12.)

Euroopanlaajuisen lainsäädännön mukaan on päätetty, että rakennus- ja purkujätteestä tulee hyödyntää vuoteen 2020 mennessä vähintään 70 painoprosenttia materiaalia muutoin kuin energiantuotannossa tai polttamalla. Kaatopaikoille ei myöskään saa enää kyseisen vuoden jälkeen toimittaa materiaalia, joka sisältää yli 10 % biohajoavaa tai orgaanista jätettä. Useiden materiaalinhyödyntämislaitosten tuleekin kehittää omaa toimintaansa uuden lainsäädännön toteuttamiseksi. Kierrätystehokkuutta lisäämällä kilpailukenttä toisaalta kiristyy eri kierrätystuotteiden tullessa markkinoille, jolloin yritysten tulee kohdistaa omia resurssejaan entistä tehokkaammin. Toisaalta kierrätystehokkuutta lisäämällä on mahdollista saavuttaa suurempiarvoisia materiaaleja erilaisilla kierrätystuotteilla, mitkä aiemmin ovat menneet esimerkiksi energiantuotantoon. Jätteen lajittelua kehittämällä voidaan saavuttaa kierrättämällä hyödynnettäviä raaka-aineita, millä voidaan vaikuttaa välittömästi energiantuotantoon tai kaatopaikkasijoitukseen menevän jätteen määrään laskevasti. Kierrätysmateriaalien käyttöä lisäämällä voidaan lisäksi vähentää neitseellisten raaka-aineiden tarvetta, millä voidaan vähentää riippuvuutta esimerkiksi fossiilisiin polttoaineisiin tai louhittaviin materiaaleihin.

1.2 Työn tavoite ja rajaus

Tässä tutkimuksessa pyritään selvittämään rakennus- ja purkujätteen lajittelun tehokkuutta ja sen tuomia mahdollisuuksia kierrätystuotteiden valmistuksessa. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää Dieffenbacher Panelboard Oy:n laitteiston soveltuvuus tuottaa rakennus- ja purkujätteestä hyötykäytettäviä materiaaleja. Lajittelussa erottuneista epäpuhtaimmista jakeista valmistetaan komposiittimateriaalia Lappeenrannan teknillisen yliopiston Ruokolahden toimipisteen laitteistolla. Komposiitin valmistus on eräs mahdollinen hyötykäyttökohde kierrätetyille raaka-aineille, mikäli komposiitin ominaisuudet saadaan tavoitetulle tasolle. Komposiitille tärkeitä ominaisuuksia ovat yleisesti sen kestävyys ulkokäytössä, sekä riittävät mekaaniset ominaisuudet. Tässä työssä komposiitin valmistusmenetelmänä käytetään ekstruusiopuristusta, joka on yleisesti käytetty komposiittien valmistusmenetelmä. Materiaalin lajittelukoneena käytetään Dieffenbacher Panelboard Oy:n valmistamaa ClassiCleaner-laitetta, jonka tuottamien jakeiden puhtautta ja hyötykäyttömahdollisuuksia analysoidaan tulosten perusteella.

Työn konkreettisenä tavoitteena pyritään saavuttamaan kartoitus lajittelujakeista, joita voidaan saavuttaa ClassiCleaner-koneella rakennus- ja purkujätteestä. Lisäksi työn toinen konkreettinen tavoite on selvittää rakennus- ja purkujätteen käyttömahdollisuuksia komposiitin valmistuksessa. Tutkimuskysymyksiä tässä tutkimuksessa ovat:

- Kuinka paljon rakennus- ja purkujäte sisältää hyödynnettäviä raaka-aineita?
- Voidaanko ClassiCleaner-käsittelyllä saavuttaa hyötykäytettäviä materiaaleja?
- Voiko rakennus- ja purkujätteestä valmistaa hyödynnettävää komposiittia?

Kirjallisuustutkimuksessa käsitellään rakennus- ja purkujätteen määrää Suomen ja Euroopan tasolla, sekä sen kehitystä tulevaisuudessa. Lisäksi kirjallisuustutkimuksessa käsitellään yleisimpien rakennus- ja purkujätteen lajittelussa käytettävien koneiden toimintaperiaate ja niiden käyttötavat lajittelussa. Osana tutkimusta ovat lisäksi puumuovikomposiittien valmistusmenetelmät, sekä niiden tyypilliset raaka-aineet. Aineisto ja menetelmät kappaleessa käsitellään tutkimuksessa käytetyt laitteistot, materiaalinkäsittelymenetelmät, sekä käytetyt testausmenetelmät. Tulokset kappaleessa esitetään työssä saavutetut eri osa-alueiden tulokset, joita analysoidaan ja verrataan kirjallisuudessa esitettyihin tuloksiin kappaleessa tulosten tarkastelu. Johtopäätöksissä esitetään työn tuottama hyöty kokonaisuudessaan, sekä arvioidaan tulosten hyödyntämismahdollisuuksia.

Dieffenbacher Panelboard Oy on Nastolassa sijaitseva puupohjaisten levyjen laitetoimituksiin erikoistunut yritys, jonka erityisosaamisena ovat muun muassa lajittelulaitteistot ja muut levytuotteisiin liittyvät laitteet. Dieffenbacher Panelboard Oy on osa kansainvälistä Dieffenbacher yritysryhmää, jonka pääkonttori on Saksan Eppingenissä.

2 RAKENNUSJÄTE EUROOPASSA JA SUOMESSA

Rakennus- ja purkujätettä syntyy rakentamisessa, korjauksessa, uudistamisessa tai rakennusten poistossa. Rakennuksiin luetaan asuinhuoneistot, ei-asuttavat rakennukset ja tiet. Rakennus- ja purkujäte jaetaan yleisesti kolmeen kategoriaan, jotka ovat rakennukset, tiet ja kaivannot. Rakennus- ja purkujätteiden sisältöä on tavallisesti pidetty ympäristölle vaarattomana, ja kaatopaikkasijoittaminen jätteille on ollut yleistä. Nykyisin alan tutkimusta on kohdistettu kuitenkin materiaalien kierrätykseen ja uusiokäyttöön. Tähän vaikuttaa kaksi asiaa, jotka ovat ympäristöhaittojen tunnistaminen ja kierrätysarvon havaitseminen. Rakennus- ja purkujätteestä onkin esitetty, että siitä voidaan kierrättää noin 90 %, mikä vähentää kaatopaikkojen tarvetta. Jätteen seasta löytyy myös sellaisia partikkeleita, joita ei voida sijoittaa kaatopaikoille, vaan ne vaativat mukaisensa käsittelyn. (Christensen 2011 s. 105.)

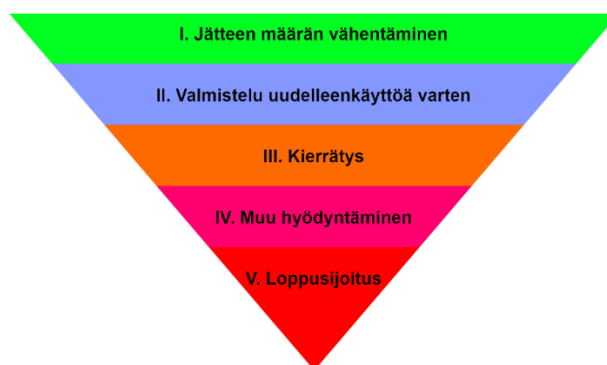
Rakennus- ja purkujätteen seasta löytyviä erityistä huomiota vaativia jätelajikkeita ovat esimerkiksi asbesti, kova ja pehmeä PVC (polyvinyylidikloridi), fenoleita sisältävä mineraalivilla, freoneja sisältävät eristeet, kreosoottia, arseenia, kuparia tai kromia sisältävä puu, formaldehydiä sisältävä vaneri, lyijyä sisältävät lasitetut laatat, sekä freoneja tai PCB-yhdisteitä (polykloorattu bifenyyli) sisältävät saumaustuotteet. Lisäksi rakennusmateriaalien likaantuminen voi aiheuttaa vaatimuksia materiaalien kierrätyksessä. Likaantumista aiheuttavia aineita ovat muun muassa terva, turve, öljy tai raskaat maalipinnat. Uudisrakentamisessa lainsäädännöllä on kielletty ympäristölle tai terveydelle vaarallisten tuotteiden käyttö, mutta vanhojen talojen purkutyömailta voi löytyä edelleen edellä lueteltuja jätejakeita tai muita vaarallisia jätteitä. (Christensen 2011, s. 107.)

Rakennus- ja purkujätettä syntyy Euroopassa yleisesti noin yli 500 kg henkilöä kohden vuodessa, mikä on esimerkiksi yhdyskuntajätteeseen verrattuna huomattavasti enemmän. Jätteen kierrätyksen taloudellisuuteen vaikuttaa kierrättäjien tehokkuus tuottaa paikallisesti tarvittavaa kierrätystuotetta tarpeeksi suuria määriä taloudellisesti kannattavasti, sekä jätteen tuottajien kyky toimittaa laadullisesti hyödynnettävää jätettä. Jätteen laatuun voidaan vaikuttaa merkittävästi syntypaikkalajittelulla, mikä laskisi lajittelukustannuksia. Lisäksi rakennus- ja purkujätteen käsittelyn aiheuttamat kulut kierrätystä varten tulee olla

pienemmät kuin jätteen vieminen kaatopaikalle. Tähän voidaan vaikuttaa lainsäädännöllä, sekä rakennus- ja purkujätteen vastaanottopisteiden sijoittelulla logistisesti tärkeisiin pisteisiin. Lisäksi vastaanottopisteiden materiaalin vastaanottomaksuilla ja hävityskuluilla on merkittävä vaikutus vastaanottopisteeseen tulevaan materiaalivirtaan. Kierrätystuotteiden markkinoinnissa on usein myös huomioitava, että valmistettavien tuotteiden hinnat tulee olla alhaisemmat verrattuna neitseellisistä raaka-aineista valmistettuihin. Näin ollen myös logistiikkakustannukset, materiaali- ja henkilöstökulut, sekä muut kulut tulee pitää kustannustehokkaina. (Christensen 2011, s. 243.)

2.1 Rakennusjäte Euroopassa

EU:ssa on 1990-luvulta alkaen pyritty ohjaamaan jätteenkäsittelyä suuntaan, jossa materiaalin hävikki olisi mahdollisimman pientä. Ohjaavana yleisperiaatteena EU:n jätepolitiikassa on ensisijaisesti ehkäistä jätteen syntyminen, jota seuraa valmistelu uudelleenkäyttöön, kierrätys, jätteen hyödyntäminen ja viimeisenä vaihtoehtona jätteen loppukäsittely. Kuvassa 1 on esitetty Euroopan komission jätehierarkian periaate. Euroopassa jätehuoltoa ja jätteiden syntymistä koskeva kehitys on ollut enimmäkseen positiivista. Jätehuollon parantuminen näkyy EU 28-maissa, sekä Islannissa ja Norjassa kaatopaikoille sijoitetun jätteen määrän huomattavana vähenemisenä vuosina 2004–2010. Kaatopaikalle sijoitetun jätteen kokonaismäärä kyseisinä vuosina laski 31 prosentista 22 prosenttiin. Parantamalla kierrätystekniikoita, jätehuollon perusrakenteita ja keräysasteita olisi mahdollista vähentää ympäristöpaineita tulevaisuudessa. Lisäksi Euroopan voitaisiin vähentää riippuvuutta luonnonvarojen tuonnista koskien myös joitain kriittisiä materiaaleja. Kierrätysmateriaaleilla voidaankin jo nykyään vastata huomattavaan osaan materiaalin kysynnästä EU:n sisällä. Esimerkiksi teräksen tuotannossa kierrätysmateriaalien osuus on ollut noin 56 %. Vaikka kehitys vaikuttaakin positiiviselta, on jätehuollon muututtava perusteellisesti, jotta voitaisiin asteittain luopua hyödynnettävän tai kierrätettävän jätteen kaatopaikkasijoittamisesta. (EEA 2015, s. 90–91.)



Kuva 1. Jätehierarkian periaate, missä ensisijaisena tavoitteena on vähentää jätteen määrää ja viimeisenä keinona nähdään jätteen loppusijoitus (mukaillen: European Comission 2008).

Euroopassa noin kolmannes kaikesta tuotetusta jätteestä on rakennus- ja purkujätettä. EU:n maissa jätettä syntyy arviolta noin 0,5 miljardia tonnia vuodessa. Tästä jätemäärästä noin 230 miljoonaa tonnia kierrätetään. On kuitenkin huomioitava, EU:n maissa jätteiden tilastointi ei ole helposti vertailtavaa maiden välillä ja luvut ovat usein epäluotettavia. Suomessa puujätteen suuri osuus rakennus- ja purkujätteestä laskee kierrätysprosenttia Euroopan keskimääräisestä 47 % tasosta Suomen 26 %:iin. Euroopan kärkimaita rakennus- ja purkujätteen kierrätyksessä ovat Hollanti ja Tanska, joissa molemmissa kierrätysprosentti on yli 90 %. (European Comission 2016, s. 1; Peuranen & Hakaste 2014, s. 11–12.)

Euroopan tasolla rakennus- ja purkujäte eroaa toisistaan niin laadullisesti kuin määrällisestikin. Lisäksi eroavaisuuksia tulee myös kierrätettävyydessä. Uusien rakennuskohteiden rakennusjäte on usein vähemmän lajikkeita sisältävää, vähemmän likaantunutta ja sen kierrätysmahdollisuudet ovat korkeammat verrattuna purkujätteeseen. Rakennusjätteen muodostumisen kannalta uudisrakentaminen kuitenkin tuottaa kohtalaisen pienen osuuden jätettä, Suomessa uudisrakentamisesta johtuva osuus on esimerkiksi vain noin 16 %. Lisäksi uudisrakentamisen jätteitä pyritään vähentämään myös siksi, että ne koetaan materiaalihukkana ja lisäkustannuksena työmaille. Purkujätettä syntyy taas huomattavasti enemmän ja se on enemmän likaantunutta ja sekoittunutta, mikä aiheuttaa enemmän hankaluuksia kierrätettävyyden suhteen. (Korpivaara et al. 2013, s. 10; Bio intelligence service 2011, s. 16.)

Euroopan tasolla Tanska, Suomi, Ranska, Saksa, Irlanti ja Luxemburg ovat suurimmat rakennus- ja purkujätteen tuottajat ja tuottavat rakennus- ja purkujätettä yli 2000

kilogrammaa asukasta kohden. Seitsemän pienintä jätteentuottajamaata Euroopassa ovat Bulgaria, Kreikka, Unkari, Latvia, Liettua, Puola ja Slovakia alle 500 kilogramman tuotannolla asukasta kohden. Maantieteellisen vaihtelun lisäksi rakennus- ja purkujätteen määrän suurta vaihtelua on selitetty taloudellisilla perusteilla ja arkkitehtuurisilla tottumuksilla. Rakennus- ja purkujätteen voidaan siis katsoa olevan sitoutunut maan talouskasvuun, minkä seurauksena maahan rakennetaan uusia rakennuksia. Arkkitehtuurisilla tavoilla viitataan tapaan valita materiaaleja rakennuksiin. Tällöin voidaan vertailla esimerkiksi joidenkin maiden tapaa käyttää tiiliä ensisijaisen rakennusmateriaalina, kun taas Pohjoismaissa, kuten Suomessa ja Ruotsissa puuta käytetään ensisijaisena rakennusmateriaalina. Suurimpia eroavaisuuksia aiheuttaa kuitenkin tilastoinnin laadun vaihtelu Euroopan maiden välillä. Kaikki maat eivät esimerkiksi ilmoita maanrakennustöistä syntyvää jätettä rakennusjätteenä, mikä on esimerkiksi Suomessa suurin yksittäinen rakennusjätteen syntymismuoto. (European Commission 2016 s. 1; Bio intelligence service 2011, s. 11–12.)

Euroopan rakennus- ja purkujätteen tuotantoa on arvioitu kahdella ennusteella vuosille 2005–2020. Ensimmäinen ennuste perustuu EUROSTAT:in tilastosarjoihin vuosilta 2005–2009, teollisuuden arvioihin 2009–2013, sekä arvioon aikavälille 2014–2020. Ennuste 2 perustuu uusrakennus-, korjausrakennus- ja purkuennusteisiin vuosille 2005–2020. Ennusteet ovat esitetty kuvassa 2. (Bio intelligence service 2011, s. 29.)



Kuva 2. EU:n alueen rakennus- ja purkujätteen ennuste vuoteen 2020 (Bio intelligence service 2011, s. 29).

Molemmat ennusteet käsittelivät talouskriisin toisistaan eroavalla tavalla, mutta molemmat ennusteet näyttävät samanlaisia merkkejä siitä, että rakennus- ja purkujätteen kokonaismäärä vuonna 2020 tulee olemaan noin 520 miljoonaa tonnia. On kuitenkin huomattava, että

ennusteet eivät ota huomioon maanrakennuksesta johtuvat jätteitä. Mikäli tämä materiaali- ja rakennusjätteen tuotantaa otettaisiin huomioon laskennassa, tuloksena olisi vuonna 2020 noin 2100 miljoonaa tonnia rakennus- ja purkujätettä. (Bio intelligence service 2011, s. 30.)

2.2 Rakennusjäte Suomessa

Rakennusteollisuus on erittäin merkittävä kiinteän jätteen tuottaja maailmanlaajuisesti. Suomessa vuoden 2011 virallisen tilaston mukaan rakentamisesta aiheutuvat jätteet ovat Suomessa suurin yksittäinen jätteen syntysektori, mikäli mineraalien kaivuu jätetään huomiomatta. Rakennusteollisuudesta aiheutuvia jätteitä syntyy tilaston mukaan yhteensä 17,8 miljoonaa tonnia kokonaisjättemäärän ollessa 96,6 miljoonaa tonnia. Rakentamisesta aiheutuvaa rakennus- ja purkujätettä Suomessa tuotettiin vuonna 2011 2,2 miljoonaa tonnia. Rakennusjätteitä toimitettiin esikäsittelyyn hyödyntämistä varten tai hyödynnettiin materiaalina yli 1,7 miljoonaa tonnia vuonna 2011. Tämä vastaa rakennusjätteiden osuudesta noin 77 prosenttia. 250 000 tonnia rakennusjätteistä päätyi kuitenkin hyödyntämättömänä kaatopaikoille. (Suomen virallinen tilasto (SVT) 2013, s. 1.) Vuoden 2014 kokonaisjättemäärä Suomessa on 96 miljoonaa tonnia, mistä 16 297 tuhatta tonnia on rakentamisesta aiheutunutta jätettä (Suomen virallinen tilasto (SVT) 2016, s. 1). Vuoteen 2011 verrattuna rakentamisesta aiheutuva jättemäärä on laskenut 8,4 %. Talonrakennuksesta syntyneestä rakennusjätteestä 57 % aiheutui korjaustyömailta, 27 % purkutyömailta ja 16 % uudisrakennuskohteista. (Kojo & Lilja 2011, s. 21.)

Rakennus- ja purkujäte koostuu pääosin puretusta betonista, tiilistä, muurauksista ja puusta. Lisäksi muita jätelajikkeita ovat eristeet, lasi, kipsilevyt, kattomateriaalit, putket, sähköjohdot, sekä kivet ja maaperä. Rakennus- ja purkujätteessä esiintyy lisäksi suurta vaihtelua riippuen ajankohdasta ja paikasta, josta se on kerätty. (Keskisaari, Butylina & Kärki 2016, s. 1.) Vaarallisia rakennus- ja purkujätelajikkeita voi lisäksi olla kyllästetty puu, elohopeavalaisinputket, asbestijäte tai jotkin sauma-aineet. Ongelmajätteiden osuus kokonaisjättemäärään suhteutettuna on noin 1 %. (Kojo & Lilja 2011, s. 24.) Rakennusjätteen muita yleisiä materiaaleja ovat lisäksi esimerkiksi lattiamatot, erilaiset eristeet, muoviset putket, bitumihuopa, kylpyhuonekalusteet, ikkunat, peilit ja lahopuut (HSY, 2016). Selvästi yleisin uudisrakentamisen jätteiden tuottajakohde on erilliset pientalot noin kolmanneksen osuudellaan, muita suuria tekijöitä ovat maatalousrakennukset,

asuinkerrostalot, vapaa-ajanrakennukset, teollisuusrakennukset ja muut rakennukset (Kojo & Lilja 2011, s. 21).

Suomessa talorakentamisen rakennusjäte koostuu suurimmaksi osaksi puupohjaisista jätteistä, joita jätteessä on 41 %. Muita jakeita ovat mineraali- ja kivi-jätteet, joita on 33 %, sekä metallijätteet, 14 %. Eurooppaan verrattuna Suomessa puun osuus rakennusjätteestä on merkittävän suuri, sillä Keski- ja Etelä-Euroopassa puuta on rakennus- ja purkujätteen seassa vain noin 5 %. Tulevaisuudessa tiukentuvat energiatehokkuusvaatimukset ja korjausrakennustarpeet voivat aiheuttaa rakennus- ja purkujättemäärien nousua, sillä Suomessa on suuri määrä sotien jälkeistä rakennuskantaa, jolla normaali käyttöikä alkaa lähennellä loppuaan. Tulevaisuuden rakennusjättemääriin vaikuttaa myös talouden suhdanteet, jotka vaikuttavat rakentamisen kustannuksiin. (Peuranen & Hakaste 2014, s. 11.)

Tulevaisuudessa rakentamisperiaatteen odotetaan muuttuvan vielä enemmän uudisrakentamisesta korjausrakentamiseen. Tämä aiheuttaa muutoksia myös tulevaisuuden rakennus- ja purkujätteen ominaiskertymässä, koostumuksessa ja kokonaismäärässä. Purkujätteen tuottajana tyypillisin purettava kohde on pienehkö puurakenteinen asuinrakennus. Tulevaisuudessa betonisten kerrostalojen käytöstä poistaminen ja purkaminen voi johtaa purkujätteen koostumuksen ja materiaali-jakauman muuttumiseen. Lisäksi tulevaisuuden rakennusjätteen laatuun vaikuttaa myös rakentamisen vaatimustason lainsäädännölliset kiristykset. (Kojo & Lilja 2011, s. 25.)

Rakennusjätteiden kierrättämisellä voidaan vähentää uusien materiaali-resurssien käyttöä, vähentää logistiikkakustannuksia, sekä vähentää kaatopaikalle joutuvan jätteen määrää. Rakennusjätteen hyödyntäminen onkin ollut aiempina vuosina merkittävä tutkimuksen kohde, ja uusia tekniikoita kehitellään jatkuvasti. Esimerkkejä rakennusjätteen hyödyntämisestä ovat betonin hyödyntäminen uusiobetonina tai tien pohjanrakennusaineena, lisäksi esimerkiksi kivivilla voidaan hyödyntää betoniteollisuudessa raaka-aineena. (Keskisaari et al. 2016, s. 1.)

Tulevaisuudessa metallien ja muovien hinnan nouseminen, sekä energian hinnan nostaminen voi ohjata rakennus- ja purkujätteen tarkempaan hyötykäyttöön ja kierrätystalousajatuksen entistä intensiivisempään hyötykäyttöön. Euroopassa vaaditaan jätteen tuottajan

käsittelemään jäte helposti hyödynnettävään muotoon, joka on eräs esimerkki ”jätteen tuottajan vastuusta”. Rakennus- ja purkujätteen tehokas ja taloudellinen hyödyntäminen vaatii kuitenkin toimivan lajittelujärjestelmän, joiden kehityksessä vaaditaan vielä tutkimusta ja työtä. (Dyer 2012, s. 2419.)

2.3 Lainsäädäntö rakennusjätealalla

Jätelain toisen luvun kahdeksannessa pykälässä määrätään, että kaikessa toiminnassa on noudatettava etusijaisuusjärjestystä. Kyseinen menetelmä tarkoittaa, että ensisijaisesti jätteiden syntymistä ja niiden haitallisuutta on vähennettävä mahdollisuuksien mukaan. Mikäli toiminnalla kuitenkin aiheutetaan jätettä, tulee jätteen haltijan valmistella jäte uudelleenkäyttöä varten. Toissijaisesti jätteenhaltijan tulee kierrättää jäte ja mikäli tämä ei ole mahdollista tulee jäte hyödyntää muutoin. Muita hyödyntämismenetelmiä voivat olla esimerkiksi energiantuottaminen jätteestä. Jätteen ollessa materiaalia, jota ei voi hyödyntää millään edeltävillä keinoin tulee se loppukäsitellä. (646/2011.)

Valtioneuvoston asetus jätteistä ohjaa rakennus- ja purkujätteenhaltijan järjestämään keräys siten, että jätelajakeet voitaisiin valmistella uudelleenkäyttöä, kierrätystä tai hyödyntämistä varten. Nämä jakeet ovat jätelain 15 § säättämien edellytyksen valtioneuvoston asetuksen 19.4.2012/192 mukaan seuraavat: ”

1. betoni-, tiili-, kivennäislaatta-, ja keramiikkajätteet;
2. kipsipohjaiset jätteet;
3. kyllästämättömät puujätteet;
4. metallijätteet;
5. lasijätteet;
6. muovijätteet;
7. paperi- ja kartonkijätteet;
8. maa- ja kiviainesjätteet.”

Jätelainsäädännön ja asetusten tavoitteena on vuoteen 2020 mennessä hyödyntää 70 painoprosenttia rakennus- ja purkujätteestä siten, että materiaali käytetään muuten kuin energiaksi tai polttoaineeksi. Tämä ei koske kuitenkaan vaarallisia jätteitä, eikä kallio- tai maaperästä irrotettuja maa- ja kiviaineksia. Maantäytössä jätettä saa käyttää vain, mikäli jätteestä olevaa biohajoavaa tai orgaanista materiaalia on enintään 10 %. (19.4.2012/179.)

Jätedirektiivin 2008/98/EY pyrkimyksenä on ohjata Euroopan alueella maita edistämään jätteiden uudelleenkäyttöä ja kierrätystä. Tämän lisäksi tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasujen määrää vähentämällä kaatopaikoille joutuneen jätteen määrää. Direktiivi ohjaa lisäämään vaarattoman rakennus- ja purkujätteen materiaalihyödynnysasteen, sekä jätteen valmistelun uudelleenkäytettäväksi yli 70 massaprosenttiin. Lisäksi direktiivissä ohjataan jäsenmaita tarkempaan tilastointiin jätteiden määrän ja käsittelyn osalta. Vuonna 2011 julkaistussa komission päätöksessä 2011/753/EU annetaan tarkempi ohjaus laskentatavoille ja säännöksille, joilla jätedirektiivin tavoitteiden seuraaminen todennetaan. Komission päätös antaa 20 nimikettä rakentamista ja purkamisesta aiheutuville jätteille, sekä lisäksi 7 nimikettä jätteiden mekaanisesta käsittelystä aiheutuville jätteille. (2011/753/EU; Peuranen & Hakaste 2014, s. 13.)

3 RAKENNUSJÄTTEEN KONEELLINEN EROTTelu

Kierrätettävien materiaalien jatkokäsittelymiseksi materiaalivirta tulee lajitella vaadittuun puhtausasteeseen. Lajitteluperusteita jätteelle voivat olla koko, magneettisuus, tiheys, sähkönjohtavuus ja väri. (Tchobanoglous & Kreith 2002, s. 277.) Sekalaisen rakennus- ja purkujätteen käsittelyyn tarvitaan usein erilaisia lajittelukoneita, jotka ovat ketjutettu toisiinsa prosessilaitteistoksi. Laitteet voivat toimia kuivina tai käsitellä materiaalia märkänä. Lisäksi rakennus- ja purkujätteen käsittelyssä tarvitaan osaavaa henkilökuntaa käyttämään laitteistoa, joka voi koostua tyypillisesti monipuolisesti pyöräkuormaajista, kuljettimista, rumpuseuloista, puun hakkureista, murskaimista, syöttösuppiloista, vasaramyllyistä, sekä muista laitteista. Henkilöstöä tarvitaan huoltamaan, korjaamaan ja käyttämään laitteita, sekä henkilöstön koulutus on myös ensiarvoisen tärkeää, jotta pystytään tuottamaan mahdollisimman laadukasta tuotetta tehokkaasti. Henkilökunnan on sitouduttava myös turvallisuusajatteluun työskennellessään vaarallisessa ympäristössä. (Peng, Scorpio & Kibert 1997, s. 52, 54–55.)

Rakennus- ja purkujätteen lajitteluun käytettävät laitteistot toimivat yleisesti vaihtelevasti, mutta tyydyttävällä tavalla. Täysin puhtaan kierrätystuotteen tuottaminen ei ole yleisesti tarkoituksenmukaisesta taloudellisista syistä. Paras ratkaisu rakennusjätteen lajitteluun on yleisesti kompromissi kustannusten ja kierrätystuotteen välillä. Lisäksi huomioonotettavia tekijöitä ovat tila- ja kapasiteettivaatimukset, sekä partikkelikoon vaihtelun määritys. (Mulder, de Jong & Feenstra 2007. s. 1412.)

Mekaaniset lajittelukoneet lajittelevat murskattua materiaalivirtaa tyypillisesti partikkelin koon ja kokojakauman, tiheyden, kosteuden, partikkelin muodon, sekä toisiinsa tarttuvuuden ja likaisuuden mukaan. (Tchobanoglous & Kreith 2002, s. 280.) Sensoritoimintaan perustuvat automaattiset lajittelulinjastot voivat erotella materiaaleja erilaisten materiaaliominaisuuksien perusteella, riippuen käytettävästä anturista. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi materiaalien erilainen tiheys, sähkönjohtavuus, magneettisuus tai kehittyneissä lajittimissa esimerkiksi näkyvän valon spektri. (Vegas et al. 2014, s. 122.)

Lajiteltava materiaali täytyy murskata koneellisen lajittelun suorittamiseksi. Lisäksi murskausta voidaan käyttää lisäämään tiheyttä helpottamaan varastointia, käsittelyä, sekä kuljetusta. Murskaus voidaan tyypillisesti toteuttaa joko korkeanopeuksisella iskulla tai korkeavääntöisellä leikkauksella. Korkeanopeuksisia iskeviä murskaimia ovat esimerkiksi vasaramyllyt, mitkä soveltuvat hyvin vaihtelevan materiaalin murskaukseen. Korkeavääntöiset murskaimet koostuvat vastakkaisiin suuntiin pyörivistä teristä, jotka repivät materiaalin murskaksi. Näissä kierrosnopeudet ovat merkittävästi pienempiä verrattuna iskeviin murskaimiin. Taulukossa 1 on esitetty esimerkkejä murskaintyypeistä, sekä niiden toimintatavasta ja kyseisellä koneella murskattavista materiaalityypeistä. (Tchobanoglous & Kreith 2002 s. 274–276.)

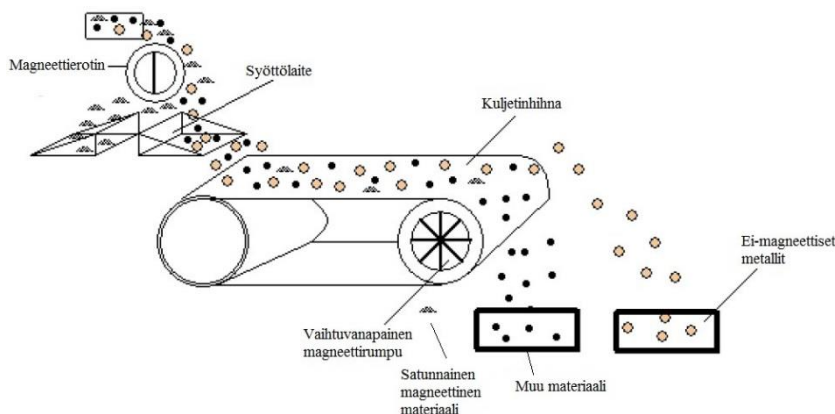
Taulukko 1. Murskaintyytit, toimintatapa ja materiaalityypit (mukaillen: Abraham, Lovell & Kim 1994 s. 758).

Laite	Toimintatapa	Materiaalityyppi
Hydraulivasara	Isku	Mureneva
Iskumurskain	Isku	Mureneva
Leukamurskain	Isku	Mureneva
Haketin	Leikkaus, halkominen	Ei-mureneva
Murskainmylly	Rouhintaa, isku	Mureneva ja ei-mureneva
Silppuri, leikkuri	Leikkaus, repiminen	Kaikki jätteet
Vasaramylly	Murskaus, repiminen, leikkaus, isku	Kaikki jätteet

Murskaimen valintaan vaikuttaa materiaalivirran tyyppi ja määrä, sekä murskan tavoiteltava partikkelikoko ja kokojakauma. Rouhintatyyppiset murskaimet soveltuvat mureneville materiaaleille, kun taas esimerkiksi veitsimurskainta käytettäessä metallit ja kivet tulee olla mahdollisimman hyvin poistettu laiterikkojen välttämiseksi. Vasaramyllyjä käytetään tyypillisesti karkeaan koon pienentämiseen, kun partikkelikoon jakaumalla ei ole suurta merkitystä. Kyseisiä murskaimia voi käyttää myös palavia ja paineistettuja kappaleita sisältäviä materiaaleja käsitellessä. (Tchobanoglous & Kreith 2002, s. 274–276.)

3.1 Pyörrevirtaerotin

Pyörrevirtaerotin on tehokas keino erotella ei-magneettiset metallit lajiteltavasta materiaalivirrasta. Lajittelutekniikka perustuu sähköä johtavien materiaalien ominaisuuteen vastustaa liikettä magneettikentässä ja vastaavasti kiihdyttää liikettä liikkuvassa magneettikentässä. Yleisimmin pyörrevirtaerotin on rakennettu siten, että materiaalipartikkelit kuljetetaan nopeasti pyörivän rummun ylitse, jonka pinnassa on vuorotellen erinapaisia magneetteja. Sähköä johtavat materiaalit seuraavat nopeasti liikkuvan rummun liikettä ja erottuvat kauemmas kuljetinhihnasta, kun taas sähköä johtamattomat materiaalit pysyvät kuljettimella ja putoavat lähemmäs rumpua. Kappaleiden lentorata perustuu maan vetovoiman, kuljetinhihnan kitkavoimien, ilmanvastuksen ja sähkömotorisen voiman yhteisvaikutukseen. Kuvassa 3 on esitetty pyörrevirtaerottimen toimintaperiaate. (Rem, Leest & van den Akker 1997, s. 1.)



Kuva 3. Pyörrevirtaerottimen toimintaperiaate. Kuvan laitteistossa magneettieroteltu materiaali ohjataan kuljettimella pyörrevirtaerottimella, joka erottelee ei-magneettiset materiaalit erilleen muusta materiaalista. Lisäksi pyörrevirran magneetti erottelee satunnaisen magneettisen materiaalin vielä erikseen. (Mukaillen: Wang et al. 2014, s. 180.)

Pyörrevirtaerottelussa etuina ovat hyvä lajittelutehokkuus, hyvä liitettävyyys muuhun prosessiin, luotettava mekaaninen rakenne, laitteen kevyt massa, vahva ja säädettävä magneetin voimakkuus ja korkea tuottavuus. Tärkeimmät lajiteltavat materiaalit pyörrevirtaerottimella ovat sähkökaapelit, alumiinituotteet, romuautot, ei-magneettiset lastut, piirilevytuhka, metallia sisältävät ei-magneettiset lasipalat, elektroniikkaromu, monimetallijae, valukuparin tai valualumiinin hiekka ja alumiinikuona. (Wang et al. 2014,

s. 177–178.) Pyörrevirtaerotinkokoonpanoon kuuluu yleisesti tärinäkuljetin, säädettävä jakolevy ja suurinopeuksinen kuljetin (Collins 2012 s. 42).

3.2 Magneettierotin

Magneettierottimia käytetään poistamaan metalliset magneettiin tarttuvat materiaalit muusta nestemäisestä tai kuivasta materiaalivirrasta. Poistettavia partikkeleita ovat muun muassa naulat, pultit, ruoste, langat sekä muut metalliset epäpuhtaudet. Magneettierottimia valmistetaan useisiin eri käyttökohteisiin erilaisella rakenteella, sekä erilaisista magneettimateriaaleista. Magneetit voidaan jakaa sähkömagneetteihin ja kestopagneetteihin, joiden valinta riippuu käyttökohteesta (Tchobanoglous & Kreith 2002, s. 282).

Yleisimpiä kestopagneettimateriaaleja ovat Alnico, keraamit ja harvinaiset maametallit. Yleisesti magneettimateriaali päällystetään ruostumattomalla teräksellä, tai muulla kulutusta kestäväällä materiaalilla magneetin suojaamiseksi. Alnico on ensimmäisiä magneettierottimissa käytettyjä materiaaleja, kuitenkin nykyään kustannussyistä harvemmin käytetty. Alnico-materiaali koostuu alumiinista, nikkelistä, koboltista ja raudasta. Magneettimateriaalin käyttökohteita nykyään ovat kohteet, joissa lämpötila kohoaa yli 200 °C. Alnicon lujuus on keraameihin verrattava ja sillä voidaankin poistaa suuria partikkeleita, kuten pultteja ja muttereita. Myös keraamisten magneettien käyttökohteet ovat suurten partikkeleiden poistossa. Keraamisten magneettien käyttö oli yleisintä 1960–1980-luvuilla. Harvinaisista maametalleista, eli nykyään lähinnä neodyymi-rauta-booriset magneetit ovat syrjäyttäneet määrätyissä kohteissa keraamiset magneetit yli kymmenenkertaisella tehollaan. Näiden magneettien teho riittää poistamaan materiaalivirrasta hienot, sekä heikosti magneettiset partikkelit, kuten ruosteen, hilseen ja jopa ruostumattoman teräksen. Käyttökohteesta riippuen magneettikenttä voidaan rakentaa kapeaksi ja syväksi, leveäksi ja laajaksi tai siltä väliltä. Magneettikentän ominaisuuksista johtuen eri magneettien tehon vertailu voi olla hankalaa. (Collins 2012, s. 36.)

Magneettierottimen soveltuvuus kohteeseen riippuu lämpötilasta, materiaalin virtausnopeudesta, virtausominaisuuksista, sekä muista prosessiin liittyvistä ominaisuuksista. Kestomagneetit menettävät tehoaan korotetuissa lämpötiloissa, eikä menetetty teho välttämättä palaa magneetin jäähtyttyä. Magneettierotinta hankkiessa onkin

ensiarvoisen tärkeää tietää käytettävän prosessin lämpötila. Materiaalivirran paksuuden pienetessä partikkelit jakautuvat magneettierottimelle otollisempaan tilaan. Materiaalivirran paksuuteen voidaan vaikuttaa prosessin virtausnopeudella. Muut materiaalivirran ominaisuudet riippuvat esimerkiksi materiaalivirran kosteudesta ja partikkelikoosta. Lisäksi muita prosessiin liittyviä ominaisuuksia ovat esimerkiksi magneetin puhdistettavuus, materiaalivirran tasaisuus, magneetin siirrettävyys asennuspaikkaan, sekä tärkeimpänä vaadittavan lopputuotteen puhtausasteen vaatimustaso. (Collins 2012, s. 37.) Tyypillisesti magneettierottimien kierrätystehokkuus magneettiselle materiaalille on noin 95–99 %. Kierrätetyn magneettisen materiaalin puhtausaste riippuu materiaalivirran tyypistä, sekä partikkelikoosta. Tyypillinen puhtausaste kierrätetylle magneettiselle materiaalille on noin 95–98 %. Epäpuhtaalle ja takertuvalle materiaalille tyypillisiä puhtausasteita voivat olla 60–80 %. (Tchobanoglous & Kreith 2002, s. 282.)

Magneettierotinta valittaessa tulee huomioida myös, miten materiaali kuljetetaan magneetille, sekä miten leveä kuljetinhihna on, jotta magneetilla saadaan riittävä kattavuus koko leveydelle. Erottimissa on myös huomioitava suurimpien partikkeleiden koko, sekä kuljettimen taipumus kasata materiaalia, mitkä voivat johtaa tukoksiin linjalla. Lisäksi magneettiseen materiaaliin tarttuvat epäpuhtaudet, niiden määrä ja koko, vaikuttavat erottimen valintaan. Lisäksi muita toiminnallisia kysymyksiä erottimen hankinnassa on toivottu virrankulutus, tilavaatimukset, rakenteelliset vaatimukset, magneetin jäähdytyksen tarve, kuljettimen nopeus ja leveys, magneetin vahvuus, kulkureitti magneetille, sekä kunnossapito. (Tchobanoglous & Kreith 2002, s. 282.)

Rakennus- ja purkujätteen erottelussa magneettierottimelta vaaditaan itsestään puhdistuvuutta, joten erotin on toteutettu yleisesti rumpumaisena tai kuljettimen yläpuolisena magneettina tai se on kuljetinpyöränä kuljetinhihnan päässä. Kuljettimen päähän sijoitettu magneettierotin kuljettaa magneettista materiaalia hihnan alle, jossa materiaali irtautuu erottimen magneettikentästä eri keräyspisteeseen verrattuna magneettiin tarttumattomaan materiaaliin. Myös rumpumagneetti on itsestään puhdistuva erotin, jossa magneetti pysyy liikkumattomana ja kotelona toimiva rumpu pyörii. Materiaalivirta ohjataan rummun pinnalle magneettikenttään, jossa magneettiin tarttuvat materiaalit kulkeutuvat kuljettimessa pidemmälle ja erottuvat täten muusta materiaalista. Rumpu- ja

kuljetinpyörämagneetit ovat valmistettu usein keraamisista kestopagneeteista. (Collins 2012, s. 42.)

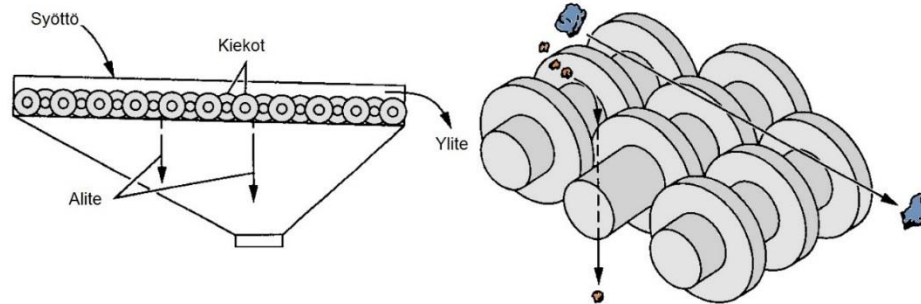
Kuljetinpyörässä olevia magneetteja käytetään usein kohteissa, joissa vaaditaan kustannustehokasta erottelua pienille määrille magneettista materiaalia. Kun on tarve poistaa suuria määriä voimakkaasti magneettista materiaalia, käytetään kestopagneettierottimia, jotka voivat olla rumpumagneetteja tai kuljetinpyörän yläpuolisia magneetteja. Sähkömagneetteja voidaan käyttää kohteissa, joissa materiaali on heikosti magneettista. Kuljetinpyörässä olevaa magneettia ja rumpumagneettia vertailtaessa tulee ottaa huomioon, että kuljetinpyörässä oleva magneetti kuluttaa kuljetinpyörän rumpumagneettia enemmän. Rumpumagneetissa naulat ja muut terävät partikkelit kulkeutuvat metallista pintaa vasten, kun taas kuljetinpyörä poistaa magneettiset materiaalit kuljetinpyörän rumpumagneettia vasten. (Tchobanoglous & Kreith 2002, s. 283.)

3.3 Kiekkoseula ja rumpuseula

Seulaa voidaan käyttää lajittelulinjaston alkupäässä parantamaan lajittelua ja materiaalin puhtausastetta. Seulat voidaan jakaa tasoseuloihin ja rumpuseuloihin. Yleisimmät tasoseulatyypit ovat täryseula ja kiekkoseula. Muita seuloja ovat muun muassa kauhaseulat, tankoseulat ja erikoisseulat (Christensen 2011, s. 330–331). Tähtiseulaa voidaan pitää eräänä kiekkoseulan yleisesti käytettynä tyyppinä. Seulalaitetta valittaessa tulee ottaa huomioon käytettävä partikkelikoko, sekä sen jakauma ja muoto, irtotiheys, kosteus, likaisuus, sekä materiaalipartikkeleiden tarttuvuus toisiinsa. Seulomisen tehokkuus on suuri silloin, kun materiaalipartikkelien koko poikkeaa mahdollisimman suuresti toisistaan, sekä partikkelikoko on merkittävästi suurempi tai pienempi kuin seulan verkkokokoko. (Spencer 2007, s. 22; Tchobanoglous & Kreith 2002, s. 278, 280.)

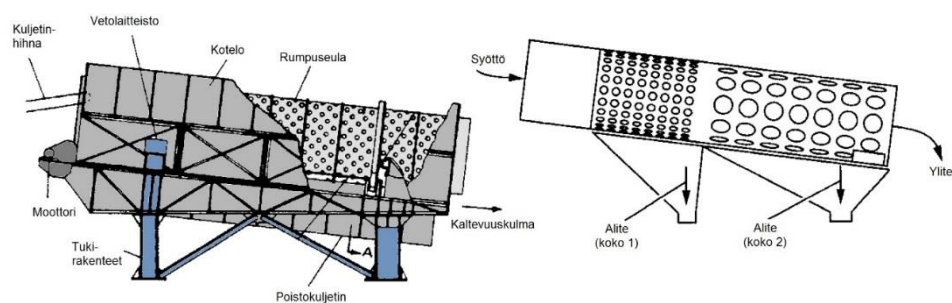
Kiekkoseula koostuu akselille kootuista kiekkoista, jotka voivat olla tähden, kuusikulmaisen tai muun muotoisia riippuen käyttökohteesta. Kiekkoseulassa seulontavälit muodostuvat limittäin olevien kiekkojen ja akselien väliin. Seulakokoa muutetaan vaikuttamalla akselien etäisyyksiin toisiinsa. Usein tämä väli on kuitenkin kiinteästi rakennettu, jolloin seulakoko tulee olla määritetty seulaa hankittaessa. Kiekkoseulonnassa on huomioitava, että käsiteltävät jätteet voivat rikkoutua käsittelyssä, jolloin seulontatuloksena voi muuttua oletetusta. Tämä ilmiö esiintyy etenkin tähtiseuloissa, ja sitä voidaan vähentää siirtymällä enemmän

pyöreänmuotoisiin kiekkoihin, sekä pyöristettyihin reunoihin. Kuvassa 4 on esitetty kiekkoseulan toimintaperiaate. (Christensen 2011, s. 331.)



Kuva 4. Kiekkoseulan toimintaperiaate. Materiaali syötetään seuralle, jossa samaan suuntaan pyörivät kiekot tai tähdet vyöryttävät materiaalia eteenpäin seuralalla. Seulan läpi menevä materiaali kulkeutuu alitteeseen ja materiaali, joka ei mahdu seuralasta läpi kulkeutuu ylitteeseen. (Mukaiillen: Tchobanoglous & Kreith 2002, s. 285.)

Seulojen päätyyppi tasomaisten seulojen rinnalla on pyörivät rumpuseulat. Rumpuseula vyöryttää lajiteltavaa materiaalia pyörivän sylinterinmuotoisen seulan läpi. Joissain malleissa rumpuseulassa voidaan käyttää vettä osana erottelua, jolloin voidaan erottaa esimerkiksi kivet puu-kuorimateriaalista. Kuvassa 5 on esitetty rumpuseulan toimintaperiaate. (Spencer 2007, s. 22.)



Kuva 5. Rumpuseulan toimintaperiaate. Rumpuseulassa kuljettimella syötetään materiaalia pyörivään seulaan. Kallistuksen tai spiraalinmuotoisten ohjainten avulla materiaali kulkeutuu eteenpäin seulassa, jossa voi olla esimerkiksi kahta seulaverkkokokoa. Kahta aukkokokoa seulassa käytettäessä on kuitenkin huomioitava, ettei toiselle seulakoolle välttämättä saavuteta optimaalista pyörimisnopeutta. (Mukaiillen: Christensen 2011, s. 330; Tchobanoglous & Kreith 2002, s. 284.)

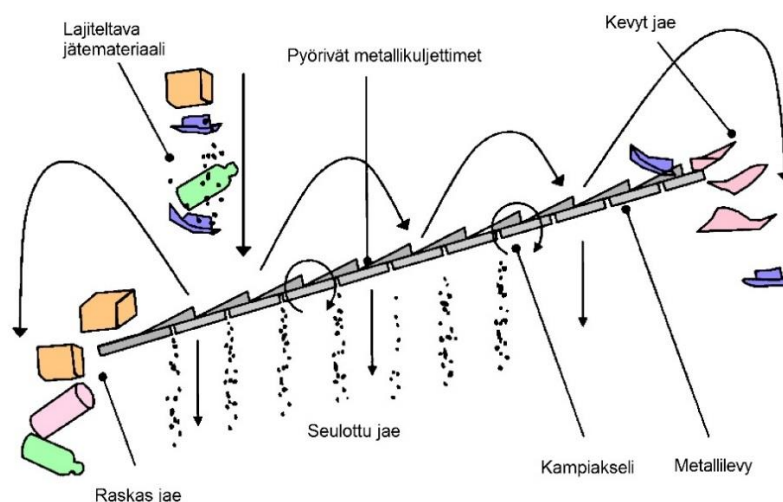
Rumpuseulaa voidaan hyödyntää materiaalin lajittelulinjan alussa, kuin myös materiaalin viimeisessäkin seulonnassa. Seulonnan tehokkuuteen ja tarkkuuteen voidaan vaikuttaa seulan reikien koolla, pyörimisnopeudella, seulan kaltevuudella, rummun halkaisijalla, sekä välilevyjen määrällä ja muodolla. Seulontatehokkuuden lisäämiseksi seularummun sisäpinnalle voidaan asentaa levyjä tai muita varusteita, minkä tarkoituksena on kuljettaa materiaalia mahdollisimman korkealle rummun seinämää. Rumpuseulonta perustuu siihen, että materiaali vyöryy seulassa kunnes löytää sopivan aukon, josta partikkeli mahtuu läpi. Materiaalin pyörimistapoja rummussa ovat sentrifuginen, vyöryttävä ja sekoittava, joista jälkimmäinen on tavoiteltavin ja tehokkain seulontatapa. Tällöin materiaali pyörii rummussa mahdollisimman korkealle, ja lakipisteessä irtaana rummun pinnasta pudoten takaisin seulapinnalle. (Christensen 2011, s. 329.)

Rumpuseulan asettaminen yli 5 asteen kulmaan aiheuttaa merkittävän puhdistustehon laskun seulan toiminnassa. Hyvin pieniä kulmia käytettäessä rumpuseula voidaan varustaa spiraalinmuotoisilla kuljettimilla, jotka kuljettavat materiaalia vaikka ilman kallistusta. Rumpuseulan parametreja säätäessä on pyrittävä siihen, että syötettävän materiaalin virta on suhteessa rummun pinta-alaan, sekä pitoaikaan rummussa. Murskaamattomalle yhdyskuntajättemateriaalille pitoaika voi olla vähintään 25–30 s. (Christensen 2011, s. 329–330.)

Huang et al. (2002) tutkivat rakennus- ja purkujätteen lajittelua linjastossa, joka koostui täryseulasta, rumpuseulasta, kiekko-seulasta, magneettierotimesta, ilmaerotimesta ja käsinlajittelusta. Rakennusjäte toimitettiin yli 300 mm partikkelikoossa, joka ohjattiin tankoseulan läpi rumpuseulaan, jossa materiaalista saadaan jakeiksi karkeaa ja hienoa soraa. Hieno sora voidaan seuloa esimerkiksi kiekko-seulalla, jolloin saadaan hiekkaa ja maata (<20 mm), sekä 20–40 mm soraa. Soran ja maan erotuksen jälkeen materiaalivirta ohjataan magneettierottimeen, jossa saadaan rautametallit erotettua. Tämän jälkeen materiaalivirrasta erotetaan ilmaerotimella paperit ja pahvit. Työn tuloksena saavutettiin matalakustannuksinen malli erottelemaan hiekkaa, soraa, kiviä, metallia ja puulastuja. Tutkimuksen kohdemaassa Taiwanissa kierrätettyjen raaka-aineiden hinta on liian alhainen, kannattavaan liiketoimintaan. (Huang et al. 2002, s. 27, 35–36.)

3.4 Ballistinen erotin

Ballistisella erottimella voidaan käsitellä monipuolista jätettä ja sen käyttökohteet ovat laaja-alaiset. Ballistisella erottimella voidaan esimerkiksi lajitella sekalaista rakennus- ja purkujätettä, erilaatuisia muoveja toisistaan tai paperia ja pahvia, sekä sillä on monipuolisia käyttökohteita muun muassa kierrätyspolttoainelaitoksissa. Ballistinen erotin lajittelee materiaalia tiheyksien, elastisten ominaisuuksien, muodon ja koon mukaan. Lajittelun lisäksi ballistinen erotin tekee kokoluokittelua seulan avulla, jolloin erottimesta tulee tuotteena vähintään kolmea jaetta. Erottelu perustuu kappaleiden erilaisiin lentoratoihin, kun ne iskeytyvät jatkuvasti rinnakkaisiin metallilevyihin, jotka värähtelevät epäkeskisesti toisiaan vastaan kaltevassa pinnassa. Kuvassa 6 on esitetty ballistisen erottimen toimintaperiaate. (Velis et al. 2011, s. 1030.)



Kuva 6. Ballistisen erottimen toimintaperiaate. Ballistisessa erottimessa lajiteltava jätemateriaali putoaa erottimelle, jossa kiertokankien päähän asennetut metallilevyt lajittelevat materiaalit epäkeskisessä liikkeessä erilaisten lentoratojen mukaan. Kevyt kaksikulotteinen jae kulkeutuu ylöspäin ja raskas jae laskeutuu alaspäin. Lisäksi seulottava jae putoaa seulaverkon läpi. (Mukaillen: Velis et al. 2011, s. 1032.)

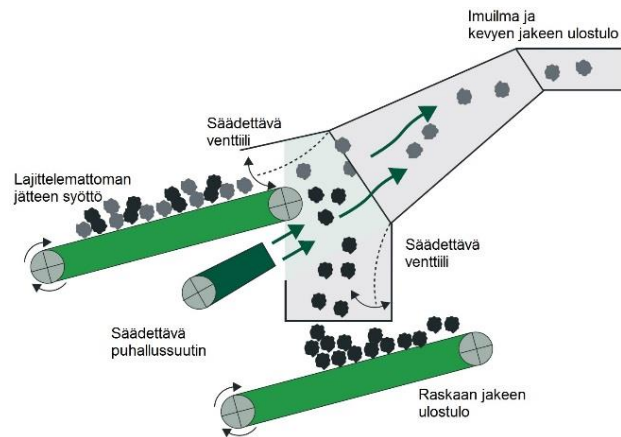
Kevyet, pehmeät ja litteät partikkelit kulkeutuvat ballistisessa erottimessa ylöspäin, kun taas raskaat, kovat ja kolmiulotteiset partikkelit laskeutuvat alaspäin. Kevyttä jaetta voi olla esimerkiksi paperi, kartonki, pakkausmuovit ja kalvot. Raskasta jaetta voi olla esimerkiksi pullot, kovat muovit, puu tai metallit. Seulan läpi voidaan erotella hieno jae ja pienikokoiset partikkelit, kuten hiekka tai villakuidut. (Velis et al. 2011, s. 1030–1032.) Ballistisen erottimen erottelun säätäminen tapahtuu laitteen kallistuskulmaa säätämällä. Tavallisesti

kallistus on noin 15–20 %. Erottimen levyjen porrastettu liike saadaan kiertokankien avulla. Lisäksi levyt ovat tyypillisesti vaihdettavia huoltoa varten. (Christensen 2011, s. 338.)

Palavilla ja palamattomilla materiaaleilla on merkittävä tiheysero, jota voidaan hyödyntää kierrätyspolttoaineen valmistuksessa materiaalien erottelussa. Palavien materiaalien tiheys on yleisesti alle 1000 kg/m^3 , kun palamattomien materiaalien tiheys on yleisesti yli 2000 kg/m^3 . On huomioitava, että veden imeytyminen muuttaa materiaalien tiheyksiä, etenkin pahvin ja paperin tapauksissa, jolloin puhtaasti tiheyteen perustuvien lajittelukoneiden erottelutehokkuus voi muuttua merkittävästi. Ballistinen erottelu lajittelee materiaalia kuitenkin myös muiden ominaisuuksien perusteella, jolloin tiheyden muutos ei aiheuta niin radikaalia muutosta erottelutehokkuudessa. (Velis et al. 2011, s. 1032–1033.)

3.5 Ilmaerotin

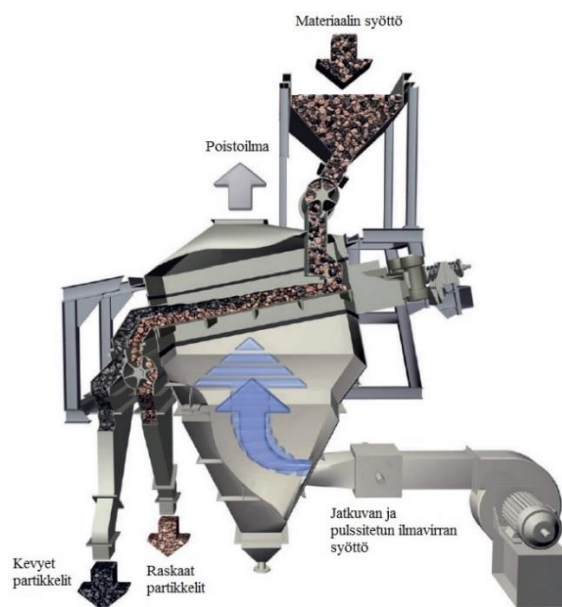
Ilmaerotin on perinteinen jätteiden seulontaan käytetty laite. Materiaalivirta ohjataan ilmavirtaan, jossa kevyemmät materiaalipartikkelit kulkeutuvat ilmavirran mukaan erottuen täten raskaammista partikkeleista. Ilmaerottimia valmistetaan useita erimallisia, joita ovat esimerkiksi suora ilmaerotin, zig-zag-erotin, pinottu kolmioerotin ja syklonilla toteutettu tyypillinen erotin, sekä useampikammioiset ilmaerottimet. Ilmaerottimen valinta riippuu vaaditusta lajittelutehokkuudesta ja käytettävissä olevasta tilasta ja budjetista. Halvin ja pienin ilmaerotin on suora ilmaerotin, mutta kyseisen laitteen lajittelutehokkuus jää myös muita laitetyppejä pienemmäksi. Zig-zag-erottimen lajittelutehokkuus on suoraa erotinta parempi, mutta vaatii myös enemmän tilaa, sekä vaatii syötettävältä materiaalilta yhtenäistä partikkelikokoa. Pyörivällä rummulla toteutetussa ilmaerottimessa voidaan käyttää suurinta partikkelikokojakamaa, sekä se on ilmaerottimista tehokkain. Kyseinen ilmaerotintyyppi on kuitenkin kallein ja vaatii eniten lattiatilaa. (Tchobanoglous & Kreith 2002, s. 286.) Ilmaerottimet vaativat lisäksi syklonin tai muunlaisen suodattimen pölyämisen torjumiseksi (Peng et al. 1997, s. 52). Kuvassa 7 on esitetty tyypillisen ilmaerottimen toimintaperiaate.



Kuva 7. Ilmaerottimen toimintaperiaate (mukaillen: Bulk handling systems 2011, s. 2).

3.6 Ilmanohjain

Ilmaohjain (Air jig) koostuu kuljettimesta, jonka läpi puhalletaan ilmaa jatkuvana, sekä pulssitettuna ilmavirtauksena. Ilmavirtauksia säätämällä voidaan kerrostaa kevyet materiaalit painavampien päälle ja täten erottaa kyseiset materiaalit toisistaan. Ilmanohjaimet ovat varustettu sensoreilla, jotka mittaavat erotettujen kerrosten paksuuden ja säätävät materiaalin jakoläpän siten, että materiaalikerrokset erottuvat toisistaan. Ilmaohjain on eräs muunnos perinteisemmästä vesierottimesta. Tyypillisesti ilmaohjainta voidaan käyttää esimerkiksi betonin tiilen erottamiseen muusta materiaalista. Kuvassa 8 on esitetty ilmaohjaimen periaate. (Pacheco-Torgal et al. 2013, s. 221–222.)



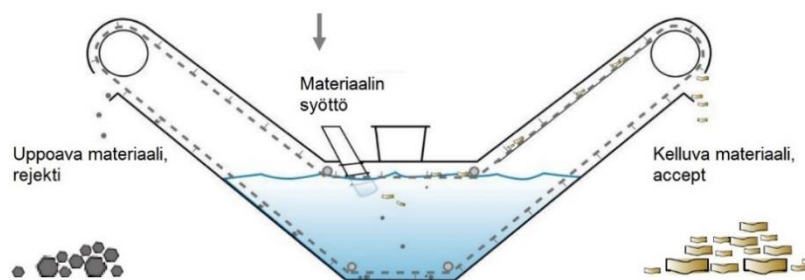
Kuva 8. Ilmanohjaimen toimintaperiaate (mukaillen: Allmineral 2016, s. 10).

Ilmaerottelussa lajiteltavassa materiaalissa tapahtuu toistuvaa paisumista ja tiivistymistä riippumatta käytetäänkö vettä tai ilmaa. Kyseinen menetelmä vettä käyttäen on eräs vanhimmista malmin erotteluun käytetyistä menetelmistä, ja on ennustettu, että käyttö laajentuu merkittävästi rakennus- ja purkujätteen lajittelun parissa. Ilmaohjaimia käytetään laajasti myös hiilen rikastukseen. Laitteiston etuihin kuuluu kustannustehokkuus, pienet käyttökulut, lujatekoinen rakenne helppokäyttöisyys ja laaja partikkelikokojakauma. (Sampaio et al. 2016. s. 63–64.)

Sampaio et al. (2016) tutkivat 4–20 mm kokoisten betoni-, tiili- ja kipsipartikkeleiden erottumista ilmaohjaimen avulla tavoitteenaan saada erotettua kipsi kevyenä materiaalina ja betoni raskaana materiaalina toisistaan. Tutkimuksessa säädettiin kolmea parametria, jotka olivat lajittelun kesto, taajuus ja paisuntasuhde. Taajuudella tarkoitetaan paisumistiivistymissykliä määrää minuuttia kohden. Tutkimuksessa saavutettiin noin 25 kertainen kipsipartikkeleiden väheneminen betonin seasta. Raskaaseen jakeeseen saavutettiin yli 90 % puhdasta betonia, ja kevyeen jakeeseen saavutettiin 70 % puhdasta kipsipartikkeliä. Paras erottuminen saavutettiin pienimmällä lajitteluajalla, 30 s, taajuuden ollessa 160 sykliä minuutissa ja paisuntasuhteen ollessa 70 %. (Sampaio et al. 2016. s. 68–72.)

3.7 Upotus-kellutus

Upotus-kellutusmenetelmä on eräs vanhimmista muovien lajitteluun käytetystä erottelumenetelmästä. Menetelmässä hyödynnetään materiaalien eri tiheyksiä, jolloin nestettä tiheämmät partikkelit uppoavat nesteeseen ja nestettä kevyemmät partikkelit jäävät pinnalle. Menetelmä soveltuu hyvin käytettäväksi kohteisiin, joissa eri materiaaleja on vain muutamia. Käyttökohteita ovat esimerkiksi PP (polypropeeni)- ja PET (polyetyleenitereftalaatti)-muovien erottaminen toisistaan. Veteen upotettaessa PP-muovi jää pinnalle ja PET-muovi uppoaa. Muita käyttökohteita ovat esimerkiksi puumateriaalin erottaminen kivistä, hiekasta ja posliinista. Kuvassa 9 on esitetty kellutus-upotusmenetelmän periaate. (Dodbiba & Fujita 2004, s. 170–172.)



Kuva 9. Upotus-kellutuslaitteiston periaate. Materiaali syötetään neste-erottimeen, jossa raskaat partikkelit uppoavat nesteen pohjalle ja kelluva materiaali jää pinnalle. Kuljettimet siirtävät materiaalit omiin keräyspisteisiin. (Mukaillen: Dieffenbacher GmbH 2015a, s. 42.)

Yleisimmät upotus-kellutusmenetelmässä käytettävät nesteet ovat puhdas vesi, vesi-metanoliseos keveille tiheyksille, sekä NaCl (natriumklordi)- tai ZnCl_2 (sinkkikloridi)-liuokset raskaille tiheyksille. Puhdas vesi soveltuu käytettäväksi PP- ja PE (polyeteeni)-muovien erottamiseen muista muoveista. On kuitenkin huomioitava, että kaikki muu kelluva materiaali, kuten puu tai korkki, huonontavat kelluvan materiaalin puhtausastetta. Vesiupotustankit voivat olla puhdistuslinjastossa sarjassa, jolloin yhden tankin tehtävänä on erottaa tietty materiaali- ja virrasta. Sarjassa olevia vesiupotustankkeja voidaan käyttää esimerkiksi rakennusjätteen lajitteluun. Menetelmä on kuitenkin hidas ja hankalasti säädettävä. Lisäksi puhdistustulos ei ole monipuolisessa materiaalivirrassa kovinkaan hyvällä tasolla verrattuna muihin puhdistusprosesseihin. (Delgado & Stenmark 2005, s. 6–7.)

Upotus-kellutusperiaatteen negatiivisiin piirteisiin kuuluu puhdistuksessa käytetyn jäteveden hävitykseen liittyvät kulut, sekä vesierottelussa mahdollisesti käytettävien reagenssien hinta. Upotus-kellutusmenettelyssä on myös väistämätöntä, että käsiteltävä materiaali kastuu, mikä hankaloittaa materiaalin jatkokäsittelyä, sekä materiaalin kuivausprosessi aiheuttaa kuluja. Näiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta kuivaerottelumenetelmät ovat usein upotus-kellutusmenetelmää kustannustehokkaampia. (Dodbiba & Fujita 2004, s. 173.)

3.8 Kuivalla raskaalla väliaineella tehtävä erottelu

Erikokoisia materiaaleja pystytään erottelemaan tehokkaasti erilaisilla seuloilla. Yleisesti partikkeleiden koko kuitenkin vaihtelee, jolloin seulonta ei välttämättä ole tehokas

menetelmä. Lisäksi partikkeleilla on yleisesti jakauma tiheyden mukaan. Upotus-kellutus-menetelmää käyttämällä pystytään tehokkaasti erottamaan eri tiheyksisiä materiaaleja, mutta erottelumenetelmässä on myös negatiivisia piirteitä, kuten pakkaneen, jäteveden hävitys ympäristöystävällisesti, sekä veden saanti haastavissa ympäristöissä. Partikkeleiden erottelemiseen on kehitetty lähinnä hiiliteollisuudesta lähtöisin oleva kuivalla raskaalla väliaineella tehtävä erottelu. (Tanaka & Song 1996, s. 29–30.)

Kuivalla raskaalla väliaineella tehtävä erottelu, eli leijupetierottelu, perustuu siihen, että väliainemateriaaliin johdetaan kaasua, jolloin väliaine käyttäytyy nesteenomaisesti. Näitä piirteitä ovat muun muassa väliaineen pinnan pysyminen vaakatasossa vaikka astiaa kallistetaan. Nesteenomaisia piirteitä voidaan hyödyntää materiaalin lajittelussa upottamalla partikkeleita leijupetiin, jolloin kaasu-väliainetta raskaammat kappaleet uppoavat ja kevyemmät jäävät pinnalle. Ensimmäisenä kuivalla raskaalla väliaineella tehtyä jatkuvatoimista erottelua on käytetty raakahiilen laatuerotteluun. Myöhemmin lajittelumenetelmää on tutkittu useilla eri materiaaleilla. Lajittelun tehokkuuteen vaikuttaa väliainemateriaalin paksuus, partikkelien koko, sekä ilman nopeus pinnassa. (Oshitani et al. 2004, s. 202–203.)

Oshitani et al. (2003) tutkivat autonromutusjätteestä lajiteltujen murskatun muovin, kumin ja johtosarjojen erottelua toisistaan. Tutkimuksessa käytettyjen materiaalien tiheydet olivat seuraavat: muovi $900 \pm 180 \text{ kg/m}^3$, kumi $1400 \pm 300 \text{ kg/m}^3$, sekä johtosarjat $2800 \pm 500 \text{ kg/m}^3$. Väliaineena tutkimuksessa käytettiin uni-bead-materiaalia, zircon-hiekkaa ja lasikuulia. Tutkimuksen tuloksena saavutettiin hyvä puhtaus- ja kierrätysaste johtosarjoille. Myös muovi ja kumi saatiin erotettua kohtalaisen hyvin toisistaan, vaikka materiaalien tiheydet ovat melko lähellä toisiaan. Muovin ja kumin erottelun puhtaudeksi tutkimuksessa saatiin 90 %. Tutkimuksessa todettiin myös, että erotteluun vaikuttaa tiheyksien lisäksi ilman nopeus väliaineen pinnassa. (Oshitani et al. 2003, s. 186, 193.)

3.9 Antureihin perustuvat lajittelumenetelmät

Antureihin perustuvat lajittelumenetelmät hyödyntävät vahvasti kehittyviä teknologioita, jotka hyödyntävät muun muassa optisia tunnistimia, röntgenfluorenssia, röntgenläpivalaisua, infrapuna- tai lähialueen infrapuna- Taulukossa 2 on esitetty materiaalien tunnistukseen käytettävät anturit ja niiden toimintaperiaate. Vanhimpana

teknologiana voidaan pitää optista tunnistusta, jonka hyödyntämistä on tutkittu jo yli 20 vuotta. Ongelmia optisissa antureissa ovat kuitenkin materiaalin tunnistus vain pinnasta, jolloin päällysteet ja likaisuus voi aiheuttaa vääristymiä erotteluun. Röntgenläpivalaisua voidaankin pitää lupaavana teknologiana läpivalaisuun perustuvan tunnistuksen vuoksi. Mikäli antureihin perustuvien lajittelulinjastojen kapasiteetti saadaan todistetusti pysymään tehokkaana, voidaan teknologioita pitää todella lupaavina. (Velis et al. 2011, s. 1036–1037.)

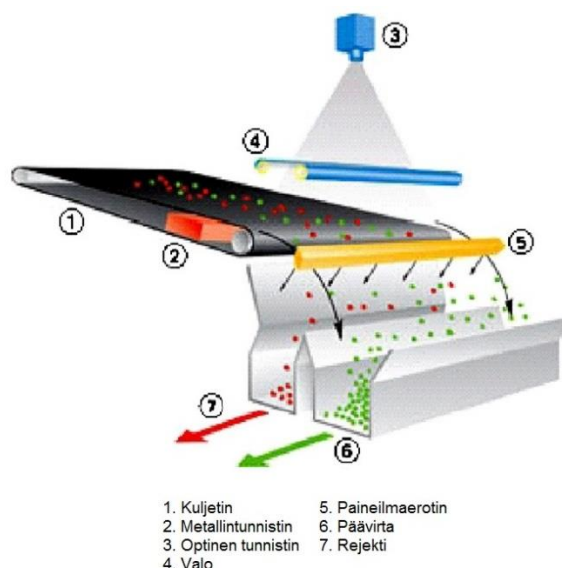
Taulukko 2: Tunnistukseen käytettävät sensorit ja niiden materiaalintunnistusperiaate (mukaillen: Tchobanoglous & Kreith 2002, s. 293).

Sensorityyppi	Kuvaus
Optinen sensori	Optisia sensoreita voidaan käyttää värin tunnistamiseen esimerkiksi paperille tai muoville.
Kuvantunnistus	Sensori skannaa kappaleen, ja vertaa sitä tietokantaan.
Röntgenfluorenssi (XRF)	Tunnistaa materiaalin pinnasta esimerkiksi PVC:n sisältämät klooriatomit.
Röntgenläpivalaisu (XRT)	Läpivalaisee kappaleen ja tunnistaa materiaalin rakenteen perusteella.
Infrapuna (IR)	Lajittelevat materiaalit kirkkaisiin, läpikuultaviin ja läpikuultamattomiin.
Lähialueen infrapuna (NIR)	Lajittelevat partikkelit NIR-absorbanssin mukaan.
Sähköstaattisuus	Lajittelee sähköä johtamattomat materiaalit permittiivisyyden mukaan.
Pyörrevirta (eddy current)	Tunnistaa sähköä johtavat materiaalit, kuten alumiinin ja rautametallit.

3.9.1 Optinen tunnistin

Optisella tunnistimella toimiva laitteisto kuvaa materiaalin suurnopeuskameralla, jonka avulla voidaan tunnistaa suuri määrä värejä ja saatua tietoa vertaamalla tietokantaan saadaan tunnistettua erilaisia materiaaleja linjastosta. Optinen erotin analysoi linjastossa liikkuvan partikkelin koon, muodon, värin ja asennon, minkä perusteella tietokone antaa ohjauskomennon erottimelle. Tyypillisesti erottelu tehdään tietokoneohjatuilla paineilmaiventtiileillä, jotka puhaltavat tunnistetut materiaalit haluttuun laskukouruun.

Optisen erottimen kapasiteetti voi olla jopa 40 t/h. Kuvassa 10 on esitetty optisen erottelun periaate. (Mulder et al. 2007. s. 1413.)

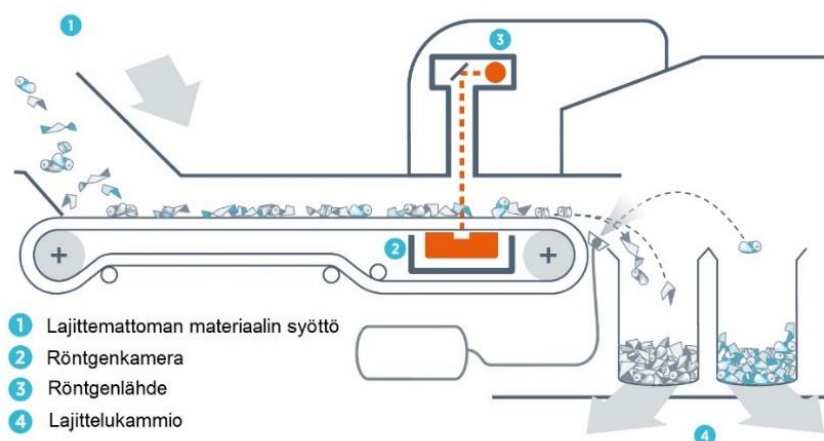


Kuva 10. Värierottelun periaate (mukaillen: Mulder et al. 2007. s. 1413).

Mulder et al. (2007) tutkivat optisella erottimella tehtyä lajittelua, jossa rakennus- ja purkujätteestä erotettiin puumateriaalia. Optisen erottimen avulla puumateriaalin puhtaudeksi saavutettiin 92 % ja kierrätysasteeksi 83 %. Lajiteltu puumateriaali sisälsi kuitenkin 3 % raskaita partikkeleita, kuten tiiltä ja betonia. Lisäksi optinen erottelu soveltuu kipsin erottamiseen raskaista jakeista. Optisella erottelulla on saavutettu jopa 94 % puhdasta kipsitöntä raskasta materiaali-jäätettä, mistä on merkittävä hyöty sulfaattien poistossa. Kierrätettyä kipsiä jää kuitenkin raskaan jakeen sekaan, koska kipsi voi olla likaista ja optisilta ominaisuuksiltaan samankaltaista tiili- ja betonipartikkeleiden kanssa. Optista erotinta voidaan kuitenkin hyödyntää tehokkaasti lisäämään kierrätystuotteen laatua, sekä vähentämään tehokkaasti ei-toivottuja partikkeleita kierrätysmateriaalista. Optinen erotin soveltuu myös puumateriaalin poistoon sekalaisen rakennus- ja purkujätteen seasta. (Mulder et al. 2007. s. 1413.) Puumateriaalin lajittelussa voi tulla kuitenkin kapasiteettirajoituksia rakennus- ja purkujätteen lajittelussa jätteen arkkitehtuurisista eroista johtuen. Pohjoismaisessa rakentamisessa hyödynnetään enemmän puuta, mikä näkyy myös jätteen laadussa.

3.9.2 Röntgensäteilykäsittely (XRT)

Röntgensäteilyyn perustuva käsittely, XRT (X-Ray Transmission) käyttää lajitteluperusteena materiaalien eri tiheyksiä. Laitteiston röntgensädelähde lähettää säteilyä materiaalivirran läpi vastaanottavalle röntgenkameralle, joka ohjaa erotinta. Materiaalin läpäisy aiheuttaa röntgensäteiden tehon laskemista, mistä röntgenkamera tunnistaa erotettavat materiaalit. XRT-lajittelulinjaston nopeus on noin 0,5 m/s partikkelikoon ollessa jopa yli 100 mm. XRT-linjastossa erityistä on se, että materiaalin tunnistus tehdään koko partikkelin tilavuudesta, eikä vain pinnasta kuten optisissa ja monissa muissa antureissa. Tällöin vältetään virheelliset tunnistukset, jotka johtuvat esimerkiksi materiaalin pinnoituksesta, pinnan likaisuudesta, pölystä tai pinnan epäsäännöllisyyksistä. XRT-menetelmää hyödyntämällä voidaan erottaa esimerkiksi muovivirrasta palonestoaineita sisältävät muovit, PVC-muovit tai muita täyteaineita sisältävät muovit. Kuvassa 11 on esitetty erään XRT-lajittelulaitteiston periaatekuva. (Delgado & Stenmark 2005, s. 13–14.)

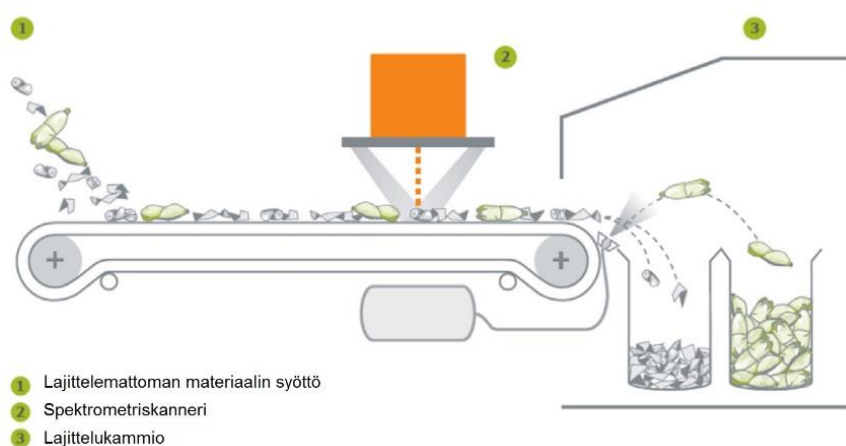


Kuva 11. Röntgensäteilykäsittelylaitteiston periaate (mukaillen: Tomra 2015, s. 2).

Mulder et al. (2007) tutkivat rakennus- ja purkujätteen lajittelua XRT-laitteiston avulla. Työssä XRT-laitteistolla puhdistettiin kuivatiheyteen perustuvan erottimen jälkeistä rejektiä ja acceptia, joista on tarkoitus tehdä kierrätyspolttoainetta. Esimerkkitapauksessa acceptin puhtaus oli 80 % ja rejektin puhtaus 98 %, joista XRT-käsittelyn jälkeen saatiin acceptista 98 % puhdasta ja rejektistä 99,8 % puhdasta kierrätyspolttoainetta. Tutkimuksessa saatiin lupaavia tuloksia sekalaisen rakennus- ja purkujätteen lajittelusta kierrätyspolttoaineeksi. (Mulder et al. 2007, s. 1412–1413.)

3.9.3 Lähialueen infrapuna (NIR)

Lajittelulinjastoissa voidaan käyttää lähialueen infrapunaan perustuvaa anturointitekniikka, millä voidaan erottaa esimerkiksi muovilajikkeita toisistaan tai muovimateriaaleja muusta jätevirrasta. Kuvassa 12 on esitetty eräs NIR-sensorin käyttömahdollisuus jätteen lajittelukäytössä. Esimerkkilaitteiston toiminta perustuu siihen, että NIR-sensori tunnistaa lajiteltavan materiaalin materiaalivirrasta ja antaa tiedon ohjausyksikölle, mikä antaa komennon paineilmaventtiilille puhalttaa tunnistettu materiaali eri jakeeseen muusta materiaalivirrasta. Materiaalin lajittelutehokkuus riippuu käytettävästä partikkelikoosta ja materiaalin irtotiheydestä. (Vegas et al. 2015, s. 123.)



Kuva 12. NIR-tekniikkaan perustuva lajittelulaitteisto. Laitteiston NIR-anturi analysoi materiaalivirran ja antaa ilmaventtileille komennon, mikäli tunnistaa rejektiin menevän partikkelin. (Mukaillen: Vegas et al. 2015, s. 123.)

Useissa Euroopan maissa rakennus- ja purkujätteestä valmistettava massallisesti suurin tuote on kierrätetty murske, joka koostuu betonista, tiilistä ja laatoista. Kyseisellä markkina-alueella toimijoita on kuitenkin jo paljon, jolloin kilpailukentällä on erotuttava muista esimerkiksi parempilaatuisen tuotteen avulla. Parempilaatuista mursketta voidaan käyttää kierrätysbetonin valmistuksessa sen sijaan, että mursketta käytettäisiin matalan laadun kohteissa, kuten tienrakennuksessa tai maantäyttöaineena. Parempilaatuisen murskeen tuottamiseksi muusta murskeesta tulee poistaa epäpuhtaudet, joita ovat kipsi, kevytbetoni ja orgaaniset materiaalit. Materiaalit ovat kooltaan ja muodoltaan hyvin samankaltaisia muun murskeen kanssa, joten ratkaisua on haettu muun muassa antureihin perustuvalla erotelulla. (Vegas et al. 2015. s. 121.)

Vegas et al. (2015) tutkivat rakennusjätteen puhdistusta NIR-laitteiston avulla. Tutkimuksen tavoitteena oli poistaa betoni- tiili ja laattapartikkelien joukosta epäpuhtaudet, joita olivat muun muassa orgaaniset materiaalit, sekä kipsi ja kevytbetoni. Testausolosuhteissa NIR-laitteiston kapasiteetiksi on saavutettu 11 tn/h/m. Kuvassa esitetyn esimerkkilaitteiston kokonaisinvestointihinta on Vegas et al. (2015) tutkimuksen mukaan 0,6 m leveälle kuljettimelle noin 140 000 € ja 2,8 m leveälle kuljettimelle 320 000 €. Kulutuslaskelmien perusteella tutkimuksessa NIR-käsittelyn hinnaksi saatiin 0,6 metriä leveällä kuljettimella 1,5 €/tn ja 2,8 metriä leveällä kuljettimella 0,8 €/tn. (Vegas et al. 2015, s. 123.)

Vegas et al. (2015) tutkimuksessa ilmenee, että NIR-käsittelyllä voidaan poistaa rakennusjätteen kierrätysjakeen joukosta epätoivottuja materiaali- ja partikkeleita tehokkaasti, ja joissain tapauksissa myös täydellisesti. NIR-käsittely soveltuukin käytettäväksi tilanteissa, joissa laitteistoon syötetään jo esilajiteltua epäpuhdasta materiaalia, kuten sekalaista betoni- ja kivipitoista rakennus- ja purkujätettä. (Vegas et al. 2015, s. 127.)

Muovien suuresta kulutuksesta ja jätemäärästä riippumatta muovien kierrätys uusia tuotteita on vielä melko vähäistä. Rakennus- ja purkujätteen, elektroniikkajätteen, automurskausjätteen, sekä yhdyskuntajätteen seassa on edelleen merkittävä raaka-ainevaranto PE- ja PP-muoveja, joiden hyödyntäminen tällä hetkellä on haastavaa taloudellisesti tai teknologisesti. Serranti, Gargioulou ja Bonifazi (2012) tutkivat vuonna 2012 rakennus- ja purkujätteen seasta kerättyjen PE- ja PP-muovien erottelua hyödyntämällä NIR-kuvausjärjestelmää. Tarkoituksena oli saavuttaa mahdollisimman puhdasta kierrätysmuovia lajittelemalla murskattu 5–20 mm muovijake yhdeksään värijakeeseen ja 9 tiheysjakeeseen. Tuloksena saavutettiin PE- ja PP- muoveille hyvä puhtausaste. Lajittelumenetelmän taloudellinen mahdollisuus löytyy tarvittaessa parempaa lajittelutehokkuutta, lisäystä tuotteen puhtauteen tai tarvittaessa vähentää kaatopaikkasijoitettavan jätteen määrää. (Serranti et al. 2012, s. 52, 58.)

3.10 ClassiCleaner

Dieffenbacher Panelboard Oy:n laitteisto rakennus- ja purkujätteen lajitteluun on ClassiCleaner-lajittelukone, jota hyödynnetään lastulevyteollisuuden puukuidun ja muiden materiaalien kokolajitteluun, sekä epäpuhtauksien erotteluun. Tässä työssä ClassiScreen-laitteisto termiä käytetään koskemaan vain seulaa ja siihen liittyviä komponentteja.

ClassiCleaner-laitteisto termillä tarkoitetaan puhdistuslaitetekonaisuutta, johon kuuluu ClassiScreen-seula ja sen yhteydessä käytettävät puhdistuslaitteet. (Dieffenbacher GmbH 2015a, s. 2; Horelli 2016)

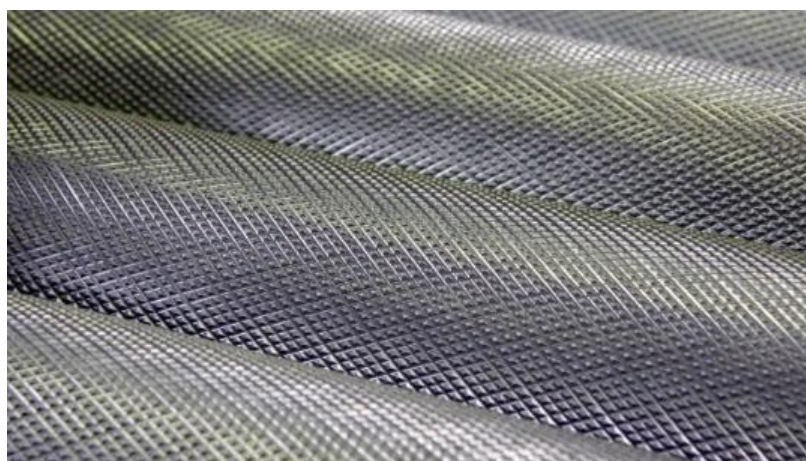
ClassiScreen-lajittelukoneen etuihin lukeutuvat mahdollisuus käyttää monipuolisia materiaaleja riippumatta materiaalin kosteudesta. Lajittelukone on suunniteltu käytettäväksi kierrätetyn puumateriaalin, sahalastusekoituksen, sekä kosteudeltaan vaihtelevien lastujen lajitteluun. ClassiScreen erottelee eri materiaalijakeet partikkelin paksuuden mukaan. Laitteisto koostuu telastosta, jossa itsepuhdistuvat ClassiRoll-telat pyörivät samaan suuntaan kuljettaen materiaalia telaston läpi. Tyypillisesti ClassiScreen lajittelee puukuitua esimerkiksi seuraaviin jakeisiin: fines, mini chips, chips ja oversized. Koneen alussa telojen välit ovat pienempiä, jolloin hienoimmat jakeet (fines) seuloontuvat tällä alueella omaksi materiaalivirraksi. Tämän jälkeen telojen väli kasvaa, jolloin puolestaan karkeammat jakeet erottuvat omiksi jakeikseen riippuen välien suuruudesta (mini chips ja chips). Lisäksi jakeet, jotka eivät mahdu yhdestäkään välistä joutuvat ylikokoisina ylitteeseen (oversized). Kuvat tyypillisistä jakeista ovat esitetty kuvassa 13. (Dieffenbacher GmbH 2015a, s. 2.)



Kuva 13. ClassiScreen-lajittelukoneen tyypilliset lajittelun jälkeiset jakeet. Jakeet vasemmalta oikealle: fines, mini chips, chips ja oversized. (Dieffenbacher GmbH 2015a, s. 5.)

Tyypillinen jakeiden määrä partikkelin paksuuden mukaan lajiteltuna on 2–5 erilaista jaetta. Laitteiston kapasiteettialueena voidaan pitää 4–60 tn/h, jossa massat esitetään kuivina tonneina. Kapasiteettiin voidaan vaikuttaa telojen määrällä ja leveydellä, telavälien

suuruudella, sekä telojen pyörimisnopeudella. Lajiteltavien partikkeleiden kokoon vaikutetaan sekä erikokoisella telakuvioinnilla, että telavälin suuruudella. Kuvassa 14 on esitetty ClassiRoll-telan 0,5 mm kuviointi. Muita kuviointeja ovat 0,8; 1,5; 3,0; 5,0 ja 8,0 mm kuvioinnit. Telojen tyypiksi voidaan valita käyttökohteen mukaan Standard Plus-, Dura- tai Dura Plus-telat. Kaikissa telatyypeissä on korroosionkeston ja pintakovuuden kasvattamiseksi 0,3 mm paksuinen kovakromaus. Vaativissa kierrätysmateriaalisovelluksissa käytetään Dura- ja Dura Plus-teloja, joissa telan ominaisuuksia parannetaan edelleen materiaalivalinnoilla ja induktiokarkaisulla. (Dieffenbacher GmbH 2015a, s. 8–10; Horelli 2016.)



Kuva 14. ClassiRoll-telan 0,5 millimetrin pintakuviointi.

ClassiScreen-lajittelukoneeseen voidaan yhdistää muita materiaalia puhdistavia laitteita, jolloin puhutaan ClassiCleaner-järjestelmästä (kuva 15). ClassiCleaner-järjestelmässä seulomisen yhteydessä konsentroituivat epäpuhtaudet ohjataan puhdistukseen, mikä tapahtuu gravimetrisillä erottimilla. Laitteistolla voidaan erotella myös kalvomaisia epäpuhtauksia. Lisäksi ClassiCleaner-puhdistusjärjestelmään liitetään usein magneetti- ja pyörrevirtaerottimia magneettisten ja ei-magneettisten metallien erottamiseksi. ClassiCleaner-lajittelulaitteiston avulla voidaan materiaalivirrasta erottaa hieno pöly ja maa-aines, kivet ja hiekka, lasi ja posliini, magneettiset ja ei-magneettiset metallit, huonolaatuinen puu, sekä muovikalvot. (Dieffenbacher GmbH 2015a, s. 2.)



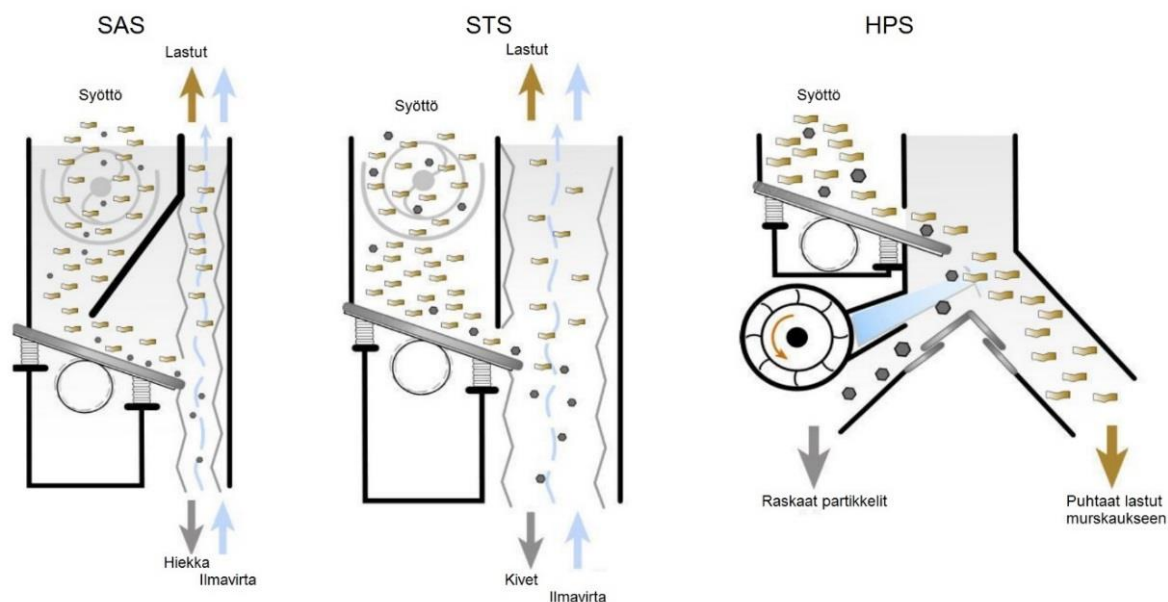
Kuva 15. ClassiCleaner-lajittelu- ja puhdistuslaitteisto (Dieffenbacher GmbH 2015a, s. 2).

ClassiCleanerin kapasiteetti kuivalle materiaalille yhdellä lajitteluyksiköllä on noin 60 tn/h, mikäli kuivairtitiheys on noin 150 kg/m^3 . Energiakulutus laitteistolla on noin 140 kW, sekä laitteisto vaatii tilaa noin $10 \times 10 \text{ m}$ alueen. (Dieffenbacher GmbH 2015a, s. 5.) Partikkelikokojakauma ClassiCleaner-laitteistolla voi olla esimerkiksi seuraavanlainen (Dieffenbacher GmbH 2015a, s. 7):

- ”fines < 1,2 mm
- flakes 1,2–3,5 mm
- mini chips 3,5–10 mm
- chips 10–50 mm
- oversized > 50 mm.”

Telastolla kulkevan materiaalin raskaammat partikkelit rikastuvat telaston pohjalle, minkä jälkeen telaston yhtä telaväliä kasvatetaan suuremmaksi kuin edelliset telavälit. Telavälin kasvatuksen seurauksena määrätyn kokoiset raskaat partikkelit, sekä myös puuta, putoaa telavälistä. Pudonneet partikkelit ohjataan kuljetinruuvilla puhdistuslaitteelle. Näitä puhdistuslaitteita ovat Dieffenbacher-yhtiön valmistamat SAS-, STS- ja HPS-erottimet (kuva 16.). SAS-erotin (Sand Separator) on tarkoitettu hiekan erottamiseen hienoista jakeista. Tällöin eroteltavan hiekan koko on noin 1,2–4,0 mm. STS-erotin (Small Stone Separator) on tarkoitettu erottamaan karkeammasta jakeesta kivet, joiden koko on noin 4,0–14,0 mm. Lajittelulinjaston viimeisestä välistä putoavalle jakeelle voidaan käyttää HPS-

erotinta (Heavy Particle Separator), minkä tarkoitus on erottaa 14,0–50,0 (suurimmillaan 100) mm kokoiset kivet muutenkin jo suurempipartikkelikokoisesta jakeesta. (Dieffenbacher GmbH 2015a, s. 41)



Kuva 16. Dieffenbacher-yhtiön valmistamat gravimetriset erottimet: SAS, STS ja HPS (Dieffenbacher GmbH 2015a, s. 41).

ClassiCleaner-laitteiston etu muihin laitteistoihin verrattuna saavutetaan osamateriaalivirran puhdistamisella, sekä rikastuseriaatteella. ClassiCleaner-laitteiston puhdistuslaitteella tarvitsee käsitellä vain osaa koko materiaalivirrasta. Tämän seurauksena puhdistuslaitteiden fyysinen koko voidaan optimoida tehokkaasti. Näin voidaan pienentää muun muassa energiankulutusta, sekä tärykuljettimien ja puhaltimien ja muiden tarvittavien laitteiden fyysistä kokoa. Lisäksi puhdistuslaitteelle ohjattava materiaalivirta on partikkelikooltaan tunnettua, jolloin raskaamman epäpuhtauden erotus kevyemmästä materiaalista on tarkempaa ja saavutetaan puhtaampia jakeita verrattuna partikkelikoolta tuntemattoman laitteiston tuottamaan ilmaeroteltuun jakeeseen. Puhdistuslaitteelle ohjattavaan partikkelikokoon vaikutetaan telaväliä muuttamalla, jolloin esimerkiksi STS-puhdistuslaitteelle päättyy vain 4–14 millimetrisiä partikkeleita. (Horelli 2016.)

4 PUUMUOVIKOMPOSIITIT

Komposiitilla tarkoitetaan materiaalia, jossa on yhdistetty kahta tai useampaa raaka-ainetta yhtenäiseksi materiaaliksi, jossa raaka-aineet eivät kuitenkaan ole sulautuneet tai lienneet toisiinsa. Komposiitit koostuvat kokonaisuutta sitovasta materiaalista, eli matriisista, sekä muusta materiaalista, kuten kuiduista tai hienojakoisista partikkeleista. (Saarela et al. 2007, s. 17.) Puumuovikomposiitin toivottuja ominaisuuksia ovat hyvä kestävyys, pieni huollon tarve, lahoamattomuus, termiittien kestävyys, sekä seosaineista riippuen tulenkestävyys. Puumuovikomposiitin positiivisiin ominaisuuksiin lukeutuu myös, että se on esteettisesti kyllästettyä puuta miellyttävämpää, eikä sisällä tikkuja, oksia eikä rakenteeseen muodostu vääntymiä tai kiertymiä. (Klyosov 2007, s. 10–11.) Tässä kappaleessa käsitellään puumuovikomposiittien tyypillinen koostumus ja yleisimmät valmistusmenetelmät.

4.1 Puumuovikomposiittien koostumus

Puumuovikomposiitit sisältävät selluloosakuituja, sekä teollisuusmuoveja, kuten polyeteeniä, polypropeenä ja polyvinyylikloridia. Muita aineita ovat lisäaineet, kuten voiteluaineet, kytkentäaineet, väriaineet, antioksidantit, UV-suoja-aineet (ultravioletti), mikrobisuoja-aineet, sekä muut toivottuja ominaisuuksia lisäävät aineet. Jotkut valmistajat käyttävät mineraalitäyteaineita, jolloin komposiittiin saadaan lisättyä muun muassa jäykkyyttä ja kovuutta. Selluloosakuitu voidaan komposiittiin ottaa hyvin monipuolisesti eri lähteistä. Selluloosakuidun lähteitä voivat olla esimerkiksi puujauho, jauhettu jätetä, sellukuitu, riisin kuori tai pahvi ja paperi. (Klyosov 2007, s. 11, 14.)

4.1.1 Puu

Puumuovikomposiitin puu- ja luonnonkuidun voidaan katsoa kuvaavan kaikkea mahdollista kuitumaista materiaalia, jota kasvaa luonnossa. Puu- ja luonnonkuituna voidaan komposiitissa käyttää esimerkiksi sahanpurua tai puujauhoa, maatalouden sivutuotteita tai leikattuja, murskattuja tai jauhettuja muita luonnonkuituja. Muita luonnonkuituja voivat olla esimerkiksi juutti tai hamppu. (Klyosov 2007, s. 75.) Käytettävä puu voi olla neitseellisestä lähteestä, mutta nykyään usein käytetään kierrätettyä puumateriaalia esimerkiksi rakennusteollisuuden purkupuuta tai teollisuuden sivuvirtoja. Puukuidun ominaisuuksiin lukeutuu muun muassa muihin täyteaineisiin ja muoviin verrattuna alhainen hinta, verrattain

hyvä lujuuden ja painon suhde, alhainen tiheys, sekä materiaalin uudistuvuus. Lisäksi puuta voidaan käyttää pehmeytensä vuoksi helposti olemassa olevissa muovien tuotantolinjoilla. (Schwarzkopf & Burnard 2016, s. 22.)

Komposiitin mekaaniset ominaisuudet riippuvat käytettävästä puulajista ja puupartikkelien kokojakaumasta. Puulajin valintaan vaikuttaa kuitenkin yleisesti hankintahinnan ohella saatavuus ja maantieteellinen sijainti. Tyypillisesti puupartikkelit ovat alle yhden millimetrin pituisia ja niiden leveyssuhde vaihtelee suuresti. Leveyssuhteella tarkoitetaan puupartikkelin pituuden suhdetta leveimpään sivuun. Teollisessa tuotannossa olevan puumurskan partikkelikoossa esiintyy suurta vaihtelua. Puumurskan käsittely, esimerkiksi seulomalla, mittatarkkuuden lisäämiseksi lisää myös komposiitin valmistuskustannuksia. (Schwarzkopf & Burnard 2016, s. 22–25.)

Luonnollinen prosessoimaton kuitumateriaali, kuten puujauho tai sahanpuru, sisältää pääosin sekä selluloosaa, hemiselluloosaa, että ligniiniä. Puut, lajikkeesta riippuen, sisältävät tyypillisesti selluloosaa noin 40–50 %, hemiselluloosaa noin 20–30 %, ligniiniä 20–35 %, uuteaineita <10 % ja epäorgaanisia materiaaleja <0,5 %. Selluloosan tuottaa puulle sen lujuuden ja rakenteellisen kestävyys. Selluloosan polymeeriketjut voivat olla yleisesti noin 10000 yksikön pituisia. Hemiselluloosat ovat haarautuneita polymeerejä, jotka vaikuttavat puun rakenteellisiin ominaisuuksiin erilaisin sidoksin. Hemiselluloosan polymeeriyksikköjen määrä on huomattavasti selluloosaa pienempi. Ligniinin tehtävänä puun rakenteessa on sitoa selluloosakuidut toisiinsa. Uuteaineiden määrä vaihtelee 3–10 % välillä, ja ne sisältävät esimerkiksi rasvoja, vahoja, hartseja, proteiineja, kumeja, terpeenejä ja yksinkertaisia sokereita. Uuteaineiden tarkoitus on suojata puuta mikrobeilta, mutta ne vaikuttavat myös puun ominaisuuksiin, kuten hajuun, väriin tai lahoamisherkkyyteen (Oksman-Niska & Sain 2008, s. 12.)

Selluloosa vaikuttaa positiivisesti komposiitin mekaanisiin ja muihin ominaisuuksiin, kuten lämpölaajenemisen kertoimeen. Ligniini taas tekee komposiitista heikompaa ja tiheydeltään pienempää, sekä nopeuttaa komposiitin vanhenemista ulko-olosuhteissa. Ligniinin ohella myös muut puun uuteaineet, kuten terpeenit ja tanniinit, laskevat komposiitin tiheyttä luomalla haihtuvia yhdisteitä. Hemiselluloosa taas hajoaa helposti muovin

sulamislämpötiloissa etikkahapoksi, mikä taas voi aiheuttaa merkittävää korroosiota valmistuslaitteissa. (Klyosov 2007, s. 75.)

Puumuovikomposiittia voidaan valmistaa rakennus- ja purkujätteen myötä tulevasta B-luokan puujätteestä, mikäli puujätteen puhtauskriteerit saadaan varmistettua riittävälle tasolle. Suurimpia ongelmia puujätteen hyödyntämisessä ovat kuitenkin sen sisältämät epäpuhtaudet, sekä puumateriaalin laadun vaihtelevuus. Lisäksi purkupuuta hyödynnettäessä voidaan pitää jopa todennäköisenä, että purkupuun sekaan joutuu pieniä prosessiin kuulumattomia jakeita, kuten kyllästettyä puuta tai pieniä määriä metallia. Lisäksi eräitä raskasmetalleja ja muunlaisia haitta-aineita voi päätyä kierrätyspuun joukossa prosessiin. Tämä tulee huomioida kierrätyspuutuotteita hyödynnettäessä etenkin sisäkäytössä, jossa laatuvaatimukset tuotteille ovat tarkemmat. (Myller 2015, s. 27–28.)

4.1.2 Muovit

Yleisesti puumuovikomposiittien valmistuksessa käytetään neitseellisiä muoveja. Jäte- ja kierrätysmuovien tutkimus puumuovikomposiittien valmistuksessa aloitettiin jo 1990-luvulla, kuitenkin vasta viime vuosina tutkimuksen painopistettä on lisätty huomattavasti kyseisellä osa-alueella. (Najafi 2013, s. 1.)

Muovien jaottelu

Muovit voidaan jaotella kestumuoveihin ja kertamuoveihin niiden uudelleentyöstöominaisuuksien perusteella. Kestumuovien käyttäminen uudelleen esimerkiksi sulattamalla ja uudelleen työstämällä on mahdollista, kun taas kertamuovit eivät nimensä mukaisesti sovellu uudelleensulatukseen. Kertamuovien käyttö on huomattavasti kestumuoveja vähäisempää, vain noin 5 % Suomessa käytettävistä muoveista on kertamuoveja. Rakennusteollisuudessa kertamuovit esiintyvät yleisesti polyuretaanilevyissä, joita käytetään rakennuseristeinä, sekä kylmälaite- ja putkieristeinä. Purkujätteen joukossa polyuretaaneja voi esiintyä lisäksi myös esimerkiksi erilaisina patjoina ja pehmusteina (Järvinen 2008, s. 120–121.) Taulukossa 3 on lisäksi esitetty muovityypeittäin lajiteltuja rakennus- ja purkujätteen seasta löytyviä jätetyyppejä (Dyer 2012, s. 2397).

Taulukko 3. Muovityypeittäin lajitellut rakennusjätetyypit (mukaillen: Dyer 2012, s. 2397).

Muovi	Käyttökohde
PVC (polyvinyylikloridi)	Putket ja kanavat, ikkunankarmit, lattiapinnoitteet
PE-HD (korkeatiheyksinen polyeteeni)	Putket ja kanavat
PE-LD (matalatiheyksinen polyeteeni)	Putket ja kanavat, kalvot, pakkaukset
PP (polypropeeni)	Putket ja kanavat
PS (polystyreeni)	Eristeet, pakkaukset
PU (polyuretaani)	Eristeet
ABS (akryyliniitrili-butadieenistyreeni)	Putket ja kanavat

Kestomuovit voidaan jaotella valtamuoveihin, teknisiin muoveihin ja erikoismuoveihin markkinoiden, hinnan ja muovin ominaisuuksien mukaan. Valtamuovit ovat yleisimpiä muoveja, joiden hinnat ovat edullisimpia. Näitä muoveja ovat PE, PP, PVC, PS ja joskus PET-A (amorfinen polyetyleenitereftalaatti). Teknisten muovien ominaisuudet ja hinnat ovat valtamuoveja kalliimpia, mutta niitä käytetään kuitenkin yleisesti. Erikoismuovien markkinat ovat pienet, ja niitä käytetään halutessa tietynlaisia ominaisuuksia tarkoin määrättyyn kohteeseen. Rakennusteollisuus Suomessa käyttää 27 % valtamuovien kokonaisuudesta. Valtamuovien suurin käyttökohde on jäykät ja joustopakkaukset, noin 57 % osuudellaan. (Järvinen 2008, s. 26–27.)

Polypropeeni (PP)

Kestomuovien joukkoon lukeutuva polypropeeni koostuu propeenimonomeereistä. Polypropeeni on korkeatiheyksistä polyeteeniä huomattavasti hauraampaa ja vähemmän sitkeää. Matalatiheyksiseen polyeteeniin verrattuna polypropeeni on vähemmän joustavaa. Kimmokerroin polypropeenilla sijoittuu korkea- ja matalatiheyksisen polyeteenien väliin. Polypropeenin hyviin ominaisuuksiin sisältyy se, että polypropeeni on kestävä ja monestikin muihin muoveihin verrattuna jäykempi materiaali, sekä väsymisenkestävyys polypropeenilla on hyvä. Polypropeenin sulamis- ja hajoamispiste on polyeteeniä korkeampi, sekä lämmönkestävyys on polyeteeniä parempi. Kuitenkin polypropeenin

kylmänkestävyys on polyeteeniä heikompi. Polypropeenin käyttölämpötilat ovat yleisesti noin -10 – 130°C . Lisäksi polypropeenin vanhenemistaipumus on polyeteenistä suurempi. Polypropeenin vanhenemistaipumus ilmenee nopeana mekaanisten ominaisuuksien huononemisena. (Koleva 2009, s. 2–3.)

Rakennus- ja purkujätteen jätteen joukossa polypropeeni on usein saatavilla erilaisten putkien rakennusmateriaalina ja sähköteollisuuden tarvikkeissa (Koleva 2009, s. 6). Muita polypropeenin käyttökohteita ovat esimerkiksi kalvot kuidut, ruiskuvalutuotteet, levyt ja auton osat. Polypropeenikuidusta voidaan valmistaa esimerkiksi köysiä, teollisuussäkkejä, kankaita ja mattoja. Taulukossa 4 on esitetty polypropeenin käyttökohteet Euroopassa 2007. Yhteensä polypropeenia valmistettiin 9200 miljoonaa kiloa. (Järvinen 2008, s. 41.)

Taulukko 4. Polypropeenin käyttökohteet Euroopassa vuonna 2007. Yhteensä 9200 milj. kg. (Mukaillen: Järvinen 2008, s. 41.)

	Osuus [%]	Massa [milj. kg]
Kuidut	21 %	1930
Ruiskuvaletut pakkaukset	17 %	1560
Kalvot	15 %	1380
Autoteollisuus	9 %	830
Levyekstruusio	9 %	830
Kompaundit	5 %	460
Muut	24 %	2210

Polyeteeni (PE)

Polyeteeni voidaan jaotella päätyypeittäin matalatiheyspolyeteeniksi (PE-LD) ja suuritiheyspolyeteeniksi (PE-HD). Lisäksi muita polyeteenin tyyppejä ovat muun muassa keskitiheyspolyeteeni (PE-MD), sekä suurimolekyyllipainoiset ja erittäin suurimolekyyllipainoiset polyeteenit PE-HMW ja PE-UHMW. Kaikki polyeteenin tyypit yhteenlaskettuna polyeteeni on kaikista muoveista eniten käytetty. Polyeteenin ominaisuudet riippuvat käytettävästä tyypistä, joten polyeteenin käyttökohteet jakautuvat hyvin monelle eri sektorille. Polyeteeniä käytetäänkin esimerkiksi kalvoissa, kuiduissa, liukupinnoissa, pinnoituksissa, putkissa, puhallusmuovattavissa tuotteissa, sekä monissa muissa kohteissa. Polyeteeni on sitkeä, kevyt ja liukaspintainen muovi, joka eristää hyvin

sähköä ja kestää alhaisia lämpötiloja ja kemikaaleja. Polyeteeni soveltuu hyvin elintarvikepakkauksiin, ja sillä on hyvä ekstruusiotyöstettävyyys, sekä se on hyvin kuumasaumattavaa. (Järvinen 2008, s. 28–29.) Taulukossa 5 on esitetty käyttökohteita ja ominaisuuksia polyeteenin eri tyypeille.

Taulukko 5. Polyeteenin eri tyyppien käyttökohteita ja ominaisuuksia tyypeittäin lajiteltuna rakennusteollisuudessa ja muualla (mukaillen: Goncalves & Margarido 2013, s. 466).

PE-LD	sähköeristeet, pakkaus- ja maatalouskalvot, erilaiset työvälineet
EVA (etyleeni-vinyylisetaatti)	liimat, kaapelivaipat, kalvot, lattiamaton pohjat (Bruder, 2012, s. 20.)
EEA (etyleeni etyyliakryaatti)	lujaa, joustavaa, kalvot, putket
EMA (etyleeni metyyliakryaatti)	lämpöstabiili, kalvot, ekstruusiopäällystys
EVOH (etyleeni-vinyylialkoholi)	kaasusulkuominaisuus, pakkaukset
PEX (ristiinsilloitettu polyeteeni)	lämmönkestävä 150 °C, kuumavesiputket asuintaloissa
PE-LLD (lineaarinen matalatiheyspolyeteeni)	pakkauskalvot, maahan tehtävien altainen pohjamuovi, putki- ja levyekstruusiot
PE-HD	nestesäiliöt, siltarummut, putket ja muut ekstruusiot, sairaalamateriaalit, pohjamuovit
PE-HMW	suurihalkaisijaiset putket, suuret säiliöt, hienokalvot
PE-UHMW	osavalmistus tai pinnoitus kohteisiin, joissa tarvitsee hyvää lujuutta kylmissä lämpötiloissa, kulutuksenkestopalat, korroosiosuojapalat, koneenosat

Polyvinyylikloridi (PVC)

Polyvinyylikloridi, eli PVC, on vanhin käytössä oleva kestopuovi. PVC:n yleistymisen rakennusmateriaalina alkoi 1970-luvulla. Tähän johti muun muassa PVC-muovin hyvä happojen- ja emästen kestävyys, palamattomuus, hyvä jäykkyys ja sitkeys, sekä ulkoilmankestävyys. Polyvinyylikloridin ominaisuudet ovat hyvin monipuoliset, ja sitä

voidaan muuttaa erilaisilla lisä- ja pehmitinaaineilla moniin eri käyttökohteisiin. Polyvinyylikloridi voikin esiintyä kovana tai pehmeänä, kalvona tai jäykkänä rakenteena, vaahdotettuna tai palamattomana, sekä lasinkirkkaana tai sameana. Ulkoilmakohteisiin tarkoitettut PVC-muovit on yleisesti lisäaineistettu sitkeiksi, sekä UV- ja pakkasenkestäviksi. Rakennusteollisuudessa PVC:tä käytetään yleisesti erilaisissa putkissa ja profiileissa, sähkökaapelin kuorissa, tavarapeitteissä, tapeteissa ja lattiamateriaaleissa sekä pehmeissä letkuissa. PVC:n käytöstä kaksi kolmasosaa tulee kovasta PVC:stä ja yksi kolmasosa pehmeästä PVC:stä. Rakennusteollisuus käyttää noin 57 % tuotetusta PVC-muovista, jolloin keskimääräinen käyttöikä muoville on noin 10–50 vuotta. Rakennusteollisuuden suuren käyttövolyymien ja pitkän käyttöajan yhteisvaikutuksesta PVC-jätteen määrän oletetaan kasvavan tulevaisuudessa. (Järvinen 2008, s. 48–51; Euroopan yhteisöjen komissio 2000, s. 4, 17.)

PVC:n hyvien ominaisuuksien kääntöpuolella on PVC-muovin ongelmat hävittämisen kannalta. PVC sisältää 57 % massastaan klooria, jonka polttaminen tuottaa ongelmia. PVC voidaan hyödyntää mekaanisesti kierrättämällä, jolloin materiaali murskataan ja käytetään uudestaan seuraavassa käyttökohteessa. Tämä vaatii kuitenkin tasaisen ja jatkuvan materiaalivirran kierrätykseen. PVC voi haitata sisältämänsä kloorin takia myös muiden muovien kierrättämistä, mikäli PVC käsitellään muiden muovien kanssa samassa materiaalivirrassa. Esimerkiksi PET-muovien prosessilämpötila on lähes samanlainen PVC:n kanssa, jolloin materiaalit pyrkivät sekoittumaan keskenään. PVC:n kierrättämistä haittaavat myös kierrättämisen kokonaiskustannukset, jotka koostuvat muun muassa keräyksestä, erottelusta ja prosessoinnista. PVC-jätettä, joka tulee suoraan kuluttajilta, ei ole taloudellisesti kannattavaa kierrättää uusiomateriaalina. (Euroopan yhteisöjen komissio, 2000, s. 20.) PVC:tä voidaan käyttää komposiitin raaka-aineena, mutta kierrätyksen tuomat ongelmat tulee ottaa huomioon (Klyosov 2007, s. 28).

4.1.3 Lisä- ja täyteaineet

Voiteluaineita käytetään lisäämään sulan muovin reologisia ominaisuuksia riippumatta sisältääkö seos kuituja vai ei. Voiteluaineilla pyritäänkin parantamaan sulan käyttäytymistä prosessissa. Voiteluaineiden ominaisuudet voidaan jaotella sisäisiin ja ulkoisiin voiteluaineisiin, joissa sisäiset voiteluaineet vaikuttavat viskositeettiin ja komposiitin virtausominaisuuksiin, kun taas ulkoiset voiteluaineen tehtävät liittyvät

tarttumattomuusominaisuuksien lisäämiseen ja komposiitin ja prosessilaitteiden rajapinnan voiteluun. (Oksman-Niska & Sain 2008, s. 12.)

Puukuidut ovat hydrofiilisiä, toisin kuin puumuovikomposiiteissa käytettävät muovit, jotka ovat hydrofobisia. Tästä syystä johtuen puun ja muovin välille ei välttämättä muodostu hyvää sekoittumista, eikä täten myöskään puun vahvistavaa vaikutusta. Puun ja muovin välisen sidoksen muokkaaminen onkin erittäin tärkeä tekijä pyrittäessä valmistamaan kehittyneitä puumuovikomposiitteja ja tämä voidaan tehdä esimerkiksi kytKentäaineilla. (Gardner, Han & Wang 2015, s. 139–142.)

Tutkimukset ovat osoittaneet, että mineraalitäyteaineet parantavat puumuovikomposiittien mekaanisia ominaisuuksia. Mineraalitäyteaineilla voidaan lisätä komposiitin vetolujuutta, taivutuslujuutta, sekä iskunkestävyyttä. (Hadal et al. 2004, s. 314–315.) Mineraalitäyteaineilla voidaan lisäksi lisätä lämmöneristyskykyä ja vähentää kuormituksesta johtuvaa virumista. Lisäksi täyteaineet hidastavat palon etenemistä komposiitissa. (Huuhilo et al. 2010, s. 35.) Lisäksi täyteaineilla voidaan joissain tapauksissa pienentää komposiitin hintaa, sillä täyteaineiden hinta on käytettävien muovien hintoja pienempi. (Klyosov 2007, s. 123.)

Komposiitin täyteaineilta toivotaan muun muassa seuraavia ominaisuuksia: edullisuus, reagoimattomuus, palamattomuus, sopivuus laitteistoon ja materiaaliin, liukenemattomuus ja vähäinen veden absorptio. Lisäksi täyteaine tulisi olla helposti hankittavissa, ja sen vaikutusten tulisi olla suotuisat tuoteominaisuuksiin. (Saarela et al. 2007, s. 59.) Puumuovikomposiitin täyteaineina voidaan käyttää esimerkiksi talkkia, kalsiumkarbonaattia, wollastoniittia tai piioksidia. Täyteaineen vaikutus riippuu käytettävästä mineraalityypistä ja partikkelikoosta. (Huuhilo et al. 2010, s. 35.) Myös vaihtoehtoisia täyteaineita on pyritty tutkimaan ja tulokset ovat olleet onnistuneita. Esimerkiksi kierrätetyn mineraalivillan sekoituksella on saatu onnistuneita tuloksia iskulujuuden kasvamisena puu-täyteaine-PP-komposiitissa. (Keskisaari et al. 2015, s. 1, 7)

4.2 Valmistusmenetelmät

Puumuovikomposiitteja valmistetaan tyypillisesti ekstruusiolla, ruiskuvalulla, sekä painemuovauksella tai ahtopuristuksella. Uusia valmistusmenetelmiä ovat ainetta lisäävät

menetelmät, joita ovat esimerkiksi 3D-tulostus. Määräävä tekijä puumuovikomposiittien valmistuksessa on, ettei puun muovauslämpötila nouse liian suureksi. Puun hajoaminen lämmön vaikutuksesta alkaa jo 220 °C. Tässä kappaleessa käsitellään valmistusmenetelmistä vain ekstruusio ja ruiskuvalu, sekä esikäsittelymenetelmänä materiaalin agglomerointi.

4.2.1 Agglomerointi

Agglomerointi voidaan jakaa liikkeeseen ja puristukseen perustuviin menetelmiin. Liikkeeseen perustuvasta agglomeroinnista voidaan käyttää myös nimitystä märkäagglomerointi. Märkäagglomeroinnissa prosessia voidaan edistää lisäämällä sideaineita tai liuottimia. (Ennis 2010a, s. 34.) Liikkeeseen perustuvia laitteita ovat esimerkiksi sekoittajat, kiekot ja rummut. Puristukseen perustuvia laitteita ovat esimerkiksi pellettimyllyt, tablettikoneet ja muut puristimet. (Ennis 2010b, s. 50)

Tyypillisiä agglomerointilaitteistoja ovat nestepetigranulaattori, kiekko- ja rumpugranulaattorit ja sekoittajagranulaattori. Nestepetigranulaattorissa partikkelit tuetaan ja sekoitetaan kuumennetulla kaasulla, joka myös kuivaa materiaalin. Nestepetigranulointia voidaan tehdä erä kerrallaan tai jatkuvana prosessina. Erittäin tehtävässä ajossa tavoitteena on usein tehdä hienosta jauheesta huokoisia granulaatteja. Toinen mahdollisuus on suihkuttaa materiaali siemenpartikkeleiden päälle, jolloin voidaan tehdä lujia kerrostettuja granulaatteja. (Ennis 2010b, s. 50.)

Kallistettujen rumpu- ja kiekkogranulaattoreiden liike sekoittaa materiaaleja käyttämällä hyväkseen liikkeen jatkuvuutta rummun seinämällä ja maan vetovoimaa. Jatkuvatoimisten rumpu- ja kiekkogranulaattoreiden kapasiteetti voi olla 1–100 tn/h, siten että materiaalin työaika on 1–5 minuuttia. Tämän tyyppisten granuloijien tekemät partikkelit ovat kooltaan noin 1–20 mm, eikä sovellu alle 250 µm granulaattien valmistamiseen. Granulaattien tiheys on nestepeti- ja sekoittajagranuloijalla valmistettujen granulaattien välissä, sekä kyseisellä prosessilla on hankalaa tehdä huokoisia granulaatteja. (Ennis 2010b s. 50.)

Sekoittajagranulaattoreiden liike tuotetaan mekaanisella sekoittajalla, jonka muotoilu voi vaihdella hyvin paljon valmistajien ja käyttökohteen välillä. Sekoittajagranuloijissa valmiin tuotteen kokoon ja tiheyteen voidaan vaikuttaa säätämällä nestefaasin määrää, massan reologisia ominaisuuksia, sekä sekoituksen kestoa ja tehoa. Granulaatit ovat tyypillisesti

tiivaita, sekä kosteus on hyvin vähäistä. Matalanopeuksiset sekoittajat pyörivät alle 100 kierrosta minuutissa, mutta sekoitusajat ovat myös melko pitkiä, 20–40 minuuttia. Tämän tyyppiset koneet ovat usein korvattu korkeanopeuksisilla granulointikoneilla, joissa työaika on huomattavasti pienempi, noin 5–10 minuuttia. Sekoittajagranulaattoreiden etuihin kuuluu, että niillä pystyy työstämään muoveja, sekä tahmeita tai hydrofobisia materiaaleja. Prosessin hallinta saattaa kuitenkin olla hankalaa johtuen suuresta materiaalinvaihtelusta ja vaikeasta parametrien vertailtavuudesta. (Ennis 2010b, s. 51–52.)

Kuivatoimisissa granulointilaitteistoissa materiaali puristetaan kahden pinnan väliin tai materiaali puristetaan ekstruuderin läpi. Kuivatoimiset laitteet ovat paljon herkempiä käytettävän materiaalivirran tasalaatuisuudelle ja materiaaliominaisuuksille verrattuna märkätoimisiin laitteisiin. Lisäksi kuivatoimisilla laitteilla tehdään usein paljon tiiviimpiä granulaatteja verrattuna märkätoimisiin laitteisiin. (Ennis 2010b, s. 52–54.)

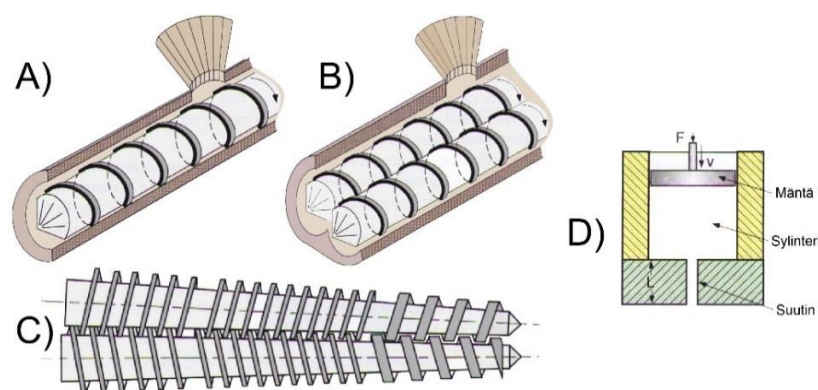
Agglomerointilaitteiston valintaan vaikuttaa ensisijaisesti halutut lopputuotteen ominaisuudet ja prosessin erityisominaisuudet, esimerkiksi kosteus- ja lämpöherkkyys. Lopputuotteen ominaisuuksista tulee määrittää agglomeraatin tavoiteltava tiheys ja kokojakauma. Märkägranuloinnilla saavutetaan matala- ja keskitiheyksisiä granulaatteja vaihtelevalla muodolla. Prosessin muita kuluja voivat aiheuttaa mahdollisesti käytettävät sideaineet, sekä materiaalin kuivaus. Kuivagranulointi sopii kosteusherkille materiaaleille, joiden ominaisuudet tunnetaan. Kuivagranuloinnille haasteita aiheuttaa kovat, hauraat, elastiset ja hiovat partikkelit. Parhaiten prosessin materiaalinvaihtelua kestää nestepetilaitteisto, jonka jälkeen prosessien järjestys on rumpu- ja kiekkoagranulaattorit, sekoittajat, tablettikoneet ja rullatoimiset granulointilaitteet. (Ennis 2010b, s. 54.)

Puumuovikomposiittien valmistaminen voidaan tehdä yksi- tai kaksiaskeleisena prosessina. Yksiaskelisessa materiaali yhdistetään raakamateriaalin sekoitus ja valmiin tuotteen puristus samaan työvaiheeseen, kun kaksiaskeleisessa prosessissa ensin valmistetaan granulaatti, jota käytetään prosessin seuraavassa vaiheessa. Kaksivaiheisessa prosessissa materiaali lämmitetään kahdesti ja se on jäähtyneenä työvaiheiden välissä. (Benthien & Thoemen 2013, s. 3710.) Lu, Wu ja Negulescu (2014) tutkivat puu-HDPE-komposiitin kompandointiprosessin vaikutusta komposiitin valmistuksessa. Tutkimuksessa vertailtiin yksi- ja kaksiaskeleista prosessia puun ja muovin massasuhteiden ollessa samat. Tutkimuksen

tuloksena saavutettiin kaksiaskeleisessa prosessissa parempia rajapinnan yhteensopivuusominaisuuksia, sekä parempi sekoittuvuus materiaalien välillä. (Lu et al. 2004, s. 2570–2578.)

4.2.2 Ekstruusio

Ekstruusio, eli suulakepuristus, on yleisin muovien valmistusmenetelmä, jossa materiaalivirta puristetaan suuttimen läpi haluttuun muotoon. Ekstruusiossa käytettävän koneen, ekstruuderin, tärkein tehtävä on kuljettaa materiaalivirtaa suuttimelle, sekä ylläpitää prosessissa tarvittavaa painetta. Ekstruuderin voi olla toteutettu joko yhdellä tai useammalla ruuvilla, tai mäntäpuristimena (kuva 17). Lisäksi harvemmin käytettyjä ekstruuderityyppejä ovat rumpu- ja kiekkoekstruuderit. (Rauwendaal 2010, s. 1–4.)



Kuva 17. Ruuviekstruuderityypit. A) Yksiruuvinen ekstruuderit, B) Kaksiruuvinen ekstruuderit samaan suuntaan pyörivillä ruuveilla, C) Kaksiruuvinen ekstruuderit vastakkaisiin suuntiin pyörivillä ruuveilla, D) Mäntäpuristin. (Mukaillen: Rauwendaal 2010, s. 2–4.)

Yksiruuvinen ekstruuderit on yleisimmin muoviteollisuudessa käytetty laite, jossa ruuvi pyörii sylinterissä työntäen materiaalia kohti suutinta. Yleisin moniruuvinen ekstruuderit on kaksiruuvinen ekstruuderit, jossa ruuvit voivat pyöriä toisiinsa nähden samaan suuntaan tai eri suuntaan. Yleisimpien kaksiruuvisten ekstrudereiden ruuvit pyörivät toisiinsa verrattuna vastaisiin suuntaan, koska ratkaisulla saadaan tehokkaampi materiaalikuljetusominaisuus ekstruusiossa. Mäntäpuristimen toiminta taas perustuu mäntään, joka puristaa sylinterissä olevan massan suuttimen läpi. Menetelmän etuina ruuvipuristukseen verrattuna ovat mahdollisuudet käyttää korkeita paineita. Mäntäpuristuksen kapasiteetti on kuitenkin pieni

verrattuna ruuvipuristuksen, eikä sitä käytetä yleisesti tavallisten muovien muovauksessa. Suulakepuristettujen kappaleiden valmistukseen tarvitaan ekstruuderin lisäksi materiaalin annosteluyksikkö, kuivauslaitteisto, jälkimuotoilu- tai kalibrointilaitteisto, jäähdytyslaitteisto, purkulaitteisto, sekä leikkuri. (Rauwendaal 2010, s. 1–4, 31.)

Puumuovikomposiittien valmistuksessa ekstruuderilta vaaditaan, että laitteisto sulattaa käytettävän polymeerin, sekä sekoittaa prosessissa käytettävät raaka-aineet. Yksinkertaisimmillaan puumuovikomposiittien valmistuksessa voidaan käyttää yksiruuvista ekstruuderia, jonka pituuden ja halkaisijan suhde on tyypillisesti 34:1. Yksiruuvisen ekstruuderin etuihin lukeutuu teknologian tunnettavuus, sekä ekstruuderityypeistä pienimmät investointikustannukset. Negatiivisina piirteinä yksiruuvisen ekstruuderin hankinnassa tulee huomioda, että käytettävä raaka-aine tulee olla esikäsitelty homogeeniseksi materiaaliksi. Lisäksi yksiruuvisen ekstruuderin tuotantokapasiteetti on pienempi verrattuna useampiruuvisiin malleihin, sekä laite vaatii kuivauslaitteiston. Myös erillistä huomiota tulee kiinnittää käytettäviin lämpötiloihin, jottei raaka-aineen sisältämä puukuitu ala hajoamaan liian korkeissa lämpötiloissa. (Kim & Pal 2010, s. 69–70.)

Vastakkaisiin suuntiin pyörivillä ruuveilla toteutettua ekstruuderia voidaan käyttää lämpöherkille polymeereille, ei-kompaundoituille materiaaleille, hankalasti syötettäville materiaaleille, sekä kaasunpoistoa vaativille materiaaleille. Tämän ekstruuderityypin etuihin kuuluvat puumuovikomposiitin valmistuksessa pienempi ruuvien kierrosnopeus ja teknologian tunnettavuus. Vastakkaisiin suuntiin pyörivillä ruuveilla toteutettu ekstruuderivaatii kuitenkin kuivaus-, sekä esisekoituslaitteiston. Lisäksi partikkelikoon pienennys voi olla joskus tarpeellista. (Kim & Pal 2010, s. 70–71.)

Samaan suuntaan pyörivillä toteutettua ekstruuderia käytettäessä voidaan käyttää kuitumateriaalia, jonka kosteus on 5–8 %, sekä polymeerit ja lisäaineet voivat olla ominaiskosteudessaan. Lisäksi erillistä raaka-ainesekoitinta ei tarvita, vaan syöttö voidaan toteuttaa esimerkiksi gravimetrisestä annostelijasta. Negatiivisiin ominaisuuksiin tässä ekstruuderimallissa lukeutuu se, että prosessiin tarvitaan oheissyöttölaitteisto ja ruuveja joudutaan käyttämään suurella kierrosluvulla. Ruuveja ei myöskään voi vesijäähdyttää, joten lämpötilan pitäminen alhaisena paineiden ollessa korkeana voi aiheuttaa haasteita. (Kim & Pal 2010, s. 71–72.)

4.2.3 Ruiskuvalu

Ruiskuvalu on yleisesti muoveille käytetty valmistusmenetelmä, jolla voidaan valmistaa kappaleita, joiden muoto ei sovellu ekstruusiomenetelmään tai muihin muovausmenetelmiin. Ruiskuvalua voidaan käyttää puumuovikomposiittien valmistuksessa, mikäli materiaalilla on soveltuvat virtausominaisuudet, tai virtausominaisuudet ovat mahdollista tuottaa lämpötilan ja paineen avulla. Ruiskuvaluprosessin etuihin lukeutuu, että kappaleet voivat olla täysin käyttövalmiita, kun ne poistetaan muotista. Ruiskuvalulaitteiston osia ovat ruiskuvalukone ja -muotti. Lisäksi usein tarvitaan erillään oleva temperointiin käytettävä laitteisto. Lisäksi ruiskuvalulaitteistoon kuuluu annosteluyksikkö, jonka tehtävänä on syöttää ja plastisoida raaka-aine. Ruiskuvaluprosessi soveltuu käytettäväksi myös suuriin sarjakokoihin. Lisäksi käytettävissä on myös kuumakanavamuottitekniikka, jolla voidaan valmistaa useita kappaleita yhdellä valukierrolla. (Höök & Nykänen 2015, s. 1–2.)

Ruiskuvalussa materiaalin kovettumisaika muotissa on noin 20–120 sekuntia riippuen kappaleen koosta. Ruiskutusaineina muoveille käytetään yleisesti 40–200 MPa, riippuen käytettävästä materiaalista ja kappaleen muodoista. Ruiskuvalukoneen koko määräytyy yleisesti suurimman muottikoon, annoksen suuruuden ja puristusvoiman mukaan. Ruiskuvalukoneiden pääperiaate vaihtelee sen mukaan, onko koneen puristussuunta vertikaalinen vai horisontaalinen. Ruiskuvalumenetelmän etuina voidaan pitää laajaa raaka-ainevalikoimaa, tasalaatuisia tuotteita, lyhyttä konetyöaika, hyvää automatisointimahdollisuutta, sekä mahdollisuutta valmistaa monimutkaisia tuotteita. Negatiivisina puolina ruiskuvalussa voidaan pitää suuria laite- ja muottikuluja, suunnattujen lujitteiden käyttömahdottomuutta, sekä suurien kappaleiden valmistamisen taloudellisuutta. (Saarela et al. 2007, s. 176–179.)

5 AINEISTO JA MENETELMÄT

Tässä kappaleessa esitetään tutkimuksen suoritusmenetelmät näytteenotosta valmistetun materiaalin testaukseen. Kappaleessa käsitellään käytetyt laitteistot, valmistettujen materiaalien raaka-aineet, sekä toimintatavat materiaalien käsittelylle. Materiaalien testauksen esityksessä käsitellään ohjaavat standardit ja niiden suoritustavat.

5.1 Näytteenotannon suorittaminen ja materiaalien käsinlajittelu

Näytteenotto suoritettiin rakennus- ja purkujätealalla toimivan yrityksen kahdesta toimipisteestä. Toimipisteet ovat nimetty toimipisteeksi 1 ja toimipisteeksi 2. Toimipisteiden pihaan saapuu päivässä useita kuorma-autoja, jotka tulevat tuomaan materiaalia kierrätyspisteeseen. Kaikki kuormat ovat näytteenottopäivänä saapuneita kuormia, jotka ovat otettu sivuun tutkimusta varten. Kuorman valinta arvioitiin vastaanottopisteessä kriteerillä ”sekalainen rakennus- ja purkujäte”. Näytteet pakattiin käsineen suursäkkeihin kuljetusta varten. Näytteenotossa materiaalia pakattiin säkkiin sattumanvaraisesti siten, että näytteestä saataisiin kuormaa kuvaava otos. Kuvassa 18 on esitetty materiaalien käsittelyn eteneminen tässä tutkimuksessa.

Toimipisteiltä kerätyt näytemateriaalit kuljetettiin Ruokolahdelle Lappeenrannan teknillisen yliopiston tiloihin materiaalinmääritystä varten. Koemateriaalin lajittelu suoritettiin kevytpeitteen päällä hallitiloissa. Materiaali määritettiin kuuluvan yhteen seuraavista yhdeksästä kategoriasta:

1. pahvi ja paperi
2. kipsi
3. betoni ja posliini
4. mineraalivilla
5. puu
 - sisältää: lastulevy, vaneri, kova kuitulevy, kertopuu
6. metalli
7. muovi

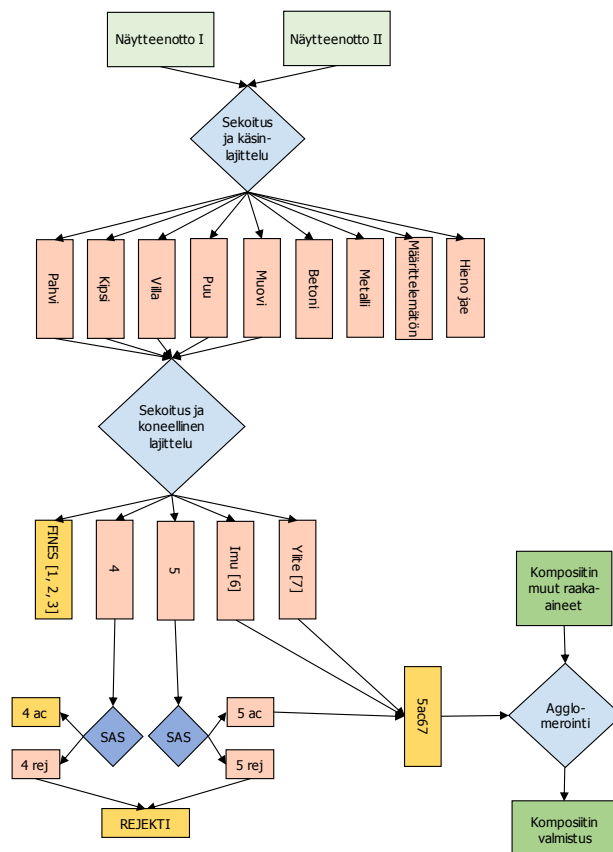
- tarkemmassa erottelussa vielä: jatkokäyttöön soveltuvat pakkausmuovit, jatkokäyttöön soveltuvat kovat muovit, sekä komposiitin valmistuksessa hylättävät polystyreeni, PVC, solumuovi ja tunnistamaton muovi.

8. määrittelemätön

- edeltäviin kategorioihin kuulumattomat materiaalit
- tarkemmassa erottelussa lajiteltu eräkohtaisesti

9. hieno jae

- sisältäen ”pohjamujun”
- käsinerottelu haastavaa



Kuva 18. Tutkimuksen materiaalien käsittely prosessimuotoisesti. Käsinsortelun tuloksena kaksi näytettä jaetaan yhdeksään lajiteltuun jakeeseen, joista koneelliseen lajitteluun sekoituksen jälkeen menee viisi jakeita: paperi ja pahvi, kipsi, villa, puu ja muovi. ClassiScreen-käsittelyn tuloksena saavutetaan 7 jakeita, joista kolme hienointa jakeita luetaan kategoriaan ”fines”. Jakeet 4 ja 5 käsitellään SAS-ilmaerottimella, jonka tuloksena saavutetaan ”ac”- ja ”rej”-jakeet. Komposiitin valmistukseen valitaan ominaisuuksiltaan sopivat jakeet, mihin lisätään tarvittavia muita raaka-aineita.

5.2 Materiaalien murskaus ja sekoitus

Murskaukseen menevistä materiaaleista poistetaan metallit ja prosessiin päätyvät aineet, kuten kielletyt muovit. Esivalmistelun jälkeen murskaukseen menevä jae materiaali punnitaan. Murskattavia materiaaleja ovat: muovi, villa, pahvi, puu ja kipsi.

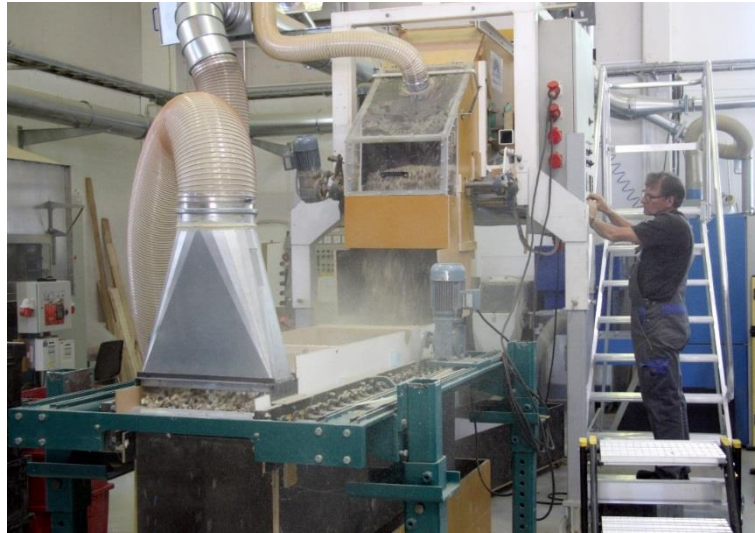
Materiaali murskattiin yksiroottorisella UNTHA LR630 murskaimella, joka on varustettu hydraulisella syöttösylinterillä. Murskaimen seulakoko on 20 mm ja roottorin nopeus 98 kierrosta minuutissa. Murskauksen jälkeen materiaalin massa määritettiin ja murskatut jakeet sekoitettiin keskenään. Sekoitetulle materiaalille määritettiin lisäksi irtotiheys.

5.3 Seula-analyysi

Seula-analyysi tehtiin Retsch:n valmistamalla AS 200 Basic-analyysiseulalla. (Retsch, 2016.) Materiaalieristä otettiin mahdollisimman kuvaava näyte seulottavaksi ja seulonta-aikana käytettiin kolmea minuuttia. Seula-analyysin tuloksena saadaan 10 jakeen materiaalityyppien eri partikkelikokojen suhteen. Seulakokoina käytettiin: 5,60; 2,80; 2,00; 1,40; 1,00; 0,71; 0,50; 0,315 ja 0,212 millimetriä.

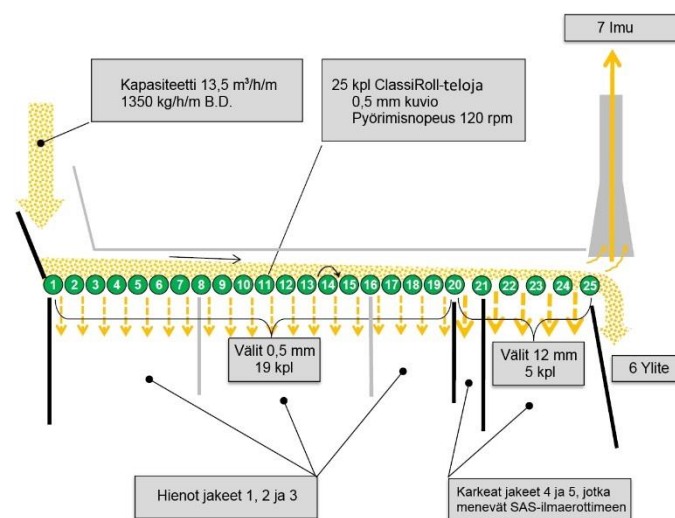
5.4 Koneellinen lajittelu Dieffenbacher Panelboard Oy:ssä

Sekoitetun koemateriaalin koneellinen lajittelu suoritettiin Dieffenbacher Panelboard Oy:n tiloissa Nastolassa, Lahdessa. Koneellisessa lajittelussa käytettiin sekä ClassiCleaner-lajittelukonetta, sekä SAS (Sand Separator)-ilmaerotinta. Kuvassa 19 on esitetty tutkimuksessa käytetty laboratoriokokoinen ClassiCleaner-laitteisto. Käsittelyn avulla voidaan erottaa kaikkiaan 9 jakea, joista 7 erotetaan ClassiScreen-koneella ja näistä kaksi jaetaan kumpikin kahteen jakeeseen SAS-ilmaerottimella.



Kuva 19. Tutkimuksessa käytetty ClassiCleaner-laitteisto ajossa.

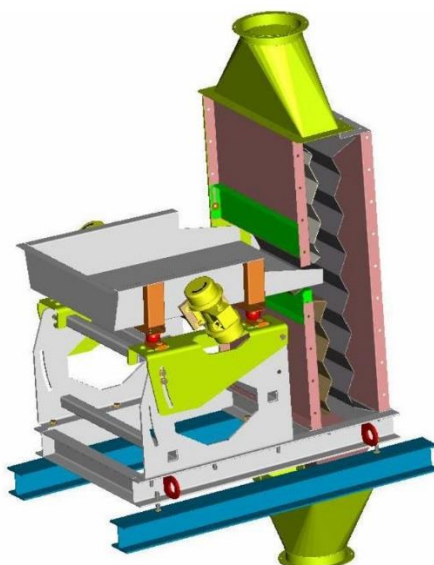
Laitteen lajittelutelasto koostuu 25 kappaleesta ClassiRoll-teloja, jotka ovat kuvioitu 0,5 mm kuviolla. Koneen lajittelu perustuu siihen, että materiaali kulkee telastoa pitkin tai putoaa joidenkin ClassiRoll-telojen välistä omaan laskukouruun. Telaston 19 ensimmäistä väliä ovat kapeita ja näiden välien tehtävänä on erottaa hienot jakeet 1, 2 ja 3. Tämän jälkeen välin koko kasvaa moninkertaiseksi, ja näiden välien tehtävänä on erottaa karkeat jakeet 4 ja 5. Telaston päässä materiaalille on vaihtoehtoisia reittejä kulkeutua imuun ylöspäin (7) tai ylittää telasto (6). Periaatekuva laitteistosta selitteineen on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Periaatekuva tutkimuksessa käytetystä ClassiCleaner-lajittelukoneesta (mukaillen: Erämaja 2016, s. 23).

ClassiScreen-lajittelukoneen syöttö telastolle tehtiin syöttöbunkkerista tasaiseksi materiaalivirraksi, jonka suuruutta voidaan säätää kapasiteettiarvoa muuttamalla. Laitteistossa käytetyt parametrit perustuvat aiemmin tutkittuihin arvoihin, joita on käytetty rakennusjätteen lajittelussa. ClassiScreen-koneen parametreina käytettiin kapasiteettiasetusta $13,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, sekä telaston pyörimisnopeutena 120 kierrosta minuutissa. Hienon jakeen erotukseen ClassiRoll-telojen välinä käytettiin 0,5 mm väliä ja karkean jakeen erotukseen välin kokona käytetään 12 mm. Laboratoriokokoisen ClassiScreen-koneen telan leveys on 500 mm.

Jakeet 4 ja 5 ohjataan erillisinä jakeina uudelleenlajitteluun SAS-ilmaerottimeen. Ilmaerottimessa materiaali ohjataan ylöspäin nousevaan ilmavirtaukseen, jossa materiaali erottuu riippuen siitä, lähteekö materiaali ilmavirtauksen mukana ylöspäin vai tippuuko materiaali alaspäin. Lisäksi SAS-ilmaerottimen sisäseinät ovat rakennettu profiililtaan sellaisiksi, että materiaali joutuu kosketuksiin seinämien kanssa liikkeessa ylös tai alaspäin. Näiden sisäseinäosumien tarkoituksena on erottaa toisiinsa kiinnittyneet materiaalit puhtaamman lajittelutuloksen saavuttamiseksi. Tutkimuksessa käytetyssä SAS-ilmaerottimessa syöttö laitteeseen toteutettiin tärytinpöydällä, joka näkyy myös kuvassa 21.



Kuva 22. Periaatekuva SAS-ilmaerottimesta ja tärytinpöydästä (Dieffenbacher GmbH 2015b, s. 34).

SAS-ilmaerottimen tekemään erotteluun voidaan vaikuttaa säätämällä potentiometrillä ylöspäin menevän ilmavirtauksen nopeutta. Ilmavirtausta pienentämällä lisätään alas putoavan jakeen massaa. Ilmaerottimen erottelemat jakeet on nimetty 4 ac, 4 rej, 5 ac ja 5 rej. Ac tarkoittaa ilmaerottimessa ylöspäin kulkeutunutta jaetta, ja rej tarkoittaa ilmaerottimessa alas pudonnutta jaetta.

5.5 Agglomerointi ja hienonnus

Komposiitin muut tässä tutkimuksessa käytetyt raaka-aineet rakennus- ja purkujätteen ohella ovat kierrätetty PE-muovi, puu, voiteluaine, sekä kytkentäaine. Puumateriaalina käytetään kuusta, joka on murskattu vasaramyllyllä 2 mm seulaverkon läpi. Sekoitettu komposiitin raaka-aineseos agglomeroitiin Plasmec:in valmistamalla laitteistolla. Laitteisto koostuu Plasmec TRL-100/FV/W-laitteesta, joka lämmittää materiaalin prosessin seuraavaa vaihetta varten. Materiaalista poistettiin ylimääräisiä höyryjä ja muita kaasuja Plasmec DVW-4-tyhjiöimurilla. Materiaalin lämmityksen ja kaasujen poiston jälkeen massa siirtyy Plasmec RFV-200-vesikiertoiseen jäähdytimeen, minkä jälkeen materiaali poistetaan laitteistosta valmiina agglomeraattina. Agglomeraatti murskattiin vielä vasaramyllyllä 2 mm seulaverkon läpi mahdollisimman hyvän sekoittumisen, sekä tasalaatuisuuden varmistamiseksi. Kuvassa 23 on esitetty tutkimuksessa käytetty agglomerointilaitteisto.



Kuva 23. Plasmec agglomerointilaitteisto.

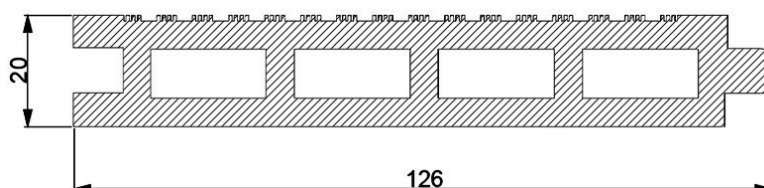
5.6 Ekstruusio

Koemateriaalin ekstruusio suoritettiin Hans Weber Maschinenfabrik GmbH yrityksen valmistamalla kaksiruuvisella CE 7.2 FE-ekstruuderilla. Tutkimuksessa käytetty ekstruusiolaitteisto on esitetty kuvassa 24. Ekstruuderin syöttölaitteistona käytettiin ConPro KTW CP 22- gravimetristä annosteluyksikköä, joka soveltuu käytettäväksi vapaasti virtaaville materiaaleille. Materiaali annosteltiin yhdestä syöttökaukalosta hienonnettuna agglomeraattina.



Kuva 24. CE 7.2 FE ekstruusiolaitteisto ConPro-syöttölaitteistolla.

Ekstruuderin ohjaukseen käytetään Weber-Prozessleitsystem (WPS)-prosessinohjausjärjestelmää. Ekstruuderin lisänä käytetään Weber RA 302-vetolaitetta, sekä Weber TS 403-katkaisulaitteistoa. Materiaali valmistetaan ekstruuderilla terassilaudan muotoon, josta voidaan valmistaa koekappaleet materiaalitestauksia varten. Terassilaudan profiili on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Ekstruusiopuristuksessa käytetty suuttimen profiili.

5.7 Materiaalin testausmenetelmät

Komposiitin valmistuksen jälkeen materiaaleista valmistettiin koekappaleet materiaaalintestausta varten. Valmistetuille komposiiteille määritettiin taivutuskimmomoduuli ja taivutuslujuus, iskusitkeys, vetolujuus ja vetomoduuli, painaumakestävyys, sekä veden absorptio ja paksuusturpoama. Jokaisesta valmistetusta komposiitista tehtiin 20 koekappaletta jokaista testiä varten. Kaikki koemateriaalit käytetään olosuhdekaapissa, jossa niiden annetaan tasaantua vähintään 48 tuntia 50 % suhteelliseen kosteuteen ja 23 °C lämpötilaan ennen materiaalitestausta. Koekappale otettiin materiaalitestaukseen olosuhdekaapistä siten, että koekappale ei ole merkittävässä vaikutuksessa ympäristöön ennen käyttöä.

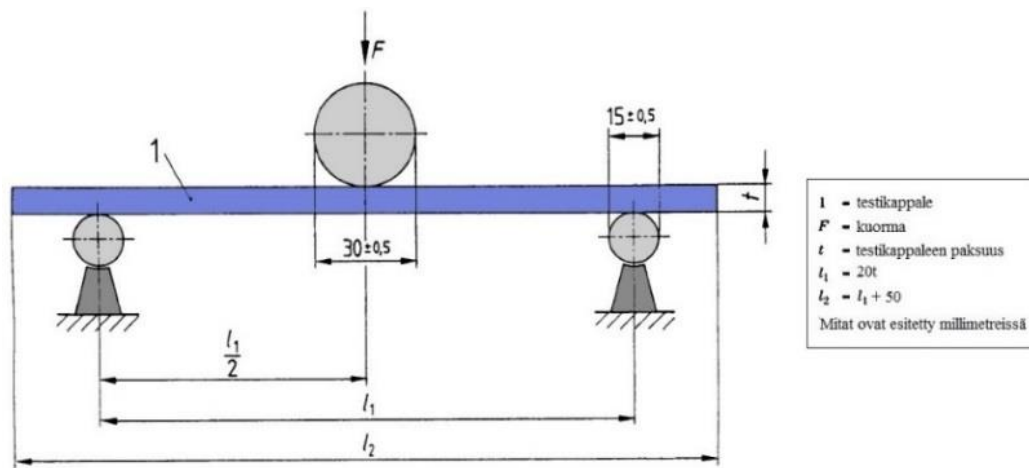
Tutkimuksessa käytetään referenssinä R262-puumuovikomposiittia, joka on valmistettu Lappeenrannan teknillisen yliopiston Ruokolahden toimipisteellä samoilla laitteilla kuin tutkimuksessa valmistetut komposiitit. Komposiitin testauksessa on käytetty samoja testausmenetelmiä ja standardeja, joten komposiittien ominaisuudet ovat vertailukelpoisia. Komposiitti R262 sisältää 36 % kytKentä- ja voiteluaineistettua polypropeenaa, sekä 64 % vasaramyllyllä murskattua kuusta. Komposiitin testaus on suoritettu ennen diplomityön aloittamista.

Toisena referenssimateriaalina käytetään yrityksen toimipisteeltä 2 kerätystä rakennus- ja purkujätteestä valmistettua komposiittia. Materiaalin keräys ja käsinlajittelu tehdään yhtäläisesti muiden materiaalien kanssa, mutta materiaali ei käy koneellista lajittelua Dieffenbacher Panelboard Oy:n laitteiston läpi. Materiaalien jakaumien mukaisesti referenssimateriaalista valmistetaan komposiittia, joka sisältää 94 % sekalaista rakennus- ja purkujätettä, sekä 6 % kytKentä- ja voiteluaineita.

5.7.1 Taivutuskimmomoduuli ja taivutuslujuus

Komposiittien taivutuslujuuden määrittäminen suoritettiin SFS-EN 310 (1993) (Puulevyt. Taivutuskimmomoduulin ja taivutuslujuuden määrittäminen) -standardin mukaisesti. Standardin mukainen testaus määrittää puupohjaisille levyille todennäköisen taivutuskimmomoduulin ja taivutuslujuuden tason suuntaisessa taivutuksessa. Levyn nimellispaksuus standardissa on määrätty yhtä suureksi tai suuremmaksi kuin 3 mm. (SFS-EN 310, 1993, s. 1.)

Standardin mukaisessa testauksessa koekappale asetetaan kahden tuen väliin, minkä jälkeen koekappaleen keskelle tuodaan kuormaa rikkoumaan asti. Testikappaleen leveys tulee olla standardin mukaan (50 ± 1) mm. Ekstruuderilla valmistetuille tai muutoin onttoja rakenteita sisältäville kappaleille on esitetty erilliset vaatimukset testikappaleen sisärakenteesta. Testikappaleen tukien väli tulee olla 20 kertaa ominaispaksuus, mihin lisätään 50 mm. Standardin mukaisesti testikappaleiden tulee tasaannuttaa (65 ± 5) % suhteelliseen kosteuteen, sekä (20 ± 2) °C lämpötilaan. Kuvassa 26 on esitetty periaatekuva taivutuskokeen suorittamisesta, sekä mitoista. (SFS-EN 310 1993, s. 7.)



Kuva 26. Taivutuslujuuden ja taivutuskimmomodulin määrittämiseen käytettävän laitteiston määrittely (SFS-EN 310 1993, s. 8).

Mittalaitteena käytettiin Zwick:in valmistamaa Z020-mittalaitetta, mikä on kytketty sitä ohjaavaan tietokoneeseen. Kuvassa 27 on esitetty Zwick-mittalaite varustettuna taivutuslujuuslaitteistolla.



Kuva 27. Tutkimuksessa käytetty Zwick Z020-mittalaite taivutuslujuuden ja taivutusmoduulin määrittämislaitteistolla varustettuna.

Standardin mukaisen testauksen tuloksena koekappaleelle voidaan laskea taivutuskimmomoduuli E_m seuraavalla kaavalla (SFS-EN 310 1993, s. 9.):

$$E_m = \frac{l_1^3 (F_2 - F_1)}{4bt^3(a_2 - a_1)} \quad (1)$$

Yhtälössä 1 l_1 on tukien etäisyys toisistaan, b on testikappaleen leveys, t on testikappaleen paksuus. Mitat ovat esitetty millimetreissä. Lisäksi yhtälössä 1 $F_2 - F_1$ on kuorman muutos kuorma-taipumakäyrän suoraviivaisella osalla, sekä $a_2 - a_1$ on taipuman muutos testikappaleen keskellä. (SFS-EN 310 1993, s. 9.)

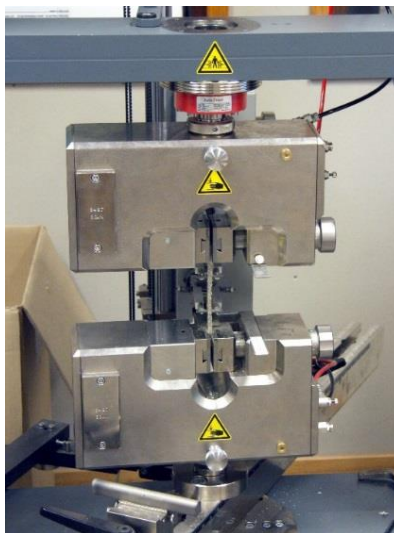
Vastaavasti taivutuslujuus f_m voidaan laskea testikappaleelle seuraavalla kaavalla (SFS-EN 310, 1993, s. 9.):

$$f_m = \frac{3F_{max}l_1}{2bt^2} \quad (2)$$

Yhtälössä 2 F_{max} on maksimikuorma newtoneina. Testauksen tulokset taulukoidaan ja esitetään voima-venymäkäyrässä. (SFS-EN 310 1993, s. 9.)

5.7.2 Vetolujuus

Materiaalin vetolujuus ja vetomoduuli määritettiin tutkimuksessa standardin SFS-EN 527-2 (2012) (Plastics. Determination of tensile properties. Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics (ISO 527-2:2012)) mukaisesti. Standardin mukainen suositus kappaleiden olosuhteille on (23 ± 2) °C lämpötila ja (65 ± 5) % suhteellinen kosteus. Koekappaleesta mitataan paksuus ja kapean alueen leveys, jonka jälkeen koekappale asetetaan vetokoneen leukojen väliin. Kappaleeseen kohdistuva voima asetetaan nollapisteeseen, jonka jälkeen ekstensiometri voidaan asettaa testikappaleen pintaan. Kuvassa 28 on esitetty vetokoneen leukojen välissä oleva kappale, jonka pintaan on asetettu ekstensiometrin veitset. Tiedonkeruu tehdään automaattisesti testilaitteiston avulla ja vetolujuuden, sekä vetomoduulin laskenta tapahtuu tietokoneen automaattisena toimintona (SFS-EN 527-1 2012, s. 11–15.)

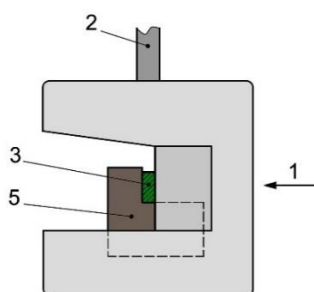


Kuva 28. Vetolujuuden ja vetomoduulin määrittämisessä käytetty laitteisto. Kuvassa koekappale, joka on vetoleukojen välissä ekstensiometri kytkettynä.

5.7.3 Iskusitkeys

Koekappaleille tehdään iskusitkeyden määrittäminen standardin SFS-EN ISO 179-1 (2010) (Plastics. Determination of Charpy impact properties. Part 1: Non-instrumented impact test) mukaisesti. Standardi soveltuu käytettäväksi ekstruusiomuovatuille ja termoplastisesti

muovatuille materiaaleille, jotka voivat sisältää vahvisteena tai täyteaineena toimivia komponentteja. Testauksessa koekappale tuetaan päistään testilaitteeseen, jolla tuodaan kappaleeseen yksi heilurivasaran isku, mikä aiheuttaa iskurille nopeuden pienentymistä. Standardissa määrätään koelaitteistolle ja koekappaleille, sekä mittavälineille rajat, sekä tarkkuudet. Koemenettely on määrätty standardissa SFS-EN 15534-1 tehtäväksi suoritustavan ISO 179-1/1fU-mukaisesti. Kyseisessä suoritustavassa koekappale on loveamaton, sekä isku tulee kohtisuoraan koekappaleen leveämpään pintaan kuvan 29 mukaisesti. (SFS-EN ISO 179-1 2010, s. 1, 3)



Kuva 29. Charpy-iskukokeen suoritustapa. Kuvassa numero 1 tarkoittaa iskun suuntaa, 2 heilurivasaran vartta, 3 koekappaletta, 5 tukea. (SFS-EN ISO 179-1, 2010, s. 4.)

Koekappaleen pituus on (80 ± 2) mm, leveys on $(10,0 \pm 0,2)$ mm, kappaleen paksuus $(4,0 \pm 0,2)$ mm, sekä tukien jänneväli on $(62 - 62,5)$ mm. Lisäksi koekappaleet tulee olla standardin mukaisesti tasaannutettu vähintään 16 tuntia (23 ± 2) °C lämpötilaan ja (50 ± 5) % suhteelliseen kosteuteen. Heilurivasaran kokona tutkimuksessa käytettiin 5 kpcm. Koekappale voi saada kovuuskokeessa neljä erilaista murtumatyyppiä, jotka ovat C, H, P ja N. C tarkoittaa täyttä murtumaa, jossa kappale menee kahteen tai useampaan osaan, H tarkoittaa saranamaista epätäydellistä murtumaa, jossa kappaleet ovat kiinni toisissaan saranamaisesti ohuella osalla materiaalia. P tarkoittaa osittaista epätäydellistä murtumaa, mikä ei täytä saranamaisen murtuman määritelmää. N tarkoittaa, ettei kappale murtunut. Kuvassa 30 on esitetty käytetty Charpy-iskukoelaitteisto. (SFS-EN ISO 179-1 2010, s. 3, 11–12.)



Kuva 30. Tutkimuksessa käytetty Charpy-iskukoelaitteisto.

Iskulujuus loveamattomalle kappaleelle a_{cU} lasketaan seuraavalla kaavalla (SFS-EN ISO 179-1 2010, s. 12.):

$$a_{cU} = \frac{E_c}{hb} \times 10^3 \quad (3)$$

Yhtälössä E_c tarkoittaa koekappaleeseen kohdistettua voimaa jouleina, mikä on absorboitunut törmäyksessä. Yhtälössä h tarkoittaa testattavan kappaleen paksuutta millimetreinä ja b tarkoittaa testattavan kappaleen leveyttä millimetreissä. (SFS-EN ISO 179-1 2010, s. 12.)

5.7.4 Painaumakestävyys

Painaumakestävyys määritetään standardin SFS-EN 1534 (2011) (Wood flooring. Determination of resistance to indentation. Test method) mukaisesti. Koekappale asetetaan painumattomalle testialustalle painimen alle. Painimena käytetään $\varnothing(10 \pm 0,01)$ mm karkaistua teräskuulaa. Painimen pää asetetaan koekappaleen pinnalle, jonka jälkeen voimaa lisätään 1000 N arvoon asti siten, että 1000 N voima saavutetaan (15 ± 3) s ajan päästä painamisen aloittamisesta. Saavutettua 1000 N voimaa pidetään yllä (25 ± 5) s ajan, minkä jälkeen voima vapautetaan täysin. Voiman vapautuksen jälkeen odotetaan vähintään 3 minuutin ajan, jonka jälkeen painauma mitataan pituus- ja poikittaissuunnassa vähintään $\pm 0,2$ mm tarkkuudella. (SFS-EN 1534 2011, s. 7-8.)

Mittausten perusteella voidaan laskea Brinell-kovuus HB seuraavalla kaavalla (SFS-EN 15534 2011, s. 8.):

$$HB = \frac{2F}{g \cdot \pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (4)$$

Kaavassa 4 HB tarkoittaa Brinell-kovuutta, joka on esitetty muodossa: (N/mm^2), g tarkoittaa putoamiskiihtyvyyttä muodossa (m/s^2), F tarkoittaa maksimikuormaa newtoneissa, D on kuulan halkaisija millimetreissä, sekä d on painauman halkaisija millimetreissä, joka on saatu keskiarvona kahdelle mittaukselle. (SFS-EN 1534 2011, s. 8.)

5.7.5 Veden absorptio ja paksuusturpoama

Veden absorptio ja paksuusturpoama määritetään standardin SFS-EN 317 (1993) (Lastulevyt ja kuitulevyt. Paksuusturpoaman määrittäminen vesiliotuksen jälkeen) mukaisesti, kuitenkin standardin SFS-EN 15534-1 (2014) (Composites made from cellulose-based materials and thermoplastics (usually called wood-polymer composites (WPC) or natural fibre composites (NFC)). Part 1: Test methods for characterization of compounds and products) määrittämin tarkennuksin. Testauksessa koekappaleista mitataan täyden upotuksen aiheuttaman paksuusturpoaman suuruus. Koekappaleet ovat neliöitä, joiden sivun pituus on (50 ± 1) millimetriä. Standardin mukaisesti koekappaleet tulisi tasaannuttaa (65 ± 5) % suhteelliseen kosteuteen, sekä (20 ± 2) °C lämpötilaan. Tässä tutkimuksessa kaikki näytekappaleet tasaannutettiin 23 °C lämpötilaan, sekä 50 % suhteelliseen kosteuteen. Paksuudenmäärittäminen tulee tehdä kappaleille $\pm 0,01$ mm tarkkuudella. Tutkimuksessa koekappaleen paksuuden määrittäminen tehtiin mikrometriä käyttäen. (SFS-EN 317 1993, s. 3; SFS-EN 15534-1 2014, s. 26.)

Kappaleiden upotus tulee tehdä puhtaaseen seisovaan veteen, jonka pH-arvo on 7 ± 1 , sekä lämpötila (20 ± 2) °C. Standardin mukaisesti koekappaleet tulee erottaa toisistaan, eivätkä kappaleet saa osua upotusaltaan pohjaan. Kappaleen yläreunasta vedenpintaan tulee olla (25 ± 5) mm matka testin ajan, sekä vesi tulee vaihtaa jokaisen mittauksen jälkeen. Kappaleet mitataan ja 24 tunnin, sekä 2, 4, 7, 14 ja 28 päivän jälkeen upotustestin aloittamisesta. Paksuusturpoaman lisäksi kappaleista mitataan leveyden ja pituuden muutos työntömittaa käyttäen. Lisäksi koekappaleista tulee mitata massan muutos jokaisen mittauksen aikana.

Massan määrittäminen tehtiin digitaalisella Mettler Toledo PB3002-S vaa'alla, jonka tarkkuus on 0,1g. (SFS-EN 317 1993, s. 3; SFS-EN 15534-1 2014, s. 26.)

Jokaisesta kappaleesta poistetaan irtoava ylimääräinen vesi, jonka jälkeen kappaleista mitataan tarvittavat mittaukset. Jokaisesta kappaleesta mitataan paksuusturpoama % seuraavalla kaavalla (SFS-EN 317 1993, s. 4.):

$$TS\% = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \quad (5)$$

Kaavassa t_1 on koekappaleen paksuus millimetreinä ennen vesiupotusta, sekä t_2 on koekappaleen paksuus millimetreinä vesiupotuksen jälkeen (SFS-EN 317 1993, s. 4).

Lisäksi myös leveyden ja pituuden muutosten määrittäminen, sekä massan muutoksen määrittäminen tehdään vertaamalla kappaleiden mittaustuloksien muutosta liottamattoman kappaleen mittoihin ja massaansa. Koetulokset taulukoidaan, sekä esitetään kuvaajana. Paksuusturpoaman määrittämiseen käytetään viittä eri mittausta jokaista koekappaletta kohden, joista lasketaan keskiarvo. Pituuden ja leveyden, sekä massan määrittämiseen käytetään yhtä mittausta jokaista koekappaletta kohden.

6 TULOKSET

Tässä kappaleessa esitetään tutkimuksen tulokset. Ensin esitetään toimipisteen 1 materiaalin tulokset näytteenotosta materiaalin sekoitukseen asti, jonka jälkeen esitetään toimipisteen 2 materiaalien osalta tulokset myös näytteenotosta sekoitukseen asti. Tämän jälkeen esitetään toimipisteen 1 ja toimipisteen 2 sekoitetun materiaalin seula-analyysin, sekä koneellisen lajittelun tulokset. Koneellisesti lajitelluista jakeista valmistetaan komposiitin raaka-ainetta, jolle suoritetaan ekstruusiopuristus. Tämän jälkeen kappaleessa esitetään valmistetun materiaalin testaustulokset. Materiaalien käsinlajitellut jakeet ovat esitetty liitteessä 1.

6.1 Toimipiste 1

Toimipisteeltä 1 otettiin 10.5.2016 kahdesta eri saapuvasta kuormasta näyte. Näytteenottokuorma 1 edustaa vanhan kerrostalon saneeraustyömaan rakennusjätekuormaa, kun taas näytteenottokuorma 2 on uudisrakennuskohteesta (kuva 31).



Kuva 31. Näytteenottokuormat 1 ja 2.

6.1.1 Näytteen käsinlajittelu

Materiaalin käsinlajittelun tulokset ovat esitetty tässä kappaleessa. Näytteenottokuorma 1 ja 2 ovat sekoitettu keskenään, ja niiden lajitellut massat ovat esitetty taulukossa 6. Toimipisteeltä 1 kerätyn koemateriaalin kokonaismassa on 215,8 kg. Käsinlajittelussa määrittelemättömään jakeeseen joutuivat kappaleet, jotka eivät soveltuneet muihin kategorioihin. Määrittelemättömän jakeen sisältö kilogrammoina on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 6. Materiaalin käsinlajittelun massat kilogrammoina ja osuuksina.

	Massa [kg]	Osuus [%]
Metalli	49,0	22,7 %
Muovi	34,1	15,8 %
Puu	31,1	14,4 %
Villa	17,5	8,1 %
Hieno jae	14,7	6,8 %
Betoni	7,7	3,6 %
Kipsi	6,9	3,2 %
Pahvi	4,0	1,9 %
Määrittelemätön	50,8	23,5 %

Taulukko 7. Määrittelemättömän jakeen sisältö kilogrammoina ja keskinäinen jakautuminen kategoriassa.

	Massa [kg]	Osuus [%]
Lattiamateriaalit	29,11	57,9 %
Sähköjohdot ja sähköasennustarvikkeet	7,89	15,7 %
Lasikuitu	2,06	4,1 %
Tekstiilit	2,06	4,1 %
Muut	9,48	18,87 %

Muovien jatkokäytön tehostamiseksi ja mahdollistamiseksi muovityypit ovat eritelty ja ne ovat esitetty taulukossa 8. Jatkokäyttöön soveltuvia muoveja ovat pakkausmuovit sekä kovat muovit, joiden yhteenlaskettu massa on 19 kg, mikä on koko muovimäärästä 57 % osuus.

Taulukko 8. Muovimateriaalien massat ja jakautuminen kategoriassa muovit.

	Massa [kg]	Osuus [%]
Jatkokäyttökelpoiset kovat muovit	14,5	43 %
PVC	5,4	16 %

Taulukko 8 jatkuu. Muovimateriaalien massat ja jakautuminen kategoriassa muovit.

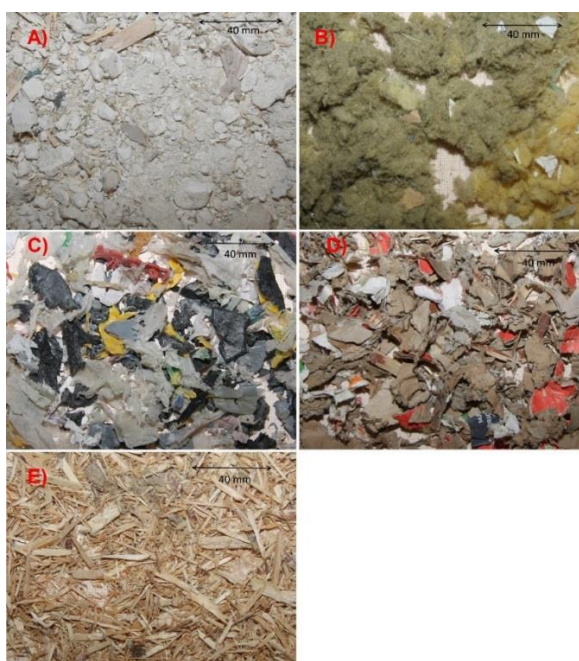
	Massa [kg]	Osuus [%]
Jatkokäyttökelpoiset kalvomuovit	4,7	14 %
Polystyreeni	3,6	11 %
Solumuovi	1,7	5 %
Tunnistamaton muovi	3,8	11 %

6.1.2 Materiaalin murskaus

Toimipisteeltä 1 materiaalien käsinlajittelusta valittiin murskaukseen muovi, villa, pahvi, puu sekä kipsi. Nämä materiaalit murskattiin omina materiaaleinaan, ja punnittiin ennen murskausta. Murskaukseen menevä materiaali edustaa sekoitettuna lajitteluun menevää materiaalia. Murskaukseen menevien materiaalien massat ovat esitetty taulukossa 9. Murskatut materiaalit ovat esitettyinä kuvassa 32.

Taulukko 9. Murskaukseen menevien materiaalien massat.

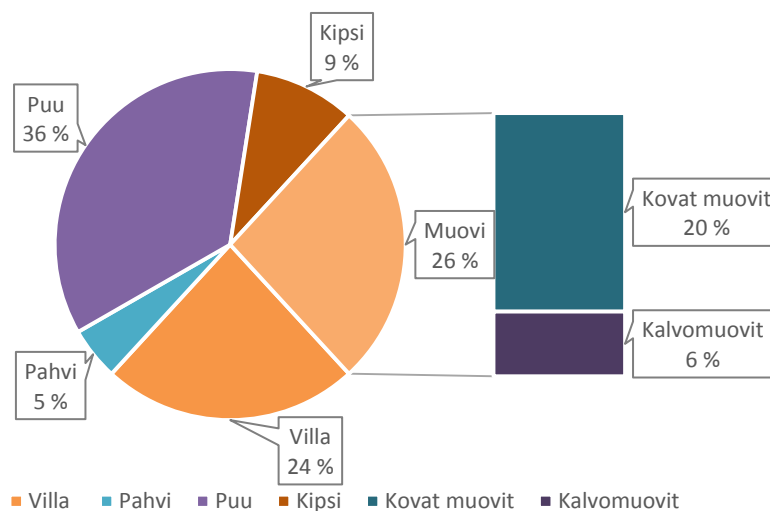
	Puu	Muovi	Villa	Kipsi	Pahvi	Yhteensä
Murskaukseen menevä jae	26,2 kg	19,2 kg	17,3 kg	6,9 kg	3,6 kg	73,1 kg



Kuva 32. Toimipisteen 1 murskatut jakeet. A) Kipsi, B) Villa, C) Muovi, D) Pahvi, E) Puu.

6.1.3 Sekoitettut jakeet

Murskatut materiaalit sekoitettiin keskenään, jonka jälkeen materiaali pakattiin suursäkkiin kuljetusta varten. Sekoitettua materiaalia on yhteensä 73 kg, ja sen irtotiheys on 142,37 kg/m³. Kuvassa 33 on esitettyä toimipisteeltä 1 kerätyn näytteen koneelliseen lajitteluun menevä jakeen jakauma ja kuva 34 esittää sekoitettua materiaalia.



Kuva 33. Toimipisteeltä 1 lajitteluun menevien materiaalien jakautuminen.



Kuva 34. Toimipisteen 1 sekoitetut jakeet

6.2 Toimipiste 2

Toimipisteeltä 2 otettiin 23.5.2016 kahdesta kuormasta näytteet (kuva 35), joita käsitellään tässä kappaleessa. Näytteenottokuorma 3 edustaa keittiösaneerauskohdetta. Näytteenottokuorma 4 edustaa myös saneerauskohdetta ja sisältää silmämääräisesti arvioiden enemmän erilaisia jätejakeita, kuin näytteenottokuorma 3.



Kuva 35. Näytteenottokuorma 3 ja 4.

6.2.1 Materiaalin käsinlajittelu

Toimipisteen 2 materiaalin käsinlajittelun tulokset ovat esitetty tässä kappaleessa. Kuten myös toimipisteen 1 materiaalien tapauksessa, myös toimipisteen 2 materiaalit sekoitettiin keskenään, jonka jälkeen ne lajiteltiin ja punnittiin. Toimipisteeltä 2 kerättyä materiaalia on kokonaisuudessaan 165,5 kg. Käsinlajittelun massat ja jakauma ovat esitettynä taulukossa 10, sekä määrittelemättömän materiaalin sisältö on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 10. Materiaalin käsinlajittelun massat kilogrammoina.

	Massa [kg]	Osuus [%]
Puu	34,2	20,7 %
Pahvi	25,1	15,2 %
Muovi	22,6	13,7 %
Hieno jae	18,8	11,4 %
Villa	10,3	6,2 %
Metalli	1,9	1,2 %
Kipsi	0,8	0,5 %
Betoni	0	0 %
Määrittelemätön	51,8	31,3 %

Taulukko 11: Määrittelemättömän jakeen massat ja keskinäinen jakautuminen kategoriassa määrittelemätön:

	Massa [kg]	Osuus [%]
Lattiamateriaali	19,4	38 %
Kaakeli	14,7	28 %
Sekajäte	14,58	3 %
Kyllästetty tai palanut puu	1,4	3 %
Muut	1,76	3 %

Toimipisteen 2 erän kokonaismuovimäärä on yhteensä 29 kg, joista jatkokäyttöön soveltuvia muoveja on 22,6 kg, mikä on 78 % kokonaismuovimäärästä. Muovien lajittelun tulokset ovat esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Muovimateriaalien massat ja jakautuminen kategoriassa muovit.

	Massa [kg]	Osuus [%]
Jatkokäyttöön soveltuvat kalvomuoovit (pakkauskalvot)	17,8	61,5 %
Jatkokäyttöön soveltuvat kovat muovit	4,8	16,6 %
PVC	3,4	11,6 %
Solumuovi	0,1	0,2 %
Polystyreeni	0	0 %
Tunnistamaton muovi	2,9	10,1 %

6.2.2 Materiaalin murskaus

Myös toimipisteen 2 materiaali murskattiin omina jakeinaan ja ne on punnittu ennen murskausta. Kipsi murskattiin yhdessä puutavaran kanssa pienen massansa takia. Taulukossa 13 on esitetty materiaalin murskauksen massat, sekä kuvassa 36 on esitetty murskattujen jakeiden kuvat.

Taulukko 13: Toimipisteen 2 murskaukseen menevän materiaalin massat.

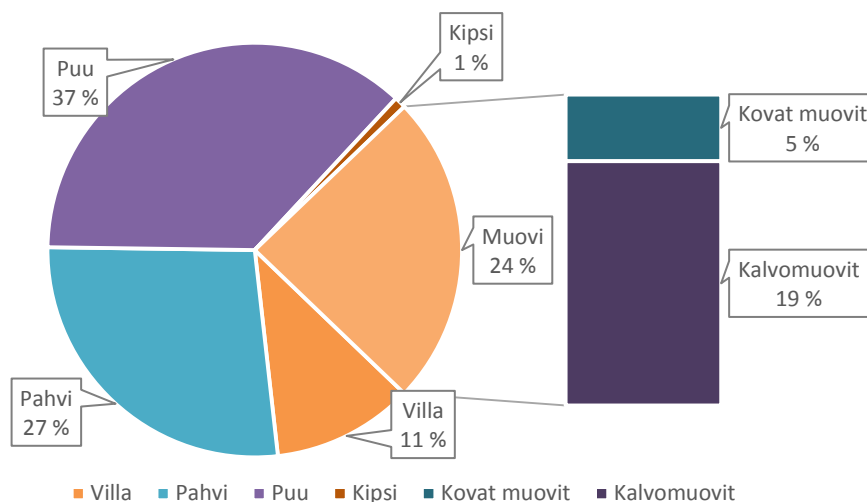
	Puu	Pahvi	Muovi	Villa	Kipsi	Yhteensä
Murskaukseen menevä jae	34,2 kg	25,1 kg	22,6 kg	10,3 kg	0,8 kg	93,1 kg



Kuva 36. Toimipisteen 2 murskatut materiaali-jakeet. A) Villa, B) Muovi, C) Pahvi, D) Puu ja kipsi

6.2.3 Sekoitettut jakeet

Toimipisteen 2 murskatut jakeet sekoitettiin keskenään, jonka jälkeen ne pakattiin omaan suursäkkiin jatkokäsittelyä varten. Toimipisteen 2 murskattua ja sekoitettua materiaalia jatkokäsittelyä varten on yhteensä 93 kg ja materiaalin irtotiheys on $94,03 \text{ kg/m}^3$. Toimipisteen 2 sekoitetun materiaalin jakauma on esitetty kuvassa 37 ja sekoitettu materiaali kuvassa 38.



Kuva 37. Toimipisteen 2 materiaalin koneelliseen lajitteluun menevän materiaalin jakauma.



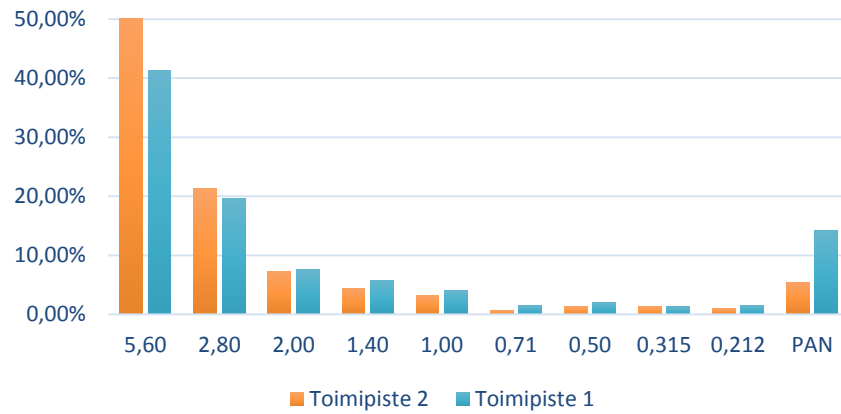
Kuva 38. Toimipisteeltä 2 kerätty koneelliseen lajitteluun menevä sekoitettu jae.

6.3 Seula-analyysi

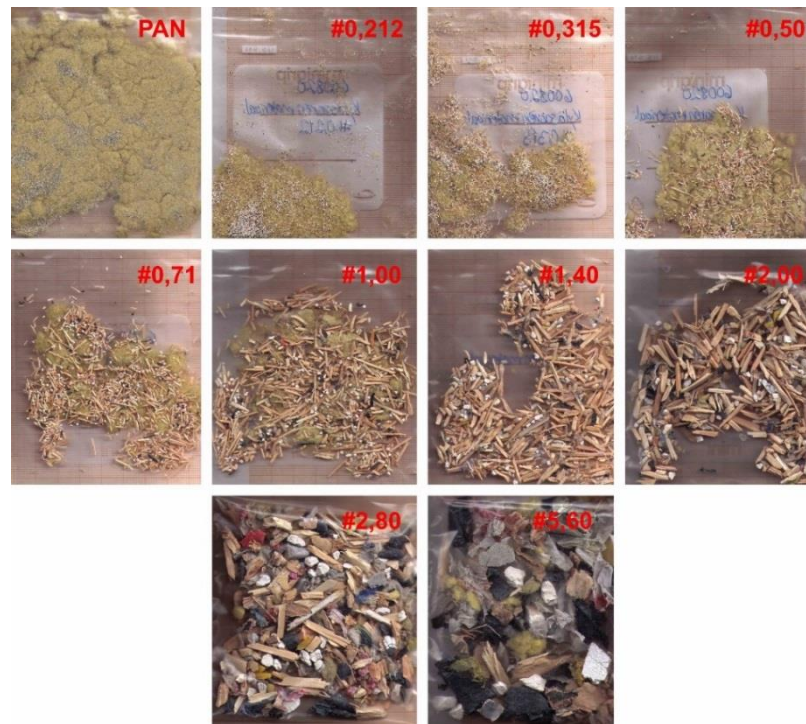
Seula-analyysin avulla määritetään materiaalin partikkelikokojakauma. Taulukossa 14 on esitetty seula-analyysin tulokset ja kuvassa 39 on esitetty graafisessa muodossa partikkelikokojakauma. Toimipisteeltä 1 materiaalia seulottiin 54,5 g ja toimipisteeltä 2 materiaalia 31,5 g. Lisäksi kuvassa 40 ja 41 on esitetty seulajakeiden kuvat.

Taulukko 14. Seula-analyysin tulokset.

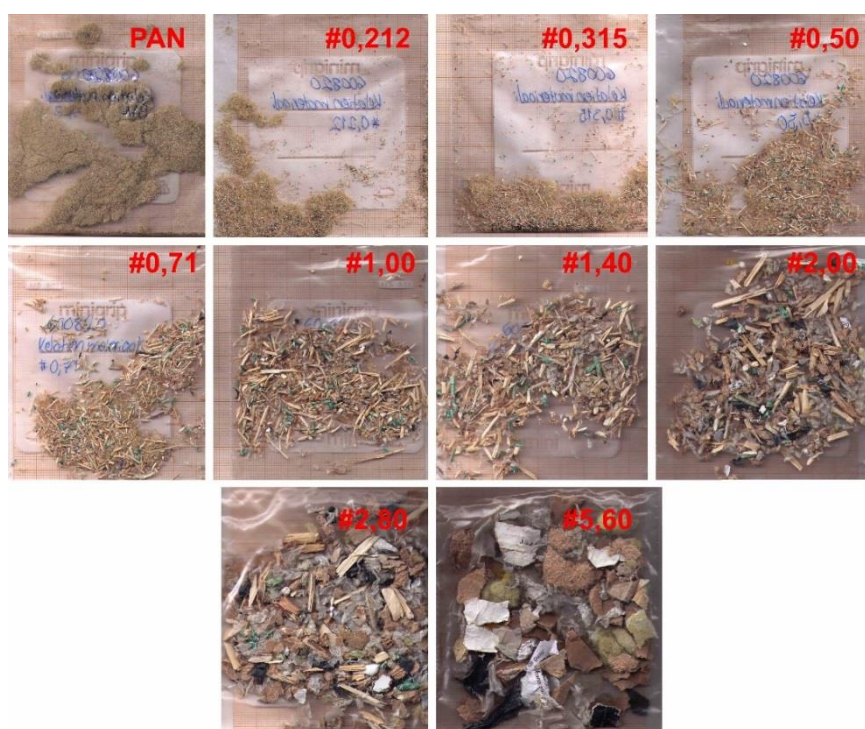
Seulakoko	#5,60	#2,80	#2,00	#1,40	#1,00	#0,71	#0,50	#0,315	#0,212	PAN
Toimipiste 1	53,33 %	21,27 %	7,30 %	4,44 %	3,17 %	0,63 %	1,27 %	1,27 %	0,95 %	5,40 %
Toimipiste 2	41,28 %	19,63 %	7,52 %	5,69 %	4,04 %	1,47 %	2,02 %	1,28 %	1,47 %	14,13 %



Kuva 39. Seula-analyysin tulokset esitettynä kaaviomuodossa. Vaaka-akselilla on seulaverkon koko millimetreinä, pystyakselilla prosenttiosuudet.



Kuva 40. Toimipisteen 1 materiaalin seula-analyysin jakeiden kuvat.



Kuva 41. Toimipiste 2 materiaalin seula-analyysin jakeiden kuvat.

6.4 Koneellinen lajittelu Dieffenbacher Panelboard Oy:ssa

Dieffenbacher Panelboard Oy:ssa tehdyssä lajittelukokeissa tulokset jakautuvat sekä toimipiste 1, että toimipiste 2 materiaalien osalta omiksi kokonaisuuksiksi. Kappaleessa esitellään ensin toimipiste 1 materiaalin osalta materiaalien jakauma, sekä jakeiden kuvat, minkä jälkeen käsitellään toimipiste 2 materiaali.

6.4.1 Toimipiste 1 materiaali

Toimipiste 1 koko materiaalin kosteus on 5,7 %, ja villan kosteus 3,2 %. ClassiCleaner-laitteiston imu, ”7”, asetettiin arvoon 3,6 m/s. SandSeparator-koneen parametrit ovat esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. SandSeparator-erottimen arvot toimipiste 1 materiaalille.

Mittauspiste	Ilmamanopeus [m/s]
”4” yläpuoli	6,1
”4” alapuoli	5,1
”5” yläpuoli	6,3
”5” alapuoli	5,9

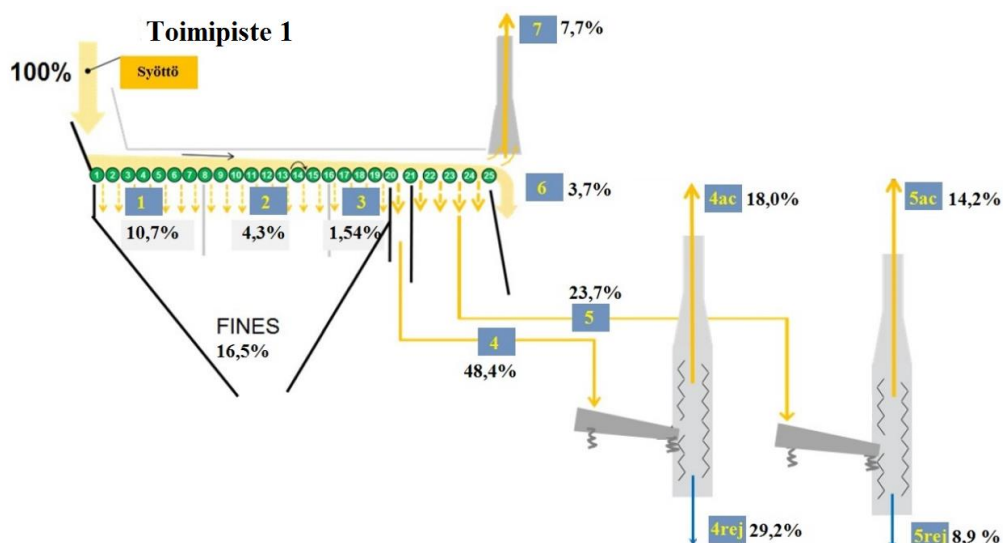
Toimipisteen 1 materiaali ajettiin neljässä erässä, ja ajot ovat nimetty A–D. Toimipisteen 1 materiaalin lajittelun massat ja prosenttiosuudet ovat laskettu ajoittain, sekä jakeittain ja tulokset ovat taulukoitu. Lajittelun massat grammoina ovat esitetty taulukossa 16 ja jakauma taulukossa 17. Lisäksi kuvassa 42 on esitetty graafisessa muodossa toimipisteen 1 materiaalin jakautuminen ClassiCleaner-käsittelyn jälkeen. Toimipisteen 1 jakeiden kuvat ovat esitetty kuvissa 43–46.

Taulukko 16. Toimipisteen 1 koneellisen lajittelun massat grammoina.

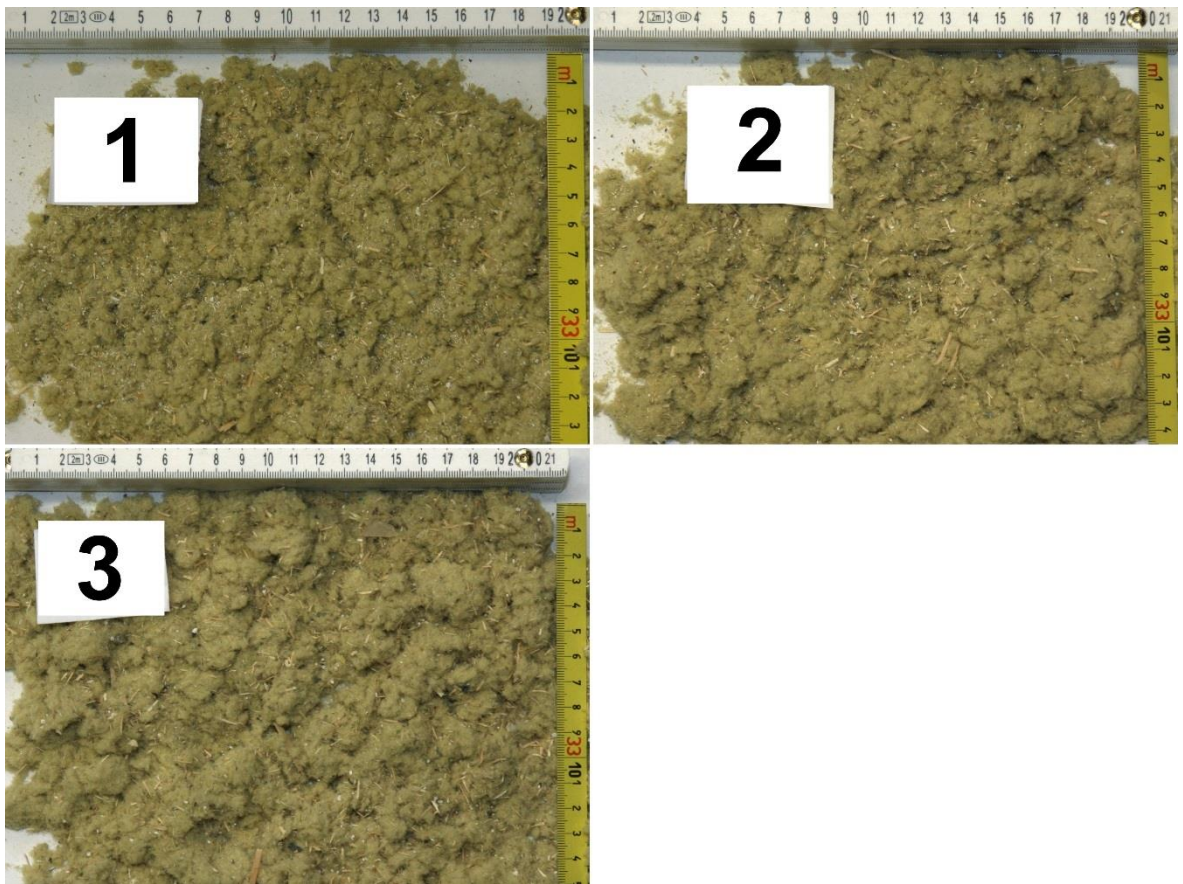
Ajo	1	2	3	4	5	6	7	SUM	FINES	4 ac	4 rej	5 ac	5 rej
A	1973	701	249	7800	3600	560	1300	16183	2923	2760	4715	2000	1344
B	1805	774	280	8680	4480	600	1320	17939	2859	3260	5323	2700	1714
C	1713	749	272	8060	4020	1040	1540	17394	2734	3100	4690	2440	1495
D	1608	633	226	7640	3700	320	980	15107	2467	2880	4690	2300	1372
SUM	7099	2857	1027	32180	15800	2520	5140	66623	10983	12000	19418	9440	5925

Taulukko 17. Toimipisteen 1 koneellisen lajittelun jakauma ajoittain ja jakeittain.

Ajo	1	2	3	4	5	6	7	FINES	4 ac	4 rej	5 ac	5 rej
A	12,19 %	4,33 %	1,54 %	48,20 %	22,25 %	3,46 %	8,03 %	18,06 %	17,05 %	29,14 %	12,36 %	8,31 %
B	10,06 %	4,31 %	1,56 %	48,39 %	24,97 %	3,34 %	7,36 %	15,94 %	18,17 %	29,67 %	15,05 %	9,55 %
C	9,85 %	4,31 %	1,56 %	46,34 %	23,11 %	5,98 %	8,85 %	15,72 %	17,82 %	26,96 %	14,03 %	8,59 %
D	10,64 %	4,19 %	1,50 %	50,57 %	24,49 %	2,12 %	6,49 %	16,33 %	19,06 %	31,05 %	15,22 %	9,08 %
SUM	10,69 %	4,29 %	1,54 %	48,37 %	23,71 %	3,73 %	7,68 %	16,49 %	18,01 %	29,15 %	14,17 %	8,89 %
St. Dev.	0,92 %	0,06 %	0,03 %	1,50 %	1,09 %	1,40 %	0,87 %	0,92 %	0,72 %	1,47 %	1,14 %	0,48 %



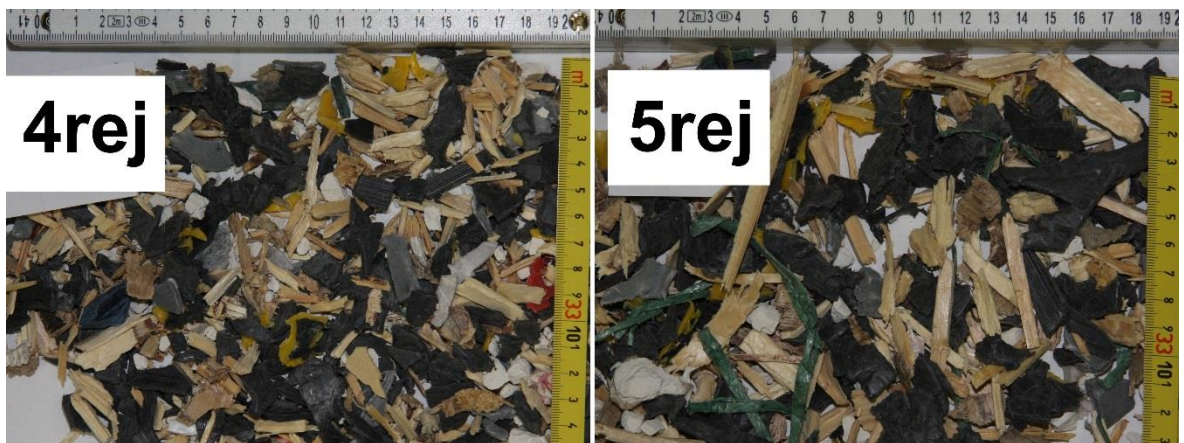
Kuva 42. Toimipisteen 1 materiaalin jakauma ClassiCleaner-koneella.



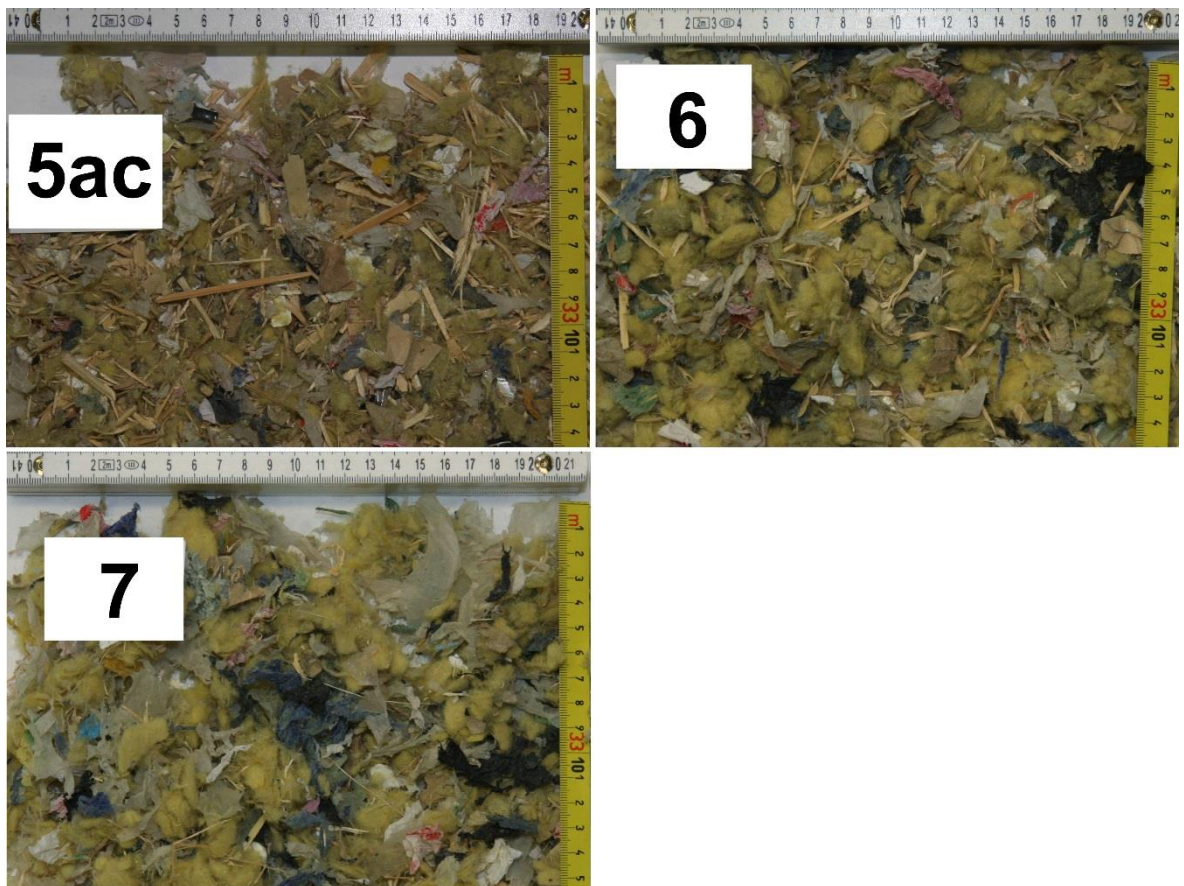
Kuva 43. Toimipisteen 1 jakeet 1, 2 ja 3.



Kuva 44. Toimipisteen 1 jae 4 ac.



Kuva 45. Toimipisteen 1 jakeet 4 rej ja 5 rej.



Kuva 46. Toimipisteen 1 jakeet 5ac, 6 ja 7.

6.4.2 Toimipisteen 2 materiaali

Toimipisteen 2 koko materiaalin kosteus on 5,4 %, ja villan kosteus 3,3 %. ClassiCleaner-laitteen imu, ”7”, asetettiin arvoon 5,1 m/s. SandSeparator-koneen parametrit ovat esitetty taulukossa 18.

Taulukko 18. SandSeparator-arvot toimipisteen 2 materiaalille.

Mittauspiste	Ilmannonpeus [m/s]
”4” yläpuoli	8,0
”4” alapuoli	7,3
”5” yläpuoli	6,1
”5” alapuoli	5,4

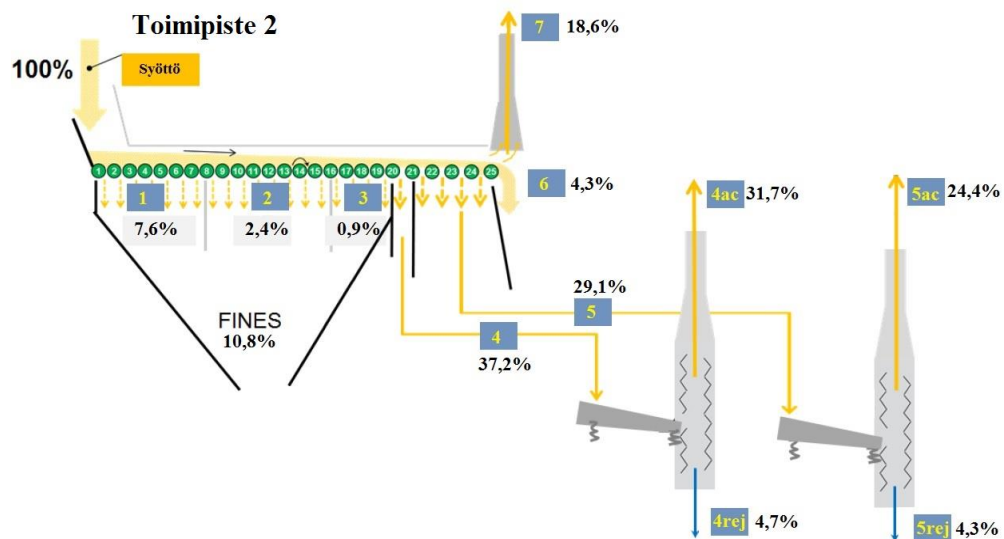
Toimipisteen 2 materiaali lajiteltiin koneellisesti seitsemässä erässä, ja ajot ovat nimetty A–G. Toimipisteen 2 ajojen massat ja jakauma ovat laskettu ajoittain, sekä jakeittain. Jakeet 1–7 saatiin ClassiScreen-koneen tuloksena. Näistä jakeet 1–3 luokiteltiin ”fines”-kategoriaan ja jakeet 4 ja 5 ohjattiin SAS-ilmaerottimeen, jossa jakeet lajittelevat nimikkeisiin 4 ac, 4 rej, 5 ac ja 5 rej. Taulukossa 19 on esitetty koneellisen lajittelun massat, ja taulukossa 20 on esitetty koneellisen lajittelun jakautumisen prosenttiosuudet jakeittain ja ajoittain. Kuvassa 47 on esitetty graafisessa muodossa Toimipisteen 2 materiaalin jakautuminen ClassiCleaner-käsittelyn jälkeen. Toimipisteen 2 jakeiden kuvat ovat esitetty kuvissa 48–51.

Taulukko 19. Toimipisteen 2 koneellisen lajittelun massat grammoina jakeittain ja ajoittain. Jakeet 1–7 ovat ClassiScreen-koneen lajittelun tuloksia. 4 ac, 4 rej, 5 ac ja 5 rej ovat SAS-ilmaerottimen tuottamia jakeita.

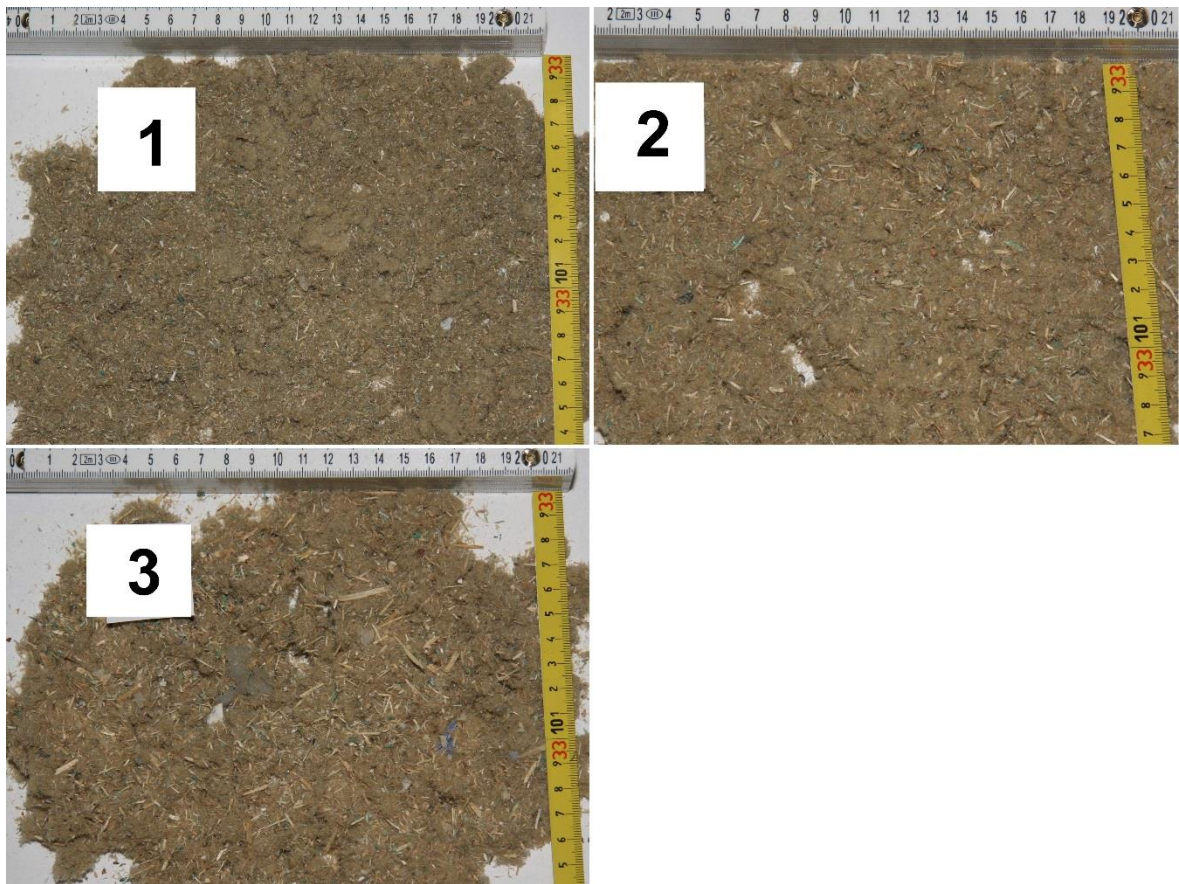
Ajo	1	2	3	4	5	6	7	SUM	FINES	4 ac	4 rej	5 ac	5 rej
A	942	263	86	4140	3200	320	2160	11111	1291	3260	605	2140	526
B	1065	348	130	5040	4080	660	2460	13783	1543	4380	620	3460	626
C	907	268	120	4760	2700	354	1700	10809	1295	4120	578	2580	414
D	919	290	111	4620	3920	660	2360	12880	1320	4020	592	3320	586
E	839	261	94	4200	3500	460	2140	11494	1194	3580	567	2920	549
F	862	304	117	4240	3660	660	2400	12243	1283	3680	500	3140	451
G	911	286	102	4540	3840	600	2640	12919	1299	3920	529	3360	499
SUM	6445	2020	760	31540	24900	3714	15860	85239	9225	26960	3991	20920	3651

Taulukko 20. Toimipisteen 2 koneellisen lajittelun jakauma jakeittain ja ajoittain. Taulukon yhteenvetorivillä on esitetty jakeen osuus kokonaismäärästä, sekä kokonaismäärän keskipoikkeama.

Ajo	1	2	3	4	5	6	7	FINES	4 ac	4 rej	5 ac	5 rej
A	8,48 %	2,37 %	0,77 %	37,26 %	28,80 %	2,88 %	19,44 %	11,62 %	29,34 %	5,45 %	19,26 %	4,73 %
B	7,73 %	2,52 %	0,94 %	36,57 %	29,60 %	4,79 %	17,85 %	11,19 %	31,78 %	4,50 %	25,10 %	4,54 %
C	8,39 %	2,48 %	1,11 %	44,04 %	24,98 %	3,28 %	15,73 %	11,98 %	38,12 %	5,35 %	23,87 %	3,83 %
D	7,14 %	2,25 %	0,86 %	35,87 %	30,43 %	5,12 %	18,32 %	10,25 %	31,21 %	4,60 %	25,78 %	4,55 %
E	7,30 %	2,27 %	0,82 %	36,54 %	30,45 %	4,00 %	18,62 %	10,39 %	31,15 %	4,93 %	25,40 %	4,78 %
F	7,04 %	2,48 %	0,96 %	34,63 %	29,89 %	5,39 %	19,60 %	10,48 %	30,06 %	4,08 %	25,65 %	3,68 %
G	7,05 %	2,21 %	0,79 %	35,14 %	29,72 %	4,64 %	20,44 %	10,05 %	30,34 %	4,09 %	26,01 %	3,86 %
SUM	7,59 %	2,37 %	0,89 %	37,15 %	29,13 %	4,30 %	18,57 %	10,82 %	31,71 %	4,71 %	24,44 %	4,28 %
St. Dev	0,58 %	0,12 %	0,11 %	2,93 %	1,77 %	0,88 %	1,41 %	0,69 %	2,72 %	0,51 %	2,21 %	0,44 %



Kuva 47. Toimipisteen 2 materiaalien jakauma koneellisesta lajittelusta.



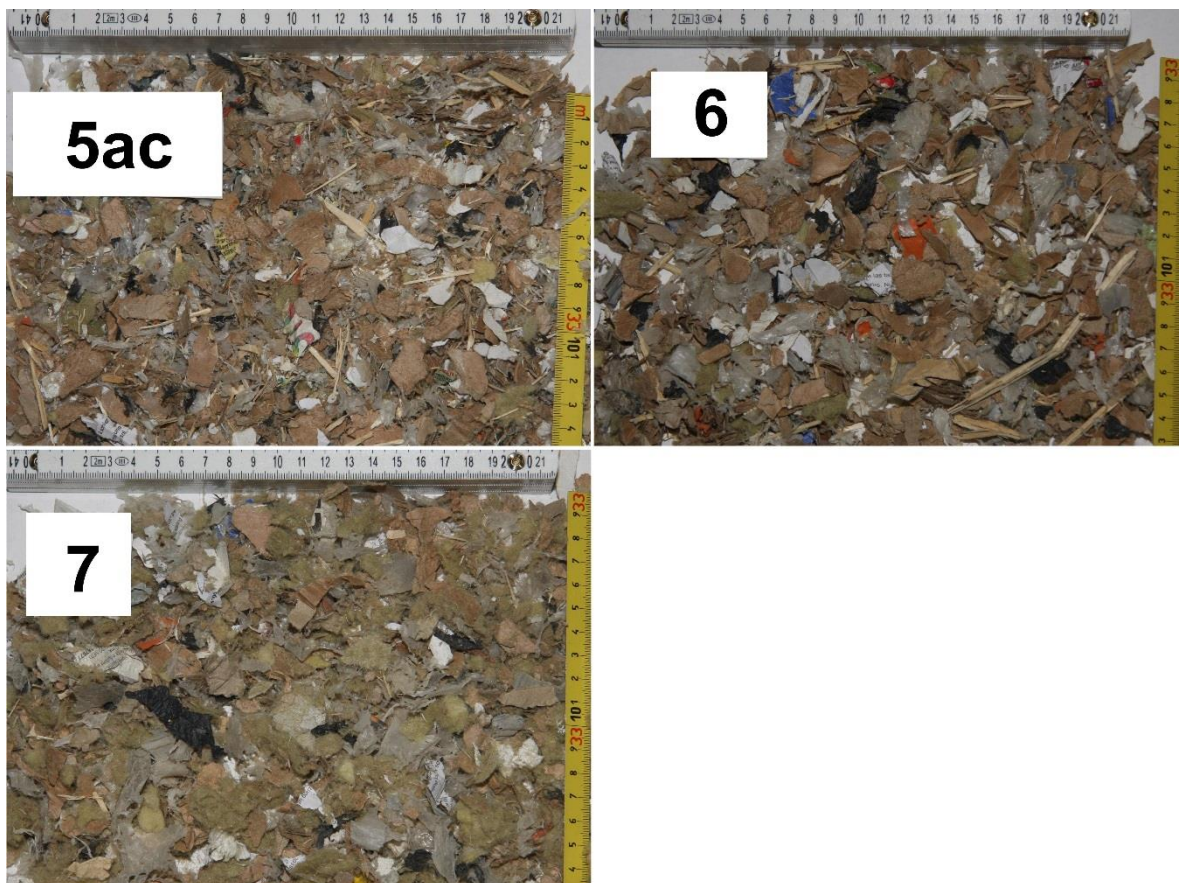
Kuva 48. Toimipisteen 2 jakeet 1, 2 ja 3.



Kuva 49. Toimipisteen 2 jae 4 ac.



Kuva 50. Toimipisteen 2 jae 4 rej.



Kuva 51. Toimipisteen 2 jakeet 5 ac, 6 ja 7.

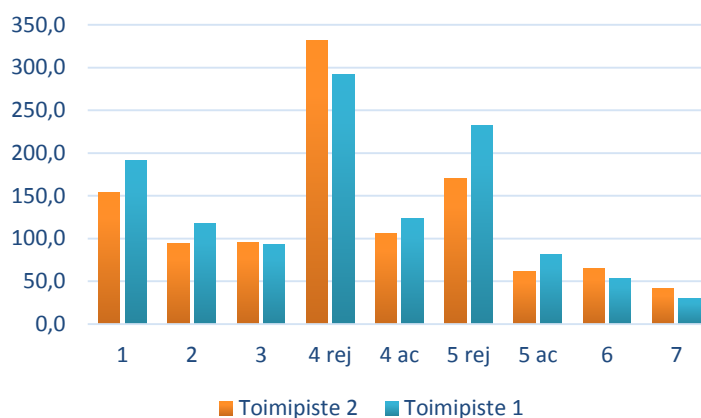
6.4.3 Jakeiden tiheydet

Sekä toimipisteen 1, että toimipisteen 2 materiaali-jakeiden tiheydet ovat esitetty taulukossa 21, sekä kaaviomuodossa kuvassa 52. Hienojen jakeiden keskiarvollinen tiheys

materiaaleille on toimipisteen 1 materiaalille $134,1 \text{ kg/m}^3$ ja toimipisteen 2 materiaalille $114,7 \text{ kg/m}^3$.

Taulukko 21. Materiaalijakeiden tiheydet yksikössä kg/m^3 .

Materiaali	1	2	3	4 rej	4 ac	5 rej	5 ac	6	7
Toimipiste 1	154,0	94,5	95,5	331,3	106,3	170,1	60,9	65,0	41,2
Toimipiste 2	190,9	117,9	93,5	291,4	124,0	232,3	81,8	53,6	29,8



Kuva 52. Tiheydet esitettynä kaaviona.

6.5 Lajiteltujen jakeiden koostumus

Toimipisteiden 1 ja 2 materiaaleista lajiteltiin näytteet jakeista rejekti ja 5ac67, jonka perusteella voidaan määrittää jakeiden sisältämät raaka-aineet. Rejektillä tarkoitetaan yhdistettyä 4 rej ja 5 rej materiaalia. 5ac67-jakeella tarkoitetaan yhdistettyjä jakeita 5ac, 6 ja 7. Fines-jakeella tarkoitetaan jakeiden 1, 2 ja 3 yhdistettyä jaetta. Jakeiden materiaalijakauma on esitetty taulukossa 22.

Taulukko 22. 5ac67 ja rejekti-jakeiden määritetty sisältö.

	Villa	Kalvo- muovi	Pahvi	Puu	Kova- muovi	Kipsi
Rejekti 1	-	-	1 %	30 %	58 %	11 %
Rejekti 2	-	-	7 %	44 %	48 %	1 %
5ac67 1	8 %	29 %	54 %	10 %	-	-
5ac67 2	31 %	21 %	9 %	40 %	-	-

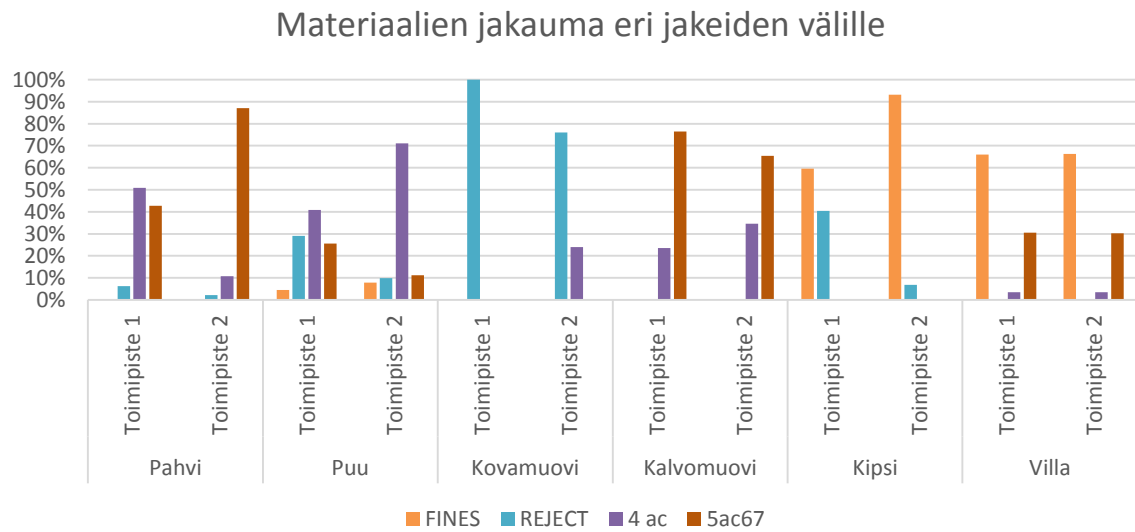
Jakeiden fines ja 4ac sisältö saatiin arvioimalla niiden sisältämiä materiaaleja. Materiaalin arvioinnissa on käytetty yleistäyksiä:

- Fines ei sisällä pahvia
- Fines ei sisällä kovia-, tai kalvomuveja
- 4ac ei sisällä kipsiä
- 4ac sisältää vain vähän villaa

Yleistämällä jakaumaa saatu arvio materiaalien jakaumalle on esitetty taulukossa 23 ja graafisessa muodossa kuvassa 53.

Taulukko 23. Materiaalien jakauma eri jakeiden välillä.

		FINES	REJECT	4 ac	5ac67
Pahvi	Toimipiste 1	0 %	6 %	51 %	43 %
	Toimipiste 2	0 %	2 %	11 %	87 %
Puu	Toimipiste 1	5 %	29 %	41 %	26 %
	Toimipiste 2	8 %	10 %	71 %	11 %
Kovamuovi	Toimipiste 1	0 %	100 %	0 %	0 %
	Toimipiste 2	0 %	76 %	24 %	0 %
Kalvomuovi	Toimipiste 1	0 %	0 %	24 %	76 %
	Toimipiste 2	0 %	0 %	35 %	65 %
Kipsi	Toimipiste 1	60 %	40 %	0 %	0 %
	Toimipiste 2	93 %	7 %	0 %	0 %
Villa	Toimipiste 1	66 %	0 %	3 %	30 %
	Toimipiste 2	66 %	0 %	3 %	30 %

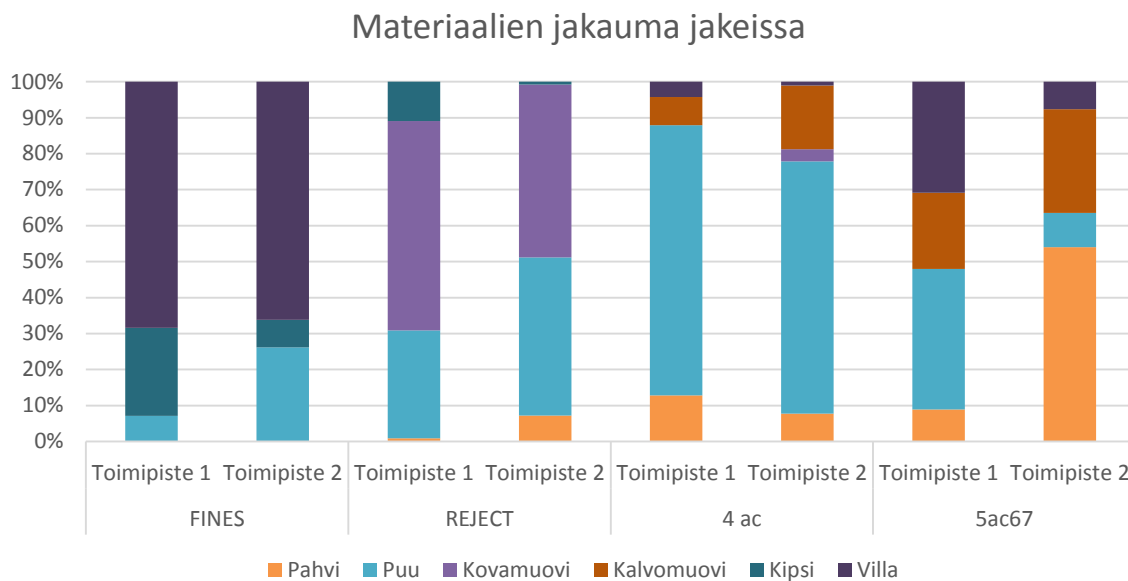


Kuva 53. Eri lähtömateriaalien jakauma lajiteltuihin jakeisiin.

Vastaavasti määrittelystä saadaan selville eri jakeiden sisältämät materiaalit, jotka ovat esitetty taulukossa 24, sekä graafisessa muodossa kuvassa 54.

Taulukko 24. Eri materiaalien jakauma lajitelluissa jakeissa.

		Pahvi	Puu	Kova- muovi	Kalvo- muovi	Kipsi	Villa
FINES	Toimipiste 1	0 %	7 %	0 %	0 %	24 %	68 %
	Toimipiste 2	0 %	26 %	0 %	0 %	8 %	66 %
REJECT	Toimipiste 1	1 %	30 %	58 %	0 %	11 %	0 %
	Toimipiste 2	7 %	44 %	48 %	0 %	1 %	0 %
4 ac	Toimipiste 1	13 %	75 %	0 %	8 %	0 %	4 %
	Toimipiste 2	8 %	70 %	3 %	18 %	0 %	1 %
5ac67	Toimipiste 1	9 %	39 %	0 %	21 %	0 %	31 %
	Toimipiste 2	54 %	9 %	0 %	29 %	0 %	8 %



Kuva 54. Eri lähtömateriaalien jakauma lajitelluissa jakeissa.

6.6 Koneellisesti lajittelematon referenssimateriaali

Lajittelemattoman referenssimateriaalin valmistukseen toimipisteeltä 2 noudettiin kuorma, jonka sisältö on esitetty taulukossa 25. Lisäksi määrittelemättömän materiaalin jakauma on esitetty taulukossa 26.

Taulukko 25. Referenssimateriaalin näytteen jakauma massoina.

	Massa [kg]	Osuus [%]
Puu	71,0	28,5 %
Muovi	36,2	14,5 %
Kipsi	33,1	13,3 %
Hieno jae	22,4	9,0 %
Pahvi	16,9	6,8 %
Betoni	16,6	6,6 %
Metalli	6,43	2,6 %
Villa	2,1	0,9 %
Määrittelemätön	44,9	18,0 %

Taulukko 26. Määrittelemättömän materiaalin sisältö.

	Massa [kg]	Osuus [%]
Likainen puu	19,3	43,0 %
Tapetti	7,0	15,5 %
Laminaatti	6,8	15,2 %
Sähköasennustarvikkeet	3,5	7,9 %
Muut	8,3	18,4 %

Muovien lajittelu on esitetty taulukossa 27. Muoveja noudetussa erässä on 36,2 kg, joista jatkokäyttöön soveltuvia muovityyppejä 26,1 kg.

Taulukko 27. Muovityyppien lajittelu.

	Massa [kg]	Osuus [%]
Jatkokäyttökelpoiset kalvomuovit	14,3	39,4 %
Jatkokäyttökelpoiset kovamuovit	11,9	32,8 %
Tekninen muovi	6,7	18,6 %
Polystyreeni	1,8	5,0 %
PEX	1,1	3,0 %
Tunnistamaton muovi	0,5	1,4 %

Referenssimateriaalia ei lajiteltu koneellisesti Dieffenbacher Panelboard Oy:n laitteistolla. Murskatut materiaalit sekoitettiin keskenään taulukon 28 mukaisesti. Puumateriaali murskattiin partikkelikoon pienentämiseksi vasaramyllyllä 4 mm seulaverkon läpi.

Taulukko 28. Referenssikomposiitin raaka-ainejakauma.

Jätepuu	Kalvo-muovi	Kova-muovi	Pahvi	Kipsi	Villa	KytKentä- ja voiteluaine
32,0 %	15,0 %	15,0 %	12,0 %	10,0 %	10,0 %	6,0 %

6.7 Komposiitin valmistus

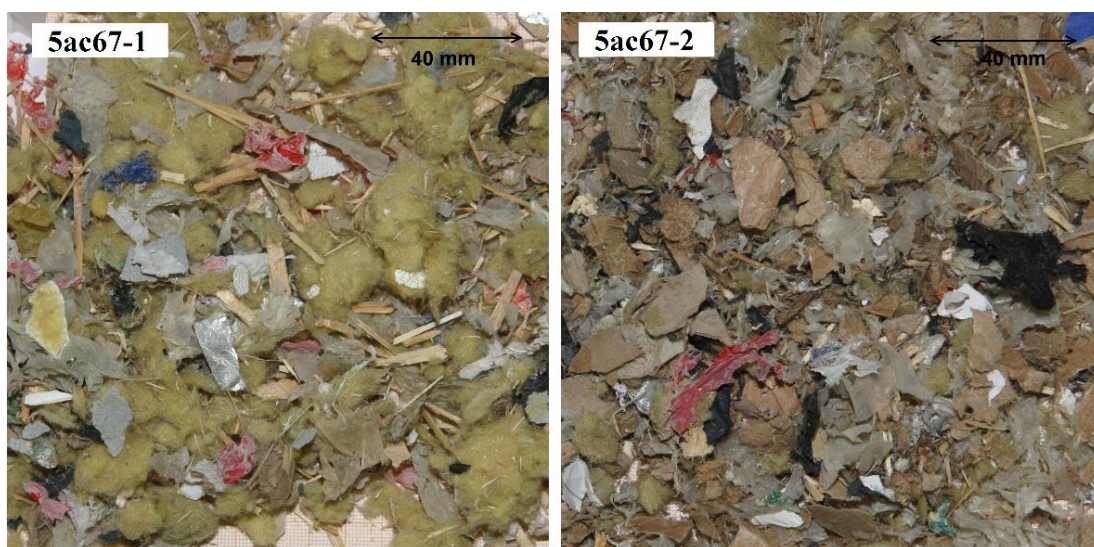
Komposiitin valmistukseen liittyvät tulokset ovat esitetty tässä kappaleessa alkaen materiaalivalinnasta ja päättyen valmistetun komposiitin testaustuloksiin.

6.7.1 Materiaalivalinta jakeista

Komposiitin raaka-aineiksi sekä toimipisteiltä valittiin jakeet: ”5ac”, ”6” ja ”7”. Toimipisteiden jakeet ”5ac”, ”6” ja ”7” sekoitettiin keskenään omina jakeinaan, jolloin saatiin kaksi erilaista raaka-ainemateriaalia komposiitiksi. Näistä käytetään jatkossa nimeä 5ac67-1 ja 5ac67-2. Taulukossa 29 on esitetty materiaalien jakeiden massat ja osuudet materiaalista. 5ac67-1-materiaalin tiheys on 71 kg/m^3 , ja 5ac67-2-materiaalin tiheys on 75 kg/m^3 . Raaka-aineiden kuvat ovat esitettynä kuvassa 55.

Taulukko 29. Materiaalin eri jakeiden massat ja osuudet komposiitin raaka-aineessa.

	Toimipiste 1		Toimipiste 2	
	Massa [g]	Osuus [%]	Massa [g]	Osuus [%]
5ac	9 440	55,2 %	20 920	51,7 %
6	2 520	14,7 %	3 714	9,2 %
7	5 140	39,2 %	15 860	30,1 %
5ac67	17 100		40 494	



Kuva 55. 5ac67-1- ja 5ac67-2-materiaali.

6.7.2 Komposiitin raaka-aineet

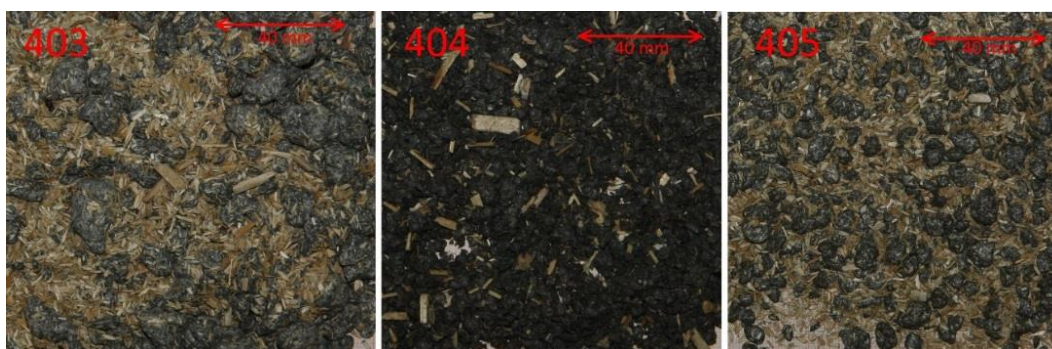
Materiaaleista tehtiin kolme raaka-aineseosta komposiitin valmistukseen. Komposiitit nimettiin juoksevasti R403, R404 ja R405. Komposiittien raaka-ainejakaumat ovat esitetty taulukossa 30. Komposiittien raaka-ainejakauma materiaaleittain on esitetty taulukossa 31. Agglomeraatit ovat esitetty kuvassa 56.

Taulukko 30. Komposiittien raaka-ainejakaumat.

	Toimipiste 1	Toimipiste 2	Toimipiste 2
	R403	R404	R405
5ac67	20 %	64 %	20 %
Muovi, kytkentä- ja voiteluaineet	36 %	36 %	36 %
Puu	44 %	-	44 %

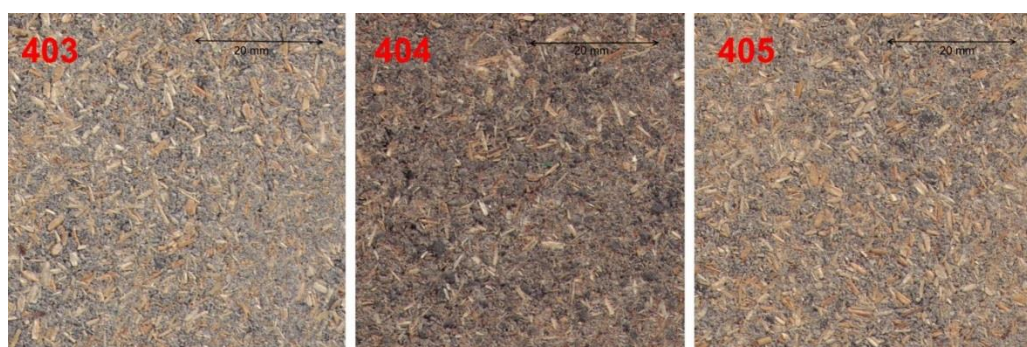
Taulukko 31. Komposiittien raaka-ainejakauma perustuen arvioituun 5ac67-jakeen sisältöön.

	Toimipiste 1	Toimipiste 2	Toimipiste 2
	R403	R404	R405
Pahvi	2 %	35 %	11 %
Jätepuu	8 %	6 %	2 %
Villa	6 %	5 %	2 %
Kalvomuovi	4 %	18 %	6 %
Muovi, kytkentä- ja voiteluaine	36 %	36 %	36 %
Puumurska	44 %	-	44 %



Kuva 56. Agglomeraatit. Vasemmalla 5ac67-1 materiaalista valmistettu R403, keskellä 64 % 5ac67-2 materiaalia sisältävä R404 ja oikealla 20 % 5ac67-2 materiaalia sisältävä R405.

Agglomeraattien tiheys on komposiitille R403 729 kg/m^3 , komposiitille R404 638 kg/m^3 , sekä komposiitille R405 721 kg/m^3 . 4 mm seulaverkolla varustetulla vasaramyllyllä murskattujen agglomeraattien tiheydet ovat komposiitille R403 490 kg/m^3 , komposiitille R404 478 kg/m^3 , sekä komposiitille R405 466 kg/m^3 . Kuvassa 57 ovat esitetty murskatut agglomeraatit.



Kuva 57. Murskatut agglomeraatit.

6.7.3 Komposiitin valmistus

Komposiitin R404 ajettavuus ekstruuderissa oli arvioiden mukaan kohtalaisen hyvä, ja se pysyi hyvin muodossaan ilman kuroutumista. Pinnanlaatu oli karhea ja karvaiseksi kuvailtava. Komposiitille 404 testattu vesijähdytys ei vaikuttanut pinnanlaatuun merkittävästi, eikä myöskään aiheuttanut merkittäviä muodonmuutoksia komposiitille.

Komposiitin R405, ajettavuus oli hyvä ja pinnanlaadusta saatiin myös kohtalainen. Komposiitti pysyi hyvin kasassa ja muodossa ajon aikana, eikä siinä esiintynyt

kuroutumista. Vesijäähdytyksen kokeilu aiheutti komposiitissa epätoivottuja muodonmuutoksia.

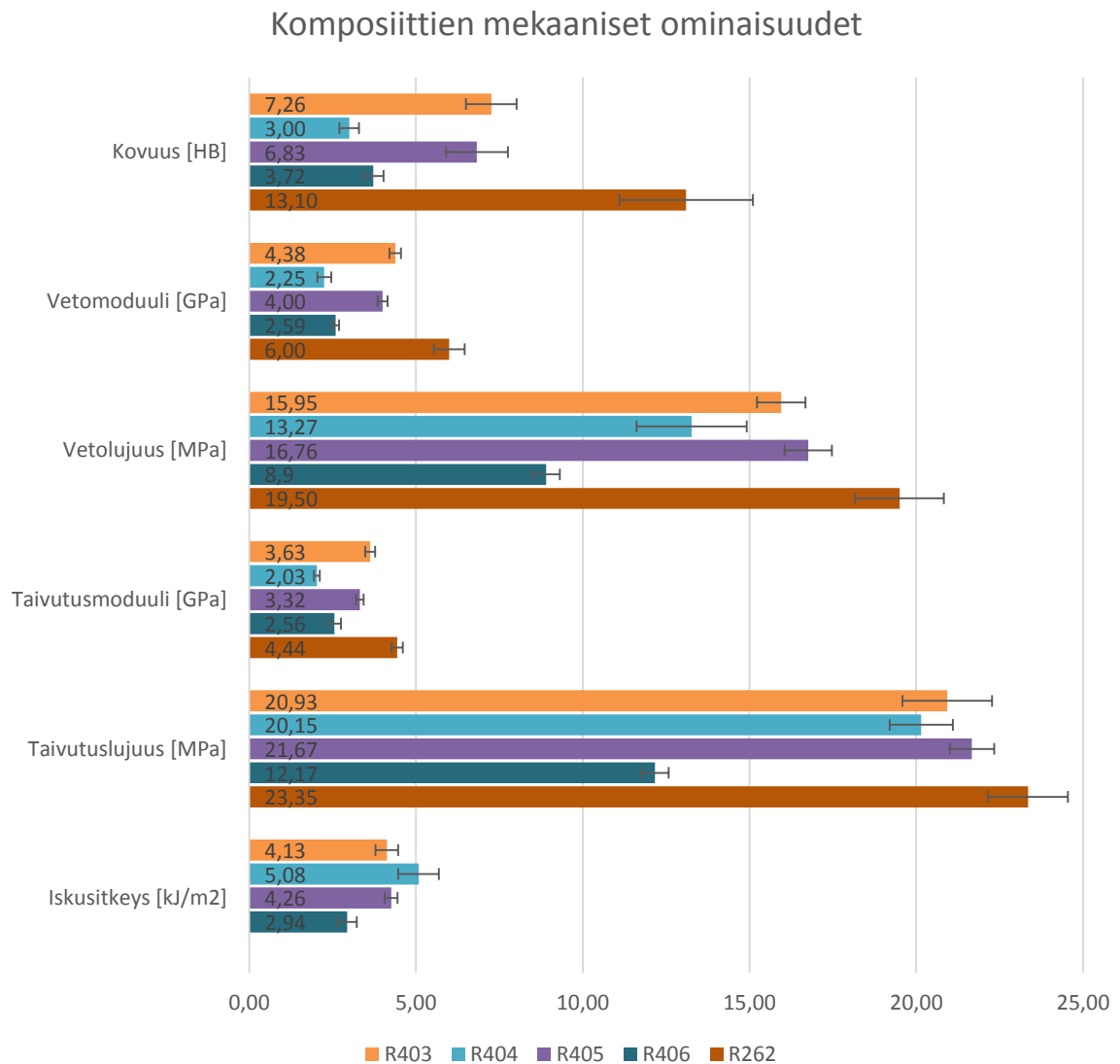
Komposiitin R403, ajettavuus oli huonohko. Komposiitti vaati paljon vetoa, jotta se saatiin pysymään muodossaan ja pinnanlaatu on karkeahko. Lämpötilansäädöllä komposiitin paha kynsiminen saatiin rajoitettua. Vesijäähdytyksen kokeileminen aiheutti epätoivottuja muodonmuutoksia. Lisäksi komposiitin raaka-aineen sisältämä vihreä sidontavanne ei sulanut prosessissa, mikä aiheutti ongelmia muun muassa ekstruuderin suuttimen tukkeutumisena.

6.8 Komposiitin ominaisuudet

Taulukossa 32 ovat esitetty komposiittien mekaaniset ominaisuudet. Taulukossa $\bar{x}$ tarkoittaa mittaustulosten keskiarvoa, s tarkoittaa keskihajontaa. Referenssinä käytetään puumuovikomposiittia R262. Kuvassa 58 on esitetty komposiittien mekaaniset ominaisuudet graafisessa muodossa.

Taulukko 32. Komposiittien mekaaniset ominaisuudet.

	R403		R404		R405		R406		R262	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Iskusitkeys [kJ/m ²]	4,13	0,34	5,08	0,61	4,26	0,19	2,94	0,29	-	-
Taivutus- lujuus [MPa]	20,93	1,34	20,15	0,95	21,67	0,67	12,17	0,41	23,35	1,20
Taivutus- moduuli [GPa]	3,63	0,15	2,03	0,09	3,32	0,11	2,56	0,19	4,44	0,17
Vetolujuus [MPa]	15,95	0,73	13,29	1,65	16,76	0,71	8,9	0,41	19,50	1,33
Veto- moduuli [GPa]	4,38	0,17	2,25	0,21	4,00	0,15	2,59	0,11	6,00	0,46
Kovuus [HB]	7,26	0,76	3,00	0,29	6,83	0,93	3,72	0,31	13,10	2,00

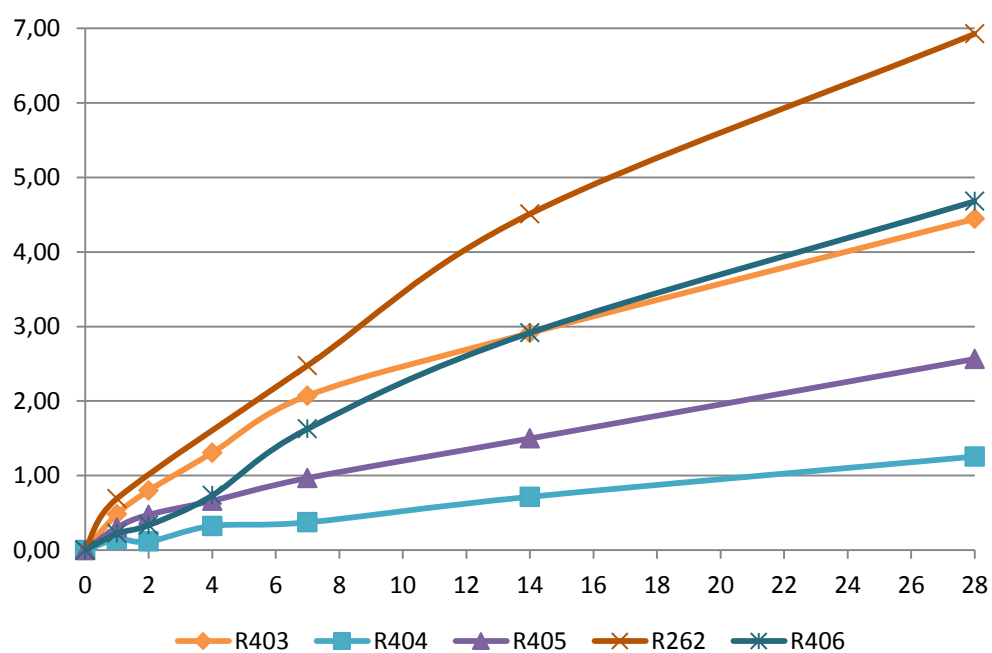


Kuva 58. Komposiittien kovuus, vetomoduuli, vetolujuus, taivutusmoduuli, taivutuslujuus, sekä iskusitkeys esitettynä kuvaajana. Kuvaajassa on lisäksi referenssi R262 ja R406.

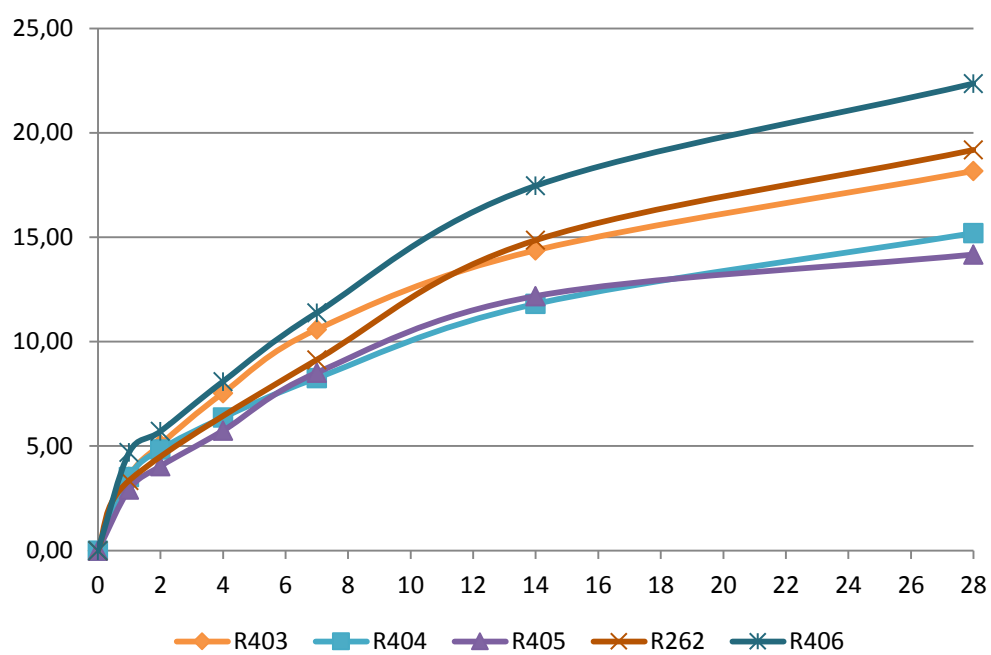
Taulukossa 33 on esitetty veden absorptio ja paksuusturpoaman tulokset. Taulukon riveillä on esitetty vesiupotuksen kesto ja taulukon sarakkeissa on esitetty eri materiaalien paksuusturpoama (TS %) ja veden absorptio (WA %). Kuvassa 59 on esitetty komposiittien paksuusturpoama ajan funktiona ja kuvassa 60 on esitetty komposiittien veden absorptio ajan funktiona.

Taulukko 33. Veden absorption ja paksuusturpoaman tulokset.

	R403		R404		R405		R406		R262	
aika (d)	TS %	WA %	TS %	WA %	TS %	WA %	TS %	WA %	TS %	WA %
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,48	3,54	0,14	3,52	0,30	2,92	0,22	4,70	0,69	3,35
2	0,80	5,08	0,11	4,84	0,47	4,04	0,34	5,70	-	-
4	1,31	7,54	0,33	6,36	0,66	5,74	0,73	8,09	-	-
7	2,07	10,59	0,37	8,26	0,97	8,52	1,63	11,38	2,48	9,13
14	2,91	14,37	0,72	11,81	1,50	12,18	2,92	17,46	4,51	14,86
28	4,44	18,17	1,26	15,20	2,56	14,17	4,68	22,36	6,93	19,18



Kuva 59. Paksuusturpoama TS %.



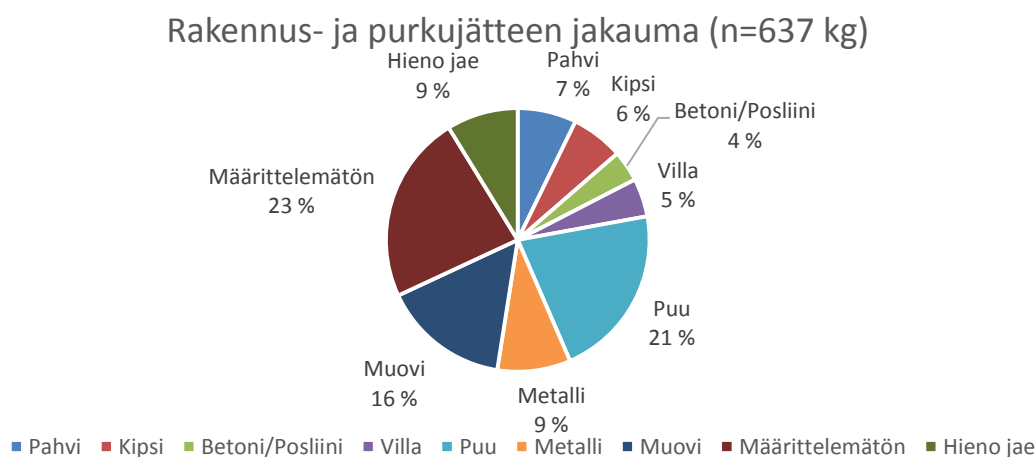
Kuva 60. Veden absorptio WA %.

7 TULOSTEN TARKASTELU

Tässä kappaleessa tarkastellaan tutkimuksen tuloksia, ja verrataan niitä muuhun alan tutkimustietoon. Tämä kappale koostuu rakennus- ja purkujätteen, lajittelun, sekä komposiitin ominaisuuksien tarkastelusta.

7.1 Rakennus- ja purkujäte

Tämän tutkimuksen keskimääräinen rakennus- ja purkujätteen jakauma on esitetty kuvassa 61. Kaaviossa on yhdistetty toimipisteen 1, sekä toimipisteen 2 molempien kuormien yhteenlasketut massat.

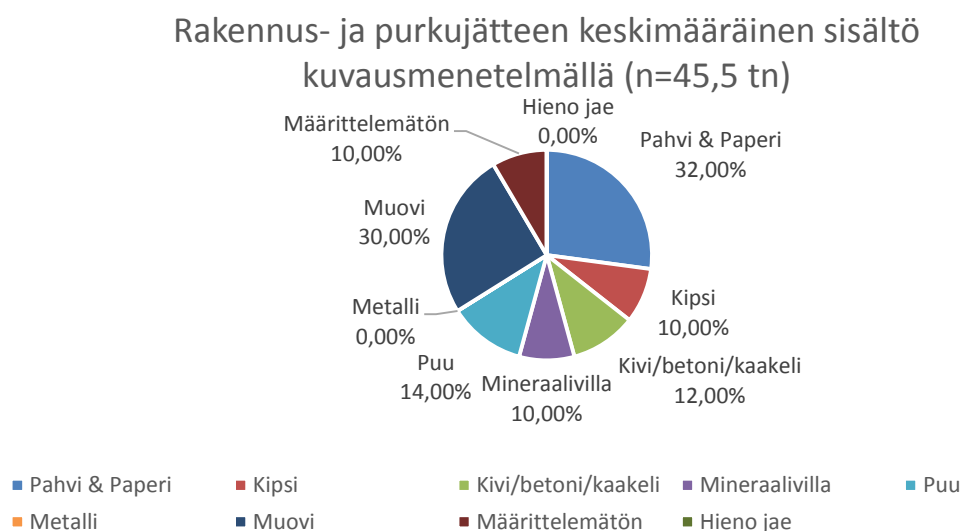


Kuva 61. Toimipisteiden näytteiden materiaalien jakauma prosenttiosuuksina.

Toimipisteen1 materiaalissa metallien osuus on kohtalaisen suuri. Materiaalinäyte sisälsi metallisia vesijohtoputkia, joiden massa on merkittävän suuri ja näin muokkasi kyseisen näytteen jakaumaa metallipainotteiseksi. Suurimmat yksittäiset sektorit rakennus- ja purkujätteessä tämän tutkimuksen mukaan ovat määrittelemätön, puu, sekä muovi. Rakennus- ja purkujätteen kierrätyksen kannalta puun ja muovin suuri osuus koko jakaumasta on lupaavaa.

Rakennusjätevirran koostumusta Suomessa kuvausmenetelmällä tutkineen Kärjen, Väntsin ja Kinnusen (2014) tutkimuksessa rakennusjätejakeet ovat jaettu seuraaviin jakeisiin: puu, muoviputki, muu muovi, paperi & pahvi, polystyreeni, mineraalivilla, metalli,

kivi/betoni/kaakeli, kipsilevy, tekstiili. Tutkimuksen vertailun helpottamiseksi voidaan yhdistää seuraavat materiaalit: muoviputki, muu muovi ja polystyreeni koskemaan kategoriaa muovi, sekä tekstiili koskemaan kategoriaa määrittelemätön. Kuvassa 62 on esitetty heidän tutkimuksessa saatu rakennusjätteen keskimääräinen sisältö kuvausmenetelmällä toteutettuna otoskoon ollessa 45 500 kg. (Kärki et al. 2014, s. 13.)



Kuva 62. Rakennusjätteen koostumus Suomessa kuvausmenetelmällä toteutettuna (Kärki et al. 2014, s. 13).

Kärki et al. (2014) tutkimuksessa esitetty rakennus- ja purkujätteen keskimääräinen sisältö eroaa hieman tässä tutkimuksessa todetusta jätteen sisällöstä, mutta myös samankaltaisuuksia on havaittavissa sisältöjen välillä. Kärki et al. (2014) tutkimuksessa muovien osuus on kaksi kertaa suurempi verrattuna tähän tutkimukseen. Määrittelemättömän materiaalin osuus on huomattavasti pienempi, eikä kuvausmenetelmällä ole laskettu hienolle jakeelle massaa. Kärki et al. (2014) tutkimuksen suurin yksittäinen kategoria on pahvi ja paperi, minkä osuus on jopa 25 % suurempi, mitä tässä tutkimuksessa on määritetty. (Kärki et al. 2014, s. 13.)

Oikonomou (2005) arvioi Kreikassa purkujätteen sisältöä tutkimuksessa, joka käsitteli kierrätysmurskeen valmistusta. Oikonomoun (2015) tutkimuksessa purkujätteen arvioitu koostumus on esitetty seuraavasti: betoni 40 %, muovi 5 %, puu 10 %, metalli 5 %, keramiikka 30 %, sekä määrittelemätön 10 %. Kyseisessä tutkimuksessa rakennusjätteen

sisältö eroaa erittäin suuresti tässä tutkimuksessa käytetystä rakennus- ja purkujätteestä. Rakennus- ja purkujätteen koostumuksessa on havaittavissa kirjallisuuden mukaisesti alueellisia eroja, jotka voivat johtua arkkitehtuurisista valinnoista. (Oikonomou 2005, s. 316.)

7.2 Lajittelun tarkastelu

Lajittelun toistettavuus on hyvä, eikä eri lajittelukierrosten välillä ole merkittäviä poikkeamia toisistaan. Tämä tarkoittaa, että käytettävä materiaali on ollut sekoitettu tasalaatuiseksi ja koneen parametrit on säädetty hyvin kyseiselle materiaalivirrälle. Parametrien säätämällä tavoiteltiin mahdollisimman puhtaita erillisiä jakeita. ClassiCleaner-lajittelukoneen imua säätämällä pyrittiin saamaan kevyet ja ilmavat jakeet imuun siten, että ylitteeseen päätyisi pitkiä tai tiheämpiä partikkeleita. ClassiCleaner-koneen kapasiteettiarvoa voitaisiin lisäksi säätää, ja tutkia onko sillä vaikutusta lajittelun puhdistustehokkuuteen.

Lajittelun tuloksena saavutettiin 9 jaetta jokaista materiaalierää kohden. Näistä 3 ensimmäistä, jakeet 1, 2 ja 3, edustavat hienoja jakeita, jotka koostuvat pääosin pienestä villakuidusta. Villan lisäksi jakeissa on pieniä puukuituja, sekä kipsipölyä. Huomionarvoista jakeissa on kohtalaisen korkea irtotiheys. Tiiviinä ja raskaana materiaalina pienien villakuitujen hyödyntämistä voisi tutkia lujite- tai täytemateriaaleina esimerkiksi betonivaluissa tai muissa massavaluissa. Cheng, Lin ja Huang (2011) tutkivat mineraalivillan hyödyntämistä betonipohjaisissa komposiiteissa ja tulokset olivat positiivisia. Mineraalivillan lisääminen betonipohjaisiin komposiitteihin paransi merkittävästi niiden puristuslujuutta, halkaisuvetolujuutta, absorptiokykyä ja resistiivisyyttä, sekä paransi hieman niiden kulutuksenkesto-ominaisuuksia. (Cheng et al. 2011, s. 636–642.)

Materiaalien jakeet 4 ja 5 ohjattiin ilmaerottimeen, jossa raskaammat partikkelit tippuivat erottimessa alas rejektiin ja kevyemmät poistuivat erottimesta ilmavirran mukana. Erotteluun tulevasta jakeesta on hieno materiaali jo tavoitellusti poistunut ClassiScreen-koneen telaston alussa, joten keskimääräinen partikkelikoko on alkuperäistä suurempaa. Jae 4 ac sisältää ilmavia ja keveitä partikkeleita, jotka koostuvat lähinnä puusta, muovista ja

pahvista. Jae 4 ac voitaisiin hyödyntää esimerkiksi komposiitin materiaalina tai energiantuotannossa.

Jae 4 rej ja 5 rej sisältävät raskaita partikkeleita, joita ovat kovat muovi-, puu- ja kipsipartikkelit, joiden koko on materiaalivirran suurinta. Jakeen arvo materiaalien hyödyntämistä ajatellen on suurin jakeen sisältämän kovan muovin vuoksi. Tästä johtuen kyseinen rejekti tulisi vielä puhdistaa siten, että jakeen sisältämä muovi saataisiin kerättyä ja hyödynnettyä. Puhdistuksessa voitaisiin tutkia esimerkiksi partikkelinmuodon vaihtelua. Muodon perusteella tapahtuvaan erotteluun voisi harkita kokeiltavan esimerkiksi seulontaa täry- tai rumpuseulalla, jossa tikkumainen puupartikkeli voi läpäistä seulaverkon muovipartikkelien jatkaessa seulan ylitteeseen. Myös kipsipartikkeleiden muoto eroaa merkittävästi muovipartikkeleista. Kipsipartikkelit ovat yleisesti muodoltaan pieniä ja pyöreähköjä. Kipsipartikkelit uppoavat lisäksi veteen käytettävien muovien ja puun jäädessä pinnalle. Muovin ja puun erottelua voitaisiin myös tutkia pyörrevirtaerottelua hyödyntäen. Eräs vaihtoehto seula- tai pyörrevirtaerottelun sijaan on myös antureihin perustuvat erottelumenetelmät, mikäli kyseinen lajittelutapa voidaan katsoa taloudellisesti kannattavaksi.

Tutkimuksessa jaetta 5 ac hyödynnettiin komposiitin raaka-aineena. Komposiitin raaka-ainemateriaalista 5ac67 hieman yli puolet oli jaetta 5 ac, joten kyseisen jakeen ominaisuuksilla on suuri merkitys koko komposiittimateriaalin ominaisuuksiin. Jae 6, eli ClassiScreen-koneen ylite, eroaa toimipisteiden materiaaleissa villapitoisuuden suhteen. Toimipisteessä 1 jakeessa 6 villapitoisuus on todella huomattava, kun taas toimipisteen 2 jakeessa 6 villaa on vain pieni osuus. Jakeen vaihtelua voidaan pitää siis suurena riippuen käytettävästä materiaalista, sekä käytettävästä imun suuruudesta. Toimipisteen 1 jae 6 sisältää villan lisäksi puuta ja kalvomaisia muoveja. Jae 7, eli imuun menneet partikkelit ovat suuripinta-alaisia ja keveitä. Toimipisteen 1 materiaalissa tämä tarkoittaa lähinnä villaa ja kalvomaisia muoveja. Toimipisteen 2 materiaali on vastaavaa, sisältäen kuitenkin hieman myös pahvia.

Toimipisteen 1 materiaalin villa oli koostumukseltaan enemmän lasivillapitoista, kun toimipisteen 2 materiaalin villa koostui lähinnä mineraalivillasta. Villan tyyppi vaikuttaa villan partikkelikokoon murskauksen jälkeen. Mineraalivilla hajoaa murskauksessa

pienempään partikkelikokoon lasivillan pysyessä suuremmassa partikkelikoossa. Tämä osaltaan vaikutti lajittelun puhtauteen, sillä toimipisteen 2 materiaalissa pienipartikkelinen mineraalivilla päätyi lähinnä hienoihin jakeisiin. Toimipisteen 1 materiaalin tapauksessa villaa oli useissa jakeissa (fines, 5 ac, 6, 7). Toisaalta toimipisteen 1 lajiteltavassa materiaalissa villaa oli myös 13 % enemmän, joten villan laadun vaikutuksen todellinen arviointi on hankalaa.

Yleisesti lajittelun onnistumista tarkasteltaessa riippuen lajiteltavasta materiaalista ClassiCleaner-erottelulla saadaan erotettua noin 10–15 % villaa, puuta ja kipsiä sisältävää fines-jaetta, 30–60 % puuta ja muovია sisältävää 4 ac-materiaalia, 9–40 % kovamuovi-puuseosta (rejekti), sekä 25–50 % villaan sekoittunutta puuta, muovია ja pahvia. Neljän jakeen erottaminen yhdellä lajittelukoneella on tehokasta, mikäli jakeiden hyödyntäminen voidaan tehdä kannattavasti. Laitteiston ohjauksella voidaan lisäksi helposti vaikuttaa lopullisen jakeen puhtauteen. Tärkeänä huomiona voidaan pitää, että kovamuovi saadaan erotettua tehokkaasti rejektiin. Etenkin murskatut putket erottuvat täysin rejektiin, joten tämän materiaalin osalta lajittelu voidaan katsoa erittäin onnistuneeksi. Rejektien puhtaus on kuitenkin kovamuovin osalta vain noin 50 % tasolla, joten muovin hyödyntämiseksi jakeen jatkopuhdistus on tärkeää riippuen myös käyttökohteen vaatimuksista. Toinen merkittävä huomio lajittelussa on kipsin erottuminen lähes täysin fines-jakeeseen. Vain suuremmat kipsipartikkelit päätyivät lajittelussa rejektiin. Taulukossa 34 on esitetty eri jakeille mahdollisia hyödyntämiskohteita.

Taulukko 34. Eri jakeiden mahdollisia käyttökohteita.

	FINES	4 ac	REJEKTI	5ac67
Agglomeraatti	-	+	+	+
Muovikomposiitti	+	+	+	+
Betonikomposiitti	+	+	+	+
Eristemateriaali	+	-	-	-
Energia	-	+	+	-
Maanrakennus	+	-	-	-

7.3 Komposiitin ominaisuuksien tarkastelu

Komposiitin raaka-aineena käytetty sekoitettu materiaali 5ac67 sisältää molemmissa tapauksissa muovia, villaa, puuta, sekä toimipisteen 2 tapauksessa myös pahvia. Molempien materiaalien irtotiheys on melko pieni. Toimipisteen1 materiaali sisältää toimipisteen 2 materiaalia enemmän villaa, sekä materiaalista löytyy sidontavanteen palasia. Agglomeraatin valmistuksessa molemmat materiaalit onnistuivat hyvin, vaikkakin valmistuslämpötilaa jouduttiin nostamaan lähes 200 °C:een. Tämä voi johtua osaltaan villan eristävistä vaikutuksista, mikä voi aiheuttaa hitaampaa sulamista ja sekoittumista. Jonkin verran agglomeraattiin jäi purua erilleen muista materiaaleista komposiiteissa R403 ja R405. Sekoittumisen parantamiseksi agglomeraatit täytyi vielä murskata vasaramyllyllä hienompaan partikkelikokoon. Ekstruuderilla ajettavuus rakennus- ja purkujätteestä valmistetuilla komposiiteilla on kohtalainen. Pinnanlaadun ominaisuuksien parantaminen on todennäköisesti mahdollista ja se vaatii lisätutkimusta lopullisessa mahdollisessa tuotteistamisprosessissa.

Komposiitin mekaanisia ominaisuuksia voidaan verrata Keskisaaren, Butylinan ja Kärjen (2016) tekemään tutkimukseen, mikä käsitteli kierrätysraaka-aineiden hyödyntämistä komposiittien täyteaineina. Tutkimuksessa käytetty komposiittimateriaali sisälsi 24 % puukuitua, 30 % polypropeenaa, 3 % MAPP-kytkentäainetta, 3 % voiteluainetta, 20 % mineraalivillaa, sekä 20 % kipsilevymurskaa. Toinen heidän tutkimuksessa käytetty komposiitti sisälsi 44 % puukuitua, 30 % polypropeenaa, 3 % MAPP-kytkentäainetta, 3 % voiteluainetta ja 20 % sekalaista poltettua rakennus- ja purkujätettä. Jätteen polttamisella pyrittiin poistamaan orgaaniset epäpuhtaudet. Mineraalivilla-kipsilevykomposiitin taivutuslujuudeksi saatiin tutkimuksessa $18,75 \pm 0,72$ MPa, taivutusmoduuliksi $3,83 \pm 0,16$ GPa ja Charpy-iskusitkeydeksi $2,34 \pm 0,14$ kJ/m². Poltetun rakennus- ja purkujätekomposiitin vastaavat arvot olivat taivutuslujuudelle $17,79 \pm 0,95$ MPa, taivutusmoduulille $4,04 \pm 0,25$ GPa ja Charpy-iskusitkeydelle $3,09 \pm 0,19$ kJ/m². Tuloksia verratessa tässä tutkimuksessa saatuihin arvoihin huomataan, että kaikki saadut arvot lajitelluista rakennus- ja purkujätteistä ylittävät Keskisaaren et al. (2016) tutkimuksen tulokset. Tässä tutkimuksessa saatuja iskusitkeyden arvoja voidaan pitää kohtalaisen hyvinä verrattuna Keskisaari et al. (2016) tutkimiin rakennus- ja purkujätteestä valmistettuihin komposiitteihin. Referenssinä tässä tutkimuksessa käytetyn R406-komposiitin arvot alittavat Keskisaaren et al. saamat tulokset. Tämä voi osaltaan johtua komposiitin valmistuksessa

käytetyistä kierrätysmuoveista, kun taas Keskisaari et al. (2016) käyttivät neitseellistä PP-muovia. (Keskisaari et al. 2016, s. 3–4.)

HISER-projektissa tutkittiin rakennus- ja purkujätteestä lajitellun puun hyödyntämistä puumuovikomposiitin valmistuksessa. Käytettäviä puumateriaaleja olivat käsittelemätön puu, maalattu puu, vaneri, sekä lastu- ja kuitulevy. Puumateriaalit käsiteltiin ensin levyjauhimella, jonka jälkeen materiaalit murskattiin vasaramyllyllä ja seulottiin kiekkoseuloilla haluttuun partikkelikokoon. Valmistettu komposiitti sisälsi kuivattua puumateriaalia 63 %, neitseellistä polypropeenä 25 %, talkkia 5 %, MAH-kytkentäainetta 2 % ja vahamaista voiteluainetta 5 %. Laitteistona käytettiin Conex CWE-380-1 ekstruusiokonetta. Suurimman taivutuslujuuden (noin 32 MPa) sai vanerista valmistettu komposiitti, sekä suurimman taivutusmoduulin (noin 5,6 GPa) sai maalatusta puusta valmistettu komposiitti. Pienin taivutuslujuus ja taivutusmoduuli tutkimuksessa saatiin lastu- ja kuitulevystä valmistetulle komposiitille taivutuslujuuden ollessa noin 25,5 MPa, sekä taivutusmoduulin ollessa noin 4,3 GPa. Kaikki tässä tutkimuksessa valmistettujen komposiittien taivutuslujuuden ja taivutusmoduulin arvot alittivat HISER-projektissa tehdyn tutkimuksen tulokset. Toisaalta on huomioitava, että HISER-projektissa tehdyssä tutkimuksessa valmistettiin puhdistettua tunnistettua puumurskaa komposiitin raaka-aineeksi, kun tässä tutkimuksessa komposiittia valmistettiin sekoittuneista jakeista. Lisäksi polypropeenin taivutuslujuusarvot ovat hieman suuremmat verrattuna tutkimuksessa käytetyn polyeteenin vastaaviin. HISER-projektissa valmistetun komposiitin taivutusominaisuuksia voidaan pitää tavoiteltavina. (HISER 2016, s. 1.)

Chaharmahali, Tajvidi ja Najafi (2008) tutkivat puumuovikomposiittien ominaisuuksia, kun puumateriaalina käytettiin jätelastulevyä ja jätelukitulevyä. Tutkimuksessa muovina käytettiin kierrätettyä HDPE-muovia, joka on saatu muovisista maitopulloista. Komposiittien ominaisuuksia vertailtiin muovin ja puumateriaalin suhteita vaihtelemalla. Komposiitille, joka sisältää kierrätettyä kuitu- ja lastulevyä 70 % ja muovia 30 %, saatiin tutkimuksessa taivutuslujuuden arvoksi noin 16 MPa ja taivutusmoduulin arvoksi noin 2,9 GPa. Puumateriaalia lisäämällä taivutuslujuuden ja taivutusmoduulin arvot laskivat hieman. Verrattuna tässä tutkimuksessa esitettyihin tuloksiin Chaharmahali et al. (2008) saamat tulokset ovat taivutuslujuuden osalta hieman heikommat. Taivutusmoduulin arvot ovat melko lähellä tosiaan tutkimusten välillä. Chaharmahali et al. (2008) eivät käyttäneet

kytkentäaineita tutkimuksessa, millä voisi olla ominaisuuksia parantavia vaikutuksia. Yleisesti ottaen taivutusominaisuudet ovat kohtalaisen lähellä toisiaan tutkimusten välillä. (Chaharmahali et al. 2008, s. 609–610.)

Väntsi ja Kärki (2014) tutkivat kierrätetyn mineraalivillan hyödyntämistä puumuovikomposiittien täyteaineena. Tutkimuksessa käytettiin eri mineraalivillapitoisuuksia, joista eräs komposiitti sisälsi 20 % kierrätettyä mineraalivillaa, 44 % puukuitua, 30 % polypropeenaa, sekä 3 % kytkeä-, että voiteluainetta. Tutkitun komposiitin taivutuslujuudeksi saatiin 18,7 MPa, taivutusmoduuliksi 3,8 GPa, vetolujuudeksi 13,5 MPa, vetomoduuliksi 5,5 GPa, Charpy-iskusitkeydeksi 2,3 kJ/m², sekä Brinell-kovuudeksi 14,4 HB. Tässä tutkimuksessa saadut arvot ovat taivutuslujuuden ja vetolujuuden osalta hieman parempia. Ainoastaan R404-komposiitin vetolujuus on vain hieman heikompi verrattuna mineraalivillalla täyteaineistettuun komposiittiin. Tässä tutkimuksessa saatujen taivutus- ja vetomoduulien arvot ovat hieman pienempiä, mikä voi johtua tässä tutkimuksessa käytetystä suuremmasta muovin määrästä. Iskusitkeys tässä tutkimuksessa mitatuissa komposiiteissa on merkittävästi suurempi, kun taas kovuus on merkittävästi heikompi verrattuna mineraalivillalla täyteaineistettuihin komposiitteihin. (Väntsi & Kärki 2014, s. 224–225.)

Lisäksi Väntsi ja Kärki tutkivat myös komposiittien veden absorptioita ja paksuusturpoaman muutosta työssään. 20 % mineraalivillaa sisältävän komposiitin paksuusturpoamaksi 24 h jälkeen saatiin alle prosentti ja 28 vuorokauden jälkeen noin 5 %, kun taas veden absorptioksi saatiin 24 h jälkeen alle 5 % ja 28 vuorokauden jälkeen noin 13 %. Tässä tutkimuksessa saadut vastaavat arvot ovat paksuusturpoaman osalta heikoimmillaan samalla tasolla, ja parhaimmillaan komposiitin R404 osalta huomattavasti paremmat. Veden absorptio on tässä tutkimuksessa valmistetuissa komposiiteissa hyvin samankaltainen Väntsin ja Kärjen saamiin tuloksiin. Mineraalivillalla täyteaineistettuihin komposiitteihin verrattuna tässä tutkimuksessa valmistetut komposiitit pärjäsivät kokonaisuudessaan kohtalaisen hyvin, mikäli käyttökohteessa painaumakestävyyden arvolla ei ole suuria vaatimuksia. (Väntsi & Kärki 2014, s. 224–225.)

Najafi et al. (2007) tutkivat paksuusturpoaman muutosta komposiiteissa, jotka olivat valmistettu sahanpurusta ja kierrätetyistä muoveista 50–50 % suhteella. Tutkimuksessa

vertailtiin polypropeenin ja polyeteenin ominaisuuksia kierrätettynä ja neitseellisenä materiaalina. Kierrätetystä HDPE-muovista valmistetun komposiitin paksuusturpoamaksi tutkimuksessa saatiin 14 vuorokauden jälkeen noin 5,6 % sekä 28 vuorokauden jälkeen noin 9,1 %. Tutkimuksessa todettiin, että polypropeenin paksuusturpoama on polyeteenin vastaavaa vähäisempää. (Najafi et al. 2007, s. 163–165.) Tässä tutkimuksessa saadut kaikki paksuusturpoaman arvot ovat merkittävästi alhaisempia verrattuna Najafi et al. (2007) saamiin tuloksiin. Lisäksi R404-komposiitin paksuusturpoama on vähäisempää verrattuna lisättyä puuta sisältäviin komposiitteihin.

Kazemi, Cloutier ja Rodrigue (2013) tutkivat yhdyskuntajätteestä erotellun muovijätteen hyödyntämistä puumuovikomposiittien valmistuksessa. Muovijäte on käsitelty upotuskellutusmenetelmällä, jolloin komposiitin valmistukseen on valittu kelluvat muovijakeet, eli polyeteeni- ja polypropeenimuovit. Tutkimuksessa polyeteeniä kierrätetystä muovista on noin 80 % ja polypropeenia noin 20 %. Tutkimuksessa käsiteltiin eri suhteita puun ja muovin välillä, sekä komposiitteja jotka joko sisälsivät 5 % kytkentäainetta (80/20 MAPE/MAPP) tai eivät sisältäneet ollenkaan kytkentäainetta. Tutkimuksen materiaalitestaus on kuitenkin tehty amerikkalaisten ASTM-standardien mukaisesti, joten tutkimustuloksia voidaan verrata vain suuntaa-antavasti. Komposiittien ominaisuudet paranivat merkittävästi kytkentäainetta käyttämällä, sekä kytkentäaineellisen komposiitin vetolujuus parani puujauhon osuuden kasvaessa. Vastaavasti taas iskutikeus heikkeni puujauhon osuuden kasvaessa. Tutkimuksesta voidaan havaita, että oikealla kytkentäaineella voidaan kierrätysmuovien tapauksessa parantaa komposiitin ominaisuuksia. Tässä tutkimuksessa valmistetuissa komposiiteissa kytkentäaineena käytettiin ainoastaan yhtä kytkentäainetta, joten jatkotutkimus optimaalisen kytkentäaineen, sekä määrän löytämiseksi voisi osaltaan parantaa materiaaliominaisuuksia. (Kazemi et al. 2013, s. 488–492.)

Sommerhuber, Welling ja Krause (2015) tutkivat jätepuun ja kuluttajapakkausjätteestä Dienstleistungs GmbH yrityksen valmistaman kierrätetyn HDPE-muovin hyödyntämistä puumuovikomposiiteissa. Tutkitussa komposiitissa on jätepuuta 58 % ja kierrätettyä HDPE-muovia 39 %, sekä MAPE-kytkentäainetta 3 %. Tutkimuksessa komposiitin vetomoduuliksi mitattiin 2,67 GPa, vetolujuudeksi 15,7 MPa, taivutuslujuudeksi noin 30 MPa ja Charpy-iskutikeudeksi 5,4 kJ/m². Tutkimuksessa veden absorptioksi saatiin 24 h jälkeen noin 1,2 %, 14 päivän jälkeen noin 4,0 % ja 28 päivän jälkeen noin 6,4 %. Vetolujuudet tässä

tutkimuksessa ovat hyvin samankaltaisia Sommerhuber et al. (2015) tekemiin tutkimuksiin, mutta vetomoduuli on tässä tutkimuksessa resepteillä R403 ja R405 hieman korkeampi. Taivutuslujuuden arvo on Sommerhuber et al. (2015) tutkimuksessa merkittävästi suurempi verrattuna tässä tutkimuksessa saatuihin arvoihin. Charpy-iskusitkeydet ovat kohtalaisen lähellä toisiaan tutkimuksien välillä. Veden absorption tulokset ovat Sommerhubert et al. tutkimuksessa merkittävästi alhaisemmat verrattuna tässä tutkimuksessa saatuihin arvoihin. Yleisesti verrattuna komposiitteja tutkimusten välillä voidaan todeta komposiittien ominaisuuksien olevan kohtalaisen lähellä toisiaan ja riittävällä tasolla soveltuviin käyttökohteisiin. (Sommerhuber et al. 2015, s. 80–84.)

Eräs tärkeimmistä tekijöistä kierrätetyn materiaalin hyödyntämisessä on soveltuvan käyttökohteen löytäminen materiaalille. Käyttökohteita materiaaleille tulee etsiä monipuolisesti eri aloilta materiaalin mahdollisuudet ja rajoitukset huomioon ottaen. Esimerkkeinä innovatiivisista käyttökohteista puu- ja luonnonkuitukomposiiteille ovat vuoden 2015 tuotekehityskilpailun voittajat, jotka hyödynsivät komposiittimateriaaleja hauta-arkuissa, kukka-astioissa ja musiikki-instrumenteissa (Bio based news 2015, s. 1). Käyttökohteita pohdittaessa tulee hyödyntää komposiittien ominaisuuksia, joita ovat muun muassa hyvä muovattavuus ja materiaalin homogeenisuus.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Rakennus- ja purkujätteen kiristyvien hyödyntämistavoitteiden johdosta on ensiarvoisen tärkeää kehittää toimintaa raaka-ainetehokkaampaan suuntaan. Rakennus- ja purkujäte vaihtelee merkittävästi niin maittain, eräkohtaisesti, kuin kausittainkin, mikä aiheuttaa haasteita lajittelussa, mikä vaikuttaa lopputuotteiden laatuun. Tutkitun lajittelukoneen soveltuvuus rakennus- ja purkujätevirralle onnistuttiin selvittämään tässä tutkimuksessa, sekä lajitellusta materiaalista pystyttiin valmistamaan hyödynnettävää komposiittimateriaalia.

Rakennus- ja purkujätteen määrä on eri jätejakeita vertailtaessa erittäin merkittävä, sekä jätteen tehokas koneellinen lajittelu on oleellinen tekijä kierrätysraaka-aineiden kustannustehokkaassa valmistuksessa. Rakennus- ja purkujäte sisältää merkittävän osuuden jatkokäyttöön soveltuvia materiaaleja, joita ovat etenkin kovat tai kalvomaiset PE- ja PP-muovit. Kierrätysmateriaaleja hyödyntämällä voitaisiin vähentää neitseellisten materiaalien tarvetta, sekä pienentää jätteestä aiheutuvaa ympäristökuormaa. Jätteestä kierrätettävät muovit eivät kuitenkaan kilpaile ominaisuuksillaan neitseellisten muovien kanssa, joten muovien kierrätyksen tehokkuus perustuu oikeanlaisten käyttökohteiden valintaan, missä muovimateriaaleille sallitaan jokin määrä epäpuhtautta ja sekoittumista muihin muoveihin tai muuhun materiaaliin. Jotkin epäpuhtaudet ovat jopa tavoiteltavia, ja esimerkiksi sekoittunut puu ja muovi ovat sellaisenaan käyttökelpoisia materiaaleja esimerkiksi komposiittimateriaalien valmistuksessa. Sekoittuneiden materiaalien hyötykäytössä on kuitenkin huomioitava, että materiaalien suhteet voivat vaihdella, mikä vaikuttaa valmistettavan tuotteen ominaisuuksiin.

ClassiCleaner-laite osoittautui tutkimuksessa soveltuvaksi lajittelukoneeksi rakennus- ja purkujätteen käsittelyyn. Lajittelukoneen tuottamat neljä eri jaetta ovat kukin hyödynnettävissä mahdollisessa käyttökohteessa. Rakennus- ja purkujätteen sisältämä muoviputkimurska saadaan eristettyä lähes täydellisesti omaan jakeeseensa, mikä on merkittävä ominaisuus muovipitoisten uusiomateriaalien valmistuksessa. On kuitenkin huomioitava, että tässä tutkimuksessa käytetty materiaali ei sisältänyt komposiitin valmistukseen soveltumattomia, haitallisia tai tunnistamattomia materiaaleja, joten

todellisella materiaalivirralla tehtävä lajittelu voi vaatia lisätutkimusta. Lajittelutuloksen parantamiseksi vaaditaan lisäksi lajiteltujen jakeiden puhdistusta toisilla menetelmillä. Laite ei ole myöskään tunnettu rakennus- ja purkujätteiden lajittelussa, jolloin tuotantokäyttö on tällä hetkellä tutkimatonta.

Rakennus- ja purkujätteestä valmistettujen komposiittien ominaisuudet ovat raaka-ainemateriaalin laadun huomioon ottaen hyvällä tasolla. Komposiitin valmistus voikin olla eräs vaihtoehto rakennus- ja purkujätteen hyödyntämiselle, mikäli valmistetulle materiaalille löydetään soveltuvia käyttökohteita. Komposiitin täyteaineena, sekä komposiitin matriisissa tunnetun muovin kanssa rakennus- ja purkujäte toimii hyvin. Lajittelemattomasta rakennus- ja purkujätteestä valmistettu komposiitti on ominaisuuksiltaan heikompaa, mikä voi johtua pienemmästä määrästä muovia, sekä heikompilaatuisesta käytetystä muovista. Komposiitin ominaisuudet ovat kuitenkin kohtalaisella tasolla, joten jatkotutkimusta voitaisiin ohjata sovelluskohteiden etsintään. Komposiitin valmistuksen lisäksi rakennus- ja purkujätteestä tulee innovatiivisesti kehittää muita uusia tuotteita. Materiaalille mahdollisia käyttökohteita voidaan löytää esimerkiksi erilaisina täyteaineina. Lisäksi materiaaliominaisuuksia muuttamalla esimerkiksi vaahdottamalla voidaan saavuttaa uudenlaisia ominaisuuksia kierrätysmateriaaleille.

LÄHTEET

19.4.2012/179. Valtioneuvoston asetus jätteistä. [Viitattu 2.6.2016]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2012/20120179#L3P15>

2011/753/EU. Komission päätös Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2008/98/EY 11 artiklan 2 kohdassa asetettujen tavoitteiden saavuttamisen todentamisessa sovellettavista säännöistä ja laskentamenetelmistä. [Viitattu 29.7.2016] Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:310:0011:0016:FI:PDF>

646/2011. Jätelaki. [Viitattu 29.7.2016]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646>

Abraham, D., Lovell, W. & Kim, J. 1994. Recycling of destructed building products. International Council of Building Research Task Group 16. Proc. First Int. Conf. on Sustainable Construction. Center for Construction and Environment, Univ. Florida, Tampa. s. 755–767.

Allmineral. 2016. Product information [verkkodokumentti]. [Viitattu 19.5.2016]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.allmineral.com/gb/download/productinfos/allmineral_productinfo_gb.pdf

Benthien, J. & Thoemen, H. 2013. Effects of Agglomeration and Pressing Process on the Properties of Flat Pressed WPC Panels. Journal of Applied Polymer Science, 129: 6. ss. 570–576.

Bio based news. 2015. Winners of the “Wood and Natural Fibre Composite Award 2015” announced [verkkodokumentti]. [Viitattu 13.9.2016]. Saatavissa: <http://news.bio-based.eu/winners-of-the-wood-and-natural-fibre-composite-award-2015-announced/>

Bio intelligence service. 2011. Service contract on management of construction and demolition waste –SR1. A project under the Framework contract ENv.G.4/FRA/2008/0112

[verkkodokumentti]. [Viitattu: 30.5.2016]. Saatavissa: http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/2011_CDW_Report.pdf

Bruder, U. 2012. Valtamuovit. Hyvä tietää muoveista [verkkodokumentti]. Muoviplast 02/12. [Viitattu 1.6.2016]. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://polymerik.pp.fi/pdf/Osa2-Valtamuovit.pdf>

Bulk handling systems. 2011. Nihot windshifter – Vision Innovation Collaboration [verkkodokumentti]. [Viitattu: 6.7.2016]. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.bulkhandlingsystems.com/wp/wp-content/uploads/2014/09/BHS-Nihot-Windshifter.pdf>

Chaharmahali, M., Tajvidi, M. & Najafi, S. 2008. Mechanical Properties of Wood Plastic Composite Panels Made From Waste Fiberboard and Particleboard. *Polymer Composites*, 29: 6. ss. 606–610.

Cheng, A., Lin, W. & Huang, R. 2011. Application of rock wool waste in cement-based composites. *Materials and Design*, 32: 2. ss. 636–642.

Christensen, T. 2011. *Solid Waste Technology & Management. Volume 1. Yhdistynyt kuningaskunta: Blackwell Publishing Ltd.* 512 s.

Collins, J. 2012. How to Choose & Use Metal Separators. *Plastics Technology*, 58: 10. ss. 36–42.

Delgado, C. & Stenmark, Å. 2005. *Technological Reference Paper on Recycling Plastics. Virtual European Recycling Centre.* 78 s.

Dieffenbacher GmbH. 2015a. *ClassiScreen – Wood Preparation. High quality wood raw material by screening.* 19 s.

Dieffenbacher GmbH. 2015b. *ClassiCleaner – Dry Chips Cleaning. Processing recycled and fresh wood.* 44 s.

Dodbiba, G. & Fujita, T. 2004. Progress in separating plastic materials for recycling. *Physical Separation in Science and Engineering*, 13: 3–4. ss. 165–182.

Dyer, T. 2012. Construction and Demolition Wastes. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. New York: Springer. 32 s.

EEA. 2015. Euroopan ympäristö – tila ja näkymät 2015: yhteenvetoraportti. Euroopan ympäristökeskus, Kööpenhamina. 212 s.

Ennis, B. 2010a. Agglomeration Technology: Mechanisms. *Chemical Engineering*, 117: 3. ss. 34–39.

Ennis, B. 2010b. Agglomeration Technology: Equipment Selection. *Chemical Engineering*, 117: 5. ss. 50–54.

Erämaja, M. 2016. ClassiCleaner™ lab trials with construction waste. 51 s.

Euroopan yhteisöjen komissio. 2000. Vihreä kirja – PVC ja ympäristö. KOM(2000) 469 lopullinen [verkkodokumentti]. [Viitattu: 2.6.2016]. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://ec.europa.eu/environment/waste/pvc/pdf/fi.pdf>

European Comission. 2008. Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive) [verkkodokumentti]. [Viitattu 29.8.2016]. Saatavissa: <http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/>

European Comission. 2016. Waste – Construction and Demolition Waste (CDW) [verkkodokumentti]. [Viitattu: 27.9.2016]. Saatavissa: http://ec.europa.eu/environment/waste/construction_demolition.htm

Gardener, J., Han, Y. & Wang, L. 2015. Wood-Plastic Composite Technology. *Wood Structure and Function*. *Curr Forestry Rep*, 2015: 1. ss. 139–150.

Goncalves, C. & Margarido, F. 2013. Materials for Construction and Civil Engineering. Science, Processing, and Desing. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. 938 s.

Hadal, R. Dasari, A. Rohrmann, J. & Misra, R. 2004. Effect of Wollastonite and talc on the micromechanism of tensile deformation in polypropylene composites. Materials Science and Engineering, 372: 1/2. ss. 296–315.

Henry, P. 2016. Circular Economy package – what’s in it? [verkkojulkaisu]. [Viitattu 19.9.2016]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/seminar/1%20DG%20ENV_Circular%20Economy%20package.pdf

HISER. 2016. High strenght wood-plastic composites recycled from construction and demolition wood waste [verkkodokumentti]. [Viitattu 13.9.2016]. Saatavissa: <http://www.hiserproject.eu/index.php/component/content/article/80-news/126-high-strength-wood-plastic-composites-recycled-from-construction-and-demolition-wood-waste?Itemid=437>

Horelli, J. 2016. RE: Diplomityön tämänhetkinen tilanne [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottajat: Mikko Ronkanen. Lähetetty 13.10.2016 klo 10.31 (GMT +0300).

HSY. 2016. Rakennusjäte [verkkodokumentti]. [Viitattu: 30.5.2016]. Saatavissa: <https://www.hsy.fi/fi/asukkaalle/lajittelujakierratys/lajitteluohjeet/rakennusjate/Sivut/default.aspx>

Huang, W.-L., Lin, D.-H., Chang, N.-B. & Lin, K.-S. 2002, Recycling of construction and demolition waste via mechanical sorting process. Resources, Conservation and Recycling, 37: 1. s. 23–37.

Huuhilo, T. Martikka, O. Butylina, S. & Kärki, T. 2010. Mineral fillers for wood-plastic composites. Wood Material Science & Engineering, 5: 1. s. 34–40.

Höök, T. & Nykänen, S. 2015. Ruiskuvalu. ValuAtlas – Kestomuottivalun suunnittelu. [verkkodokumentti]. [Viitattu 7.7.2016]. 11 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/ruiskuvaluprosessi.pdf>

Kazemi, Y., Cloutier, A. & Rodrigue, D. 2013, Mechanical and Morphological Properties of Wood Plastic Composites Based on Municipal Plastic Waste. *Polymer composites*, 34: 4. ss. 487–493.

Keskisaari, A. Butylina, S. & Kärki, T. 2016. Use of construction and demolition wastes as mineral fillers in hybrid wood-polymer composites. *J. Appl. Polym. Sci.*, 133: 19.

Kim, J. & Pal, K. 2010. Recent advances in the Processing of Wood-Plastic Composites. Berliini: Springer-Verlag. 176 s.

Klyosov, A. 2007. Wood-Plastic Composites. New Jersey. John Wiley & Sons, Inc. 726 s.

Kojo, R. & Lilja, R. 2011. Talonrakentamisen materiaalitehokkuuden edistäminen. Ympäristöministeriön raportteja 21 – 2011. 102 s.

Koleva, M. 2009. Polypropeeni (PP) [verkkodokumentti]. [Viitattu 1.6.2016]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PP_FI.pdf

Korpivaara, A., Kess, J., Mäntynen, M., Österlund, H., Virtanen, M., Vuorinen, P., Kero, J., Huhtala, H., Kauppinen, S., Laaksonen, E., Koskela, S., Fagerlund, E., Koukkari, H., Hakaste, H. & Peuranen, E. 2013. Rakentamisen materiaalitehokkuuden edistämishjelma. Loppuraportti 24.10.2013. Helsinki. 18 s.

Järvinen, P. 2008. Uusi muovitieto. WS Bookwell Oy, Porvoo. 263 s.

Kärki, T., Väntsi, O. & Kinnunen, R. 2014. Rakentamisessa syntyvien jäte- ja kierrätysmateriaalien hyödyntäminen uusien tuoteryhmien raaka-aineena (JÄTEKIMARA). Loppuraportti K-EASY-osahankkeesta. 30 s.

Lu, J., Wu, Q. & Negulescu, I. 2004. Wood-Fiber/High-Density-Polyethylene Composites: Compounding Process. *Journal of Applied Polymer Science*, 93: 6. ss. 2570–2578.

Mulder, E., de Jong, T. & Feenstra, L. 2007. Closed Cycle Construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste. *Waste Management*, 27: 10. ss. 1408–1415.

Myller, E. 2015. Sekalaisen puujätteen testaus erilaisten lopputuotteiden valmistuksessa. Ympäristöministeriön raportteja 28, 2015. Ympäristöministeriö: Helsinki. 68 s.

Najafi, S. 2013. Use of recycled plastics in wood plastic composites – A review. *Waste management*, 33: 9. ss. 1898–1905.

Najafi, S., Kiaeifar, A., Tajvidi, M. & Hamidinia, E. 2007. Hydroscopic thickness swelling rate of composites from sawdust and recycled plastics. *Wood science technology*, 2008: 42. ss. 161–168.

Oikonomou, N. 2005. Recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, 27: 2. ss. 315–318.

Oksman-Niska, K. & Sain, M. 2008. Wood-polymer composites. Woodhead Publishing Limited. Cambridge, England. 384s.

Oshitani, J., Kajiwaru T., Kiyoshima, K. & Tanaka, Z. 2003. Separation of Automobile Shredder Residue by Gravity Separation Using a Gas-Solid Fluidized Bed. *Kona Powder and Particle Journal*, 21. ss. 185–194.

Oshitani, J., Ono, K., Ijiri, M. & Tanaka, Z. 2004. Effect of particle fluidization intensity on floating and sinking of objects in a gas-solid fluidized bed. *Advanced Powder Technology*, 15: 2. ss. 201–213.

Pacheco-Torgal, F., Tam, V., Labrincha, J., Ding, Y. & de Brito, J. 2013. Handbook of recycled concrete and demolition waste. Woodhead Publishing Limited. 627 s.

Peng, C., Scorpio, D. & Kibert, C. 1997. Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations. *Construction Management and Economics*, 15: 1. ss. 49–58.

Peuranen, E. & Hakaste, H. 2014. Rakentamisen materiaalitehokkuuden edistämisohjelma. Ympäristöministeriön raportteja 17/2014 [verkkodokumentti]. [Viitattu 9.5.2016]. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/135172>

Rauwendaal, C. 2010. *Understanding Extrusion*. München: Carl Hanser Verlag. 231 s.

Rem, P., Leest, P. & van den Akker, A. 1996. A model for eddy current separation. *International Journal of Mineral Processing*, 49: 3–4. ss. 193–200.

Retsch. 2016. Vibratory Sieve Shaker AS 200 basic [verkkodokumentti]. [Viitattu 14.6.2016]. Saatavissa: <http://www.retsch.com/products/sieving/sieve-shakers/as-200-basic/>

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V. 2007. *Komposiittirakenteet*. Muoviyhdistys ry. Helsinki: Hakapaino Oy. 494 s.

Sampaio, C., Cazaciu, B., Miltzarek, G., Huchet, F., le Guen, L., Petter, C., Paranhos, R., Ambrós, W. & Oliveira M. 2016. Stratification in air jigs of concrete/brick/gypsum particles. *Construction and Building Materials*, 109: 15. ss. 63–72.

Schwarzkoophf, M. & Burnard, M. 2016. *Wood-Plastic Composites – Performance and Environmental Impacts*. Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-based Bioproducts. 26 s.

Serranti, S., Gargiulo, A. & Bonifazi, G. 2012. Classification of polyolefins from building and construction waste using NIR hyperspectral imaging system. *Resources, Conservation and Recycling*, 61. ss. 25–58.

SFS-EN 15534-1. 2014. Composites made from cellulose-based materials and thermoplastics (usually called wood-polymer composites (WPC) or natural fibre composites (NFC)). Part 1: Test methods for characterization of compounds and products. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS r.y. 59 s.

SFS-EN 310. 1993. Puulevyt. Taivutuskimmomodulin ja taivutuslujuuden määrittäminen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS r.y. 11 s.

SFS-EN 317. 1993. Lastulevyt ja kuitulevyt. Paksuusturpoaman määrittäminen vesiliuotuksen jälkeen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS r.y. 9 s.

SFS-EN ISO 179-1. 2010. Plastics. Determination of Charpy impact properties. Part 1: Non-instrumented impact test. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS r.y. 34 s.

SFS-EN-ISO 527-1. 2012. Plastics. Determination of tensile properties. Part 1: General Principles. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS r.y. 34 s.

Sommerhuber, P., Welling, J. & Krause, A. 2015. Substitution potentials of recycled HDPE and wood particles from post-consumer packaging waste in Wood-Plastic Composites. Waste Management, 46. ss. 76–85.

Spencer, R. 2007. Screens. BioCycle, 48: 3. s. 22–28.

Suomen virallinen tilasto (SVT). 2013. Jättilasto 2011 – Jätteiden käsittelyssä tapahtunut muutos [verkkajulkaisu]. Helsinki: Tilastokeskus. 9 s. [Viitattu: 9.5.2016]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://tilastokeskus.fi/til/jate/2011/jate_2011_2013-05-17_fi.pdf

Suomen virallinen tilasto (SVT). 2016. Jättilasto 2014 – Tuotannon ja kulutuksen jätteet [verkkajulkaisu]. Helsinki: Tilastokeskus. 9 s. [Viitattu: 7.7.2016]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.stat.fi/til/jate/2014/jate_2014_2016-05-26_fi.pdf

Tanaka, Z. & Song, X. 1996. Continuous separation of particles by fluidized beds. Advanced Powder Technology, 7: 1. ss. 29–40.

Tchobanoglous, G. & Kreith, F. 2002. Handbook of solid waste management. Second edition. The McGraw-Hill Companies, Inc. 834 s.

Tomra. 2015. X-Tract [verkkodokumentti]. 2 s. [Viitattu: 19.7.2016]. Saatavissa PDF-tiedostona: <https://www.tomra.com/~media/Documents/Recycling%20Brochures/2015/Product%20Sheets/Product%20Sheet%20-%20XTRACT.ashx/>

Vegas, I., Broos, K., Nielsen, P., Lambertz, O. & Lisbona, A. 2015. Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology. *Construction and Building Materials*, 75. ss. 121–128.

Velis, C., Longhurst, P., Drew, G., Smith, R. & Pollard, S. 2010. Production and Quality Assurance of Solid Recovered Fuels Using Mechanical–Biological Treatment (MTB) of Waste: A Comprehensive Assessment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 40: 12. ss. 979-1105.

Väntsi, O. & Kärki, T. 2014. Utilization of recycled mineral wool as filler in wood-polypropylene composites. *Construction and Building Materials*, 55. ss. 220–226.

Wang, D., Ma, X., Zhi, X. & Zhang, S. 2014. Research Review of Scrap Metals Eddy Current Separation Technology. *Sensors & Transducers*, 162: 1. ss. 177–183.

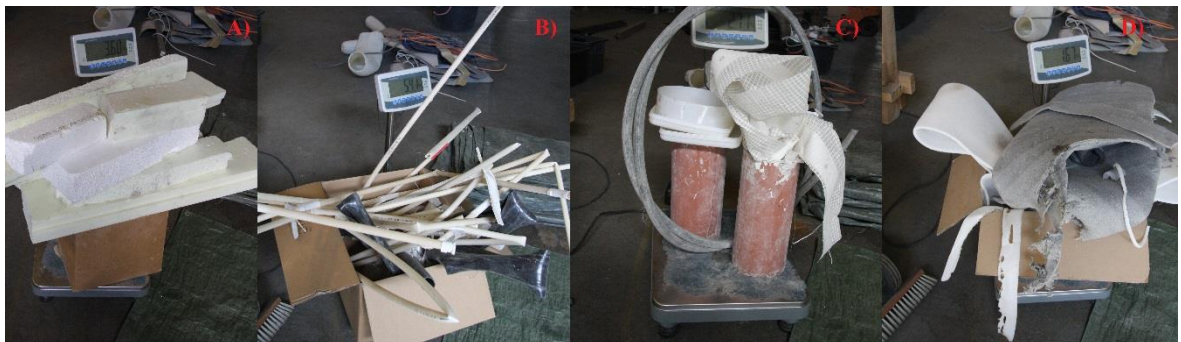
Lähtömateriaalien käsinlajittellut jakeet



Kuva 1. Toimipisteen 1 käsinlajittellut materiaalit. A) Pahvi, B) Kipsi, C) Villa, D) Puu, E) Muovi, F) Määrittelemätön.



Kuva 2. Toimipisteen 1 jatkokäyttöön soveltuvien muovien jaottelu. A) Kalvomaiset muovituotteet, kuten pakkausmuovit, B) Kovat PE- ja PP-muovituotteet.



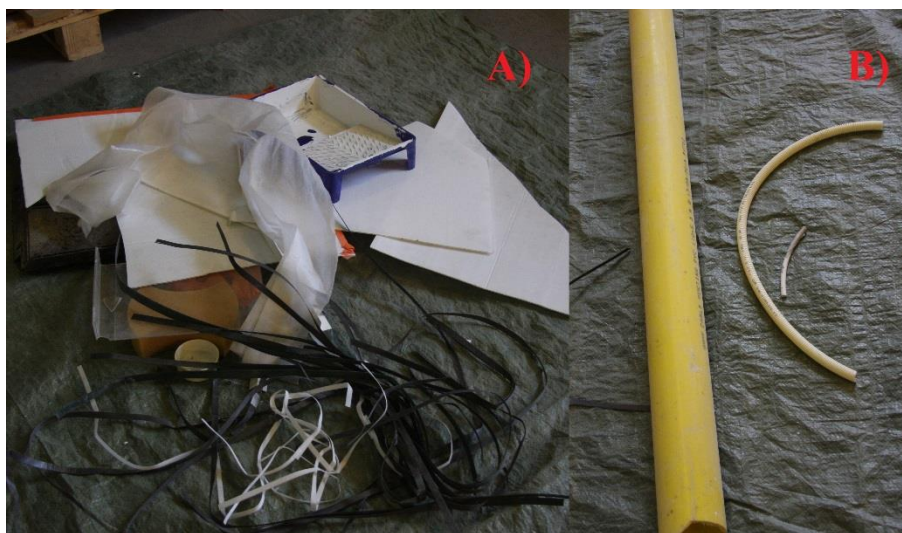
Kuva 3. Prosessista pois jätetyt muovit toimipisteestä 1: A) Polystyreenit, B) PVC, C) määrittelemättömät muovit ja D) solumuovit.



Kuva 4. Toimipisteen 2 käsinlajittelun jakeet. A) Pahvi, B) Kipsi, C) Villa, D) Puu, E) Muovi, F) Määrittelemätön.



Kuva 5. Toimipisteen 2 jatkokäyttöön soveltuvat muovit. A) Kalvomaiset muovit, B) Kovat muovituotteet.



Kuva 6. Prosessista pois jätetyt muovit toimipisteestä 2: A) Tunnistamaton muovi, B) PVC