



Aalto-yliopisto
Kemian tekniikan
korkeakoulu

Kemian tekniikan korkeakoulu
Materiaalitekniikan koulutusohjelma

Tatu Karlström

**VALIKOITUJEN SÄHKÖ- JA ELEKTRONIIKKAROMUJAKEIDEN
KÄYTTÄYTYMINEN RENGASMURSKAUKSESSA**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-
insinöörin tutkintoa varten Espoossa 4.4.2016.

Valvoja

Professori Pekka Taskinen

Ohjaajat

Diplomi-insinööri Sini Eskonniemi

Diplomi-insinööri Leena Tuominen

Tekijä Tatu Karlström

Työn nimi Valikoitujen sähkö- ja elektroniikkaromujakeiden käyttäytyminen rengasmurskauksessa

Laitos Materiaalitekniikan laitos

Professuuri Metallurginen termodynamiikka ja mallinnus

Professuurikoodi MT-37
mallinnus

Työn valvoja Pekka Taskinen

Työn ohjaaja(t)/Työn tarkastaja(t) Sini Eskonniemi ja Leena Tuominen

Päivämäärä 4.4.2016

Sivumäärä 86

Kieli suomi

Tiivistelmä

Sähkö- ja elektroniikkaromun kierrätysliiketoiminnan arvonmuodostuksen tekijöihin kuuluvat jalometallipitoiset laitteet ja komponentit. Suuren arvonsa ja matalan pitoisuutensa vuoksi jalometallit pyritään saamaan talteen mahdollisimman tehokkaasti. Tämä on myös ekologisesti järkevää: kertaalleen tuotteeksi asti jalostetun metallin talteenotto säästää resursseja. Tässä diplomityössä tutkitaan jalometallipitoisuudeltaan alhaisten piirilevyjen murskausta ja rengasmurskausprosessin tehokkuutta. Diplomityön tarkoituksena on tuottaa lisää tietoa piirilevyjen murskautumismekanismeista, metallien talteenoton tehokkuudesta sekä vertailla saatuja tuloksia leikkaavaan murskaustapaan (veitsimurskain).

Tulokset osoittivat, että rengasmurskaimella piirilevymursketta syntyy yhtä paljon yli ja alle 15 mm kokoluokissa. Murskauspölyjä kokonaismassaan suhteutettuna syntyi noin 1 %. Määrätyt materiaalikombinaatiot epätäydellisesti murskautuneissa partikkeleissa aiheuttivat talteenoton tehokkuuden laskua. Tutkimuskirjallisuudessa esitetyt havainnot piirilevymurskeen kokoluokkien ja metallipitoisuuksien suhteesta toistuivat tässä tutkimuksessa.

Leikkaavaan murskaukseen nähden rengasmurskain tuotti huomattavasti suuremman osuuden alle 15 mm kokoluokan jaetta. Pölymäärä oli rengasmurskainprosessissa kokonaismassaan suhteutettuna 10-kertainen veitsimurskaimeen nähden. Näille havainnoille kaksi keskeistä selitystä ovat rengasmurskaimen suurempi teho sekä erot murskautumismekanismeissa. Tämän tutkimuksen perusteella ei menetelmiä kuitenkaan voida perustellusti asettaa paremmuusjärjestykseen, sillä avoimia muuttujia on liikaa.

Jatkotutkimus- ja kehitysehdotukset liittyivät lähinnä materiaalien talteenoton tehostamiseen, näytteenottomenetelmien luotettavuuden parantamiseen sekä suorien materiaalitappioiden minimointiin. Myös murskauspölyn jatkojalostusmahdollisuudet ja kannattavuus on syytä tutkia – joskin pölyjen kokonaismassan ollessa pieni, lienee syytä keskittyä vain jalometallipitoisuudeltaan korkeiden pölyjen talteenottoon ja jatkokäsittelyyn.

Avainsanat Kierrätys, sähkö- ja elektroniikkaromu, piirilevy, rengasmurskain, jalometallit

Author Tatu Karlström		
Title of thesis Behavior of selected WEEE materials in a ring crusher		
Department Department of Materials Science and Engineering		
Professorship Metallurgical Thermodynamics and Modelling		Code of professorship MT-37
Thesis supervisor Pekka Taskinen		
Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s) Sini Eskonniemi and Leena Tuominen		
Date 4.4.2016	Number of pages 86	Language finnish

Abstract

Waste Electronic and Electrical Waste (WEEE) has a key role in building the value of recycling business. This particular waste stream is rich in valuable metals and is thus of interest to recyclers who strive to make recovery of these valuable elements as efficient as possible. This is favorable from the viewpoint of the environment, too: the production-based potential energy present in these metals means, that inefficient collection or handling of WEEE automatically leads to great losses in natural resources. This thesis looks into the recycling of printed circuit boards and the efficiency of a ring crusher process. The scope of this thesis is to produce more information on the crushing properties and metal recovery of printed circuit boards, plus comparing the results to a knife shredder process with a similar research setting.

Results show that the ring crusher process produces equal proportions of particles in size classes over and under 15 mm. Dusts generated in the crushing process added up to 1 % of total mass of the processed circuit board batch. Unliberated particles caused some inefficiency in metal recovery. An interesting correlation between particle size classes and metal content was found, as was the case in scientific papers quoted in this thesis.

In comparison with the knife shredder process, ring crusher seems to produce much more dusts and particles less than 15 mm wide. There are two explanations to this: ring crusher is more powerful and applies a crushing method that by nature produces more dusts. This also results in more efficient liberation of particles. This thesis, however, is unable to give strong advice to choose between any of these crushers to process printed circuit boards. This is due to the large number of unknowns related to both processes. It is acknowledged, though, that the current practice is to use ring crusher to process mainly low value WEEE fractions.

This thesis makes some proposals for further research and development of the ring crusher process. These proposals include e.g. dealing with efficiency issues in material recovery and sampling. The investigation for further treatment of crushing dusts rich in valuable elements is advised.

Keywords WEEE, recycling, ring crusher, printed circuit board, noble metals

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty Kuusakoski Oy:lle osaksi ARVI (Material Value Chains, Materiaalien arvovirrat) –tutkimusohjelmaa. Tämän yrityksiä ja oppilaitoksia yhdistävän tutkimusohjelman tavoitteena on parantaa kierrätysmateriaalien talteenoton parissa työskentelevien suomalaisten toimijoiden kilpailu- ja toimintaedellytyksiä sekä tiedollista pääomaa. Tämän diplomityön rahoittajana toimivat Kuusakoski Oy ja Tekes.

Diplomityön tekeminen on ollut monella tavalla opettavainen kokemus. Näiden kansien ulkopuolelle jää koko joukko erilaisia havaintoja, muistiinpanoja ja pohdiskelun kipinöitä vietäväksi myöhempään elämään. Kiitänkin teknologiajohtaja Jyri Taljaa luottamuksesta ja mahdollisuudesta tehdä työ osana ammattitaitoista työyhteisöä, aidossa teollisuusympäristössä. Haluan kiittää diplomityöni valvojaa Pekka Taskista arvokkaista kommentteista ja työn ohjauksesta. Suuret kiitokset kuuluvat myös ohjaajilleni Sini Eskonniemelle sekä Leena Tuomiselle, joiden työpanos tämän diplomityön syntyprosessissa on ollut keskeisen tärkeä. Osoitan kiitokset myös koko tutkimus- ja kehitysosaston henkilökunnalle Kuusakoski Oy:ltä, eritoten Panu Parviaiselle, Maria Lehtiselle sekä Maiju Lehtiselle laboratorioon.

Espoo, 4.4.2016

Tatu Karlström

Sisällys

1	Johdanto.....	1
1.1	Työn tavoite	1
1.2	Työn rajausta	2
1.3	Menetelmät, aineisto ja diplomityön rakenne	2
2	Sähkö- ja elektroniikkaromu	4
2.1	Sähkö- ja elektroniikkaromun määrittely.....	4
2.2	Sähkö- ja elektroniikkaromu raaka-aineena.....	5
2.2.1	Sähkö- ja elektroniikkaromun yleisiä piirteitä.....	5
2.2.2	Teräs	8
2.2.3	Muovit	9
2.2.4	Jalo- ja värimetallit, harvinaiset maametallit.....	10
2.2.5	Raskasmetallit ja muut haitalliset aineet	14
2.3	SER-materiaalin määrästä ja maantieteestä.....	14
3	Sähkö- ja elektroniikkaromun res	18
3.1	Reunaehdot taloudelliselle kannattavuudelle.....	18
3.2	Kierrätys roimunvaisuudessa	20
4	Sähkö- ja elektroniikkaromun kierrättämisen teknologia	24
4.1	Mekaaniset esikäsittely- ja erottelumenetelmät.....	24
4.1.1	Vastaanotto ja materiaalituntemus	24
4.1.2	Käsinlajittelu ja purku	25
4.1.3	Murskaus	26
4.1.4	Magnetismiin perustuva erottelu	26
4.1.5	Painovoimaan perustuva erottelu.....	27
4.1.6	Sensoripohjainen erottelu	29
4.1.7	Pölynpoisto	30
4.1.8	Seulonta.....	31
4.2	Jatkokäsittely	31
5	Näytteenoton teoriaa	33
5.1	Hyvä näytteenottotapa	34
5.2	Näytteenoton virheistä	34
6	Kierrättämisen mallintaminen	35

6.1	HSC Sim –ohjelmisto	35
7	Kokeellinen osio.....	36
7.1	Prosessointilinjan esittely	36
7.1.1	Linjalla syntyvät tuotteet	39
7.2	Koejärjestelyt ja koemateriaali	40
7.2.1	Koemateriaali.....	40
7.2.2	Esivalmistelut	41
7.3	Näytteenotto.....	42
7.3.1	Näytteenotossa syntyneet virheet	45
7.4	Näytteiden käsittely ja analyysit	47
7.4.1	Seulonnat ja käsinlajittelu.....	48
7.4.2	Näytteiden analyysivaiheessa syntyneet virheet	51
7.5	Tulokset	52
7.5.1	Massa- ja ainetase rengasmurskaimelle.....	52
7.5.2	Koemateriaalin käyttäytyminen rengasmurskaimessa.....	58
7.5.3	Vertailukohteena veitsimurskain	61
7.6	Johtopäätökset tuloksista ja vertailusta	67
7.7	Jatkotutkimusehdotuksia.....	68
8	Yhteenveto	70
9	Lähdeluettelo	72
	LIITE 1. Rengasmurskainprosessin prosessikaavio.....	77
	LIITE 2. Näytteenottosuunnitelma.....	78
	LIITE 3. Laboratorion tulosraportti.	80
	LIITE 4. Tulostaulukko.....	86

Symbolit ja lyhenteet

CRT – Cathode Ray Tube, katodisädeputki

ICP - Inductively coupled plasma mass spectrometry, induktiivisesti kytketty plasmamassaspektrometria

LCD – Liquid Crystal Display, nestekidenäyttö

NF-jae, non-ferrous eli ei-rautapitoinen jae

PCB – Printed circuit board, piirilevy

PCB (yhdiste) – Polychlorinated biphenyls, polyklooratut bifenyylit

PGM – Platinum group metal, platinaryhmän metalli

PVC – Polyvinyl chloride, polyvinyylikloridi

SER – sähkö- ja elektroniikkaromu

WEEE – Waste Electronic and Electrical Equipment, sähkö- ja elektroniikkaromu

XRF – X-ray fluorescence, röntgenfluoresenssi

1 Johdanto

1.1 Työn tavoite

Tässä diplomityössä tutkitaan tarkasti rajatun piirikorttityypin murskauskäyttäytymistä ja sitä kautta murskauspiirin suorituskykyä Kuusakoski Oy:n Heinolan tuotantolaitoksen rengasmurskaimessa. Työn ensisijaisena tavoitteena on muodostaa massatase ko. murskainprosessille ja tulkita tuloksia kierrätystekniikan alan viimeisimpien tiedejulkaisujen näkökulmasta, sekä mahdollisuuksien mukaan esittää näkökohtia sähkö- ja elektroniikkaromun murskauksen ja materiaalien talteenoton tehostamiseksi tutkinnan kohteena olleen rengasmurskaimen osalta.

Työn toissijaisena tavoitteena on tarkastella valikoitujen sähkö- ja elektroniikkaromujakeiden murskautumismekanismeja sekä esittää kirjallisuuden avulla perusteltuja näkökohtia murskautumismekanismien yhteydestä murskaimen energiankulutukseen, murskaustehokkuuteen sekä hyödynnettävien materiaalien talteenoton tehokkuuteen. Tuon tarkastelun tavoitteena on edistää kirjoittajan ymmärrystä alati komplisoituvan sähkö- ja elektroniikkaromun käsittelytavoista ja kierrätysmenetelmien kehitysvaatimuksista tulevaisuudessa. Pyrkimyksenä on välittää tämän työn lukijalle perusteltu näkemys näiden asioiden suhteesta toisiinsa sekä esittää arvio siitä, millä tavoin kierrätysteollisuus voi tulevaisuuden haasteisiin vastata.

Edellisestä johtaen voidaan esittää seuraavat tutkimuskysymykset: Miten rengasmurskain soveltuu piirikorttimateriaalin murskaukseen, kun tavoitteena on mahdollisimman korkea materiaalien talteenottotaso? Onko murskauksessa syntyvän hienojakoisen pölyn alkuainejakauma ja syntyvän pölyn määrä kaupallisesti kiinnostavalla tasolla, so. tulisiko pölyjen käsittelyyn panostaa? Miten hyvin rengasmurskainprosessin erottelumenetelmät toimivat? Miten suuri on hävikki ja mitä sen pienentämiseksi voi tehdä?

1.2 Työn rajaus

Työn kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on tarjota lukijalle tiivis mutta informatiivinen tietopaketti sähkö- ja elektroniikkaromusta sekä sen merkityksestä raaka-aineena nyt ja tulevaisuudessa. Tämän vuoksi kirjallisuuskatsauksessa käydään läpi puhtaasti teknisluontoisten asioiden lisäksi kierrättämiseen liittyvää lainsäädäntöä, taloudellisia näkökohtia sekä muita tähän teollisuudenalaan liittyviä aiheita sikäli kuin se on riittävän käsityksen saavuttamiseksi välttämätöntä. Työssä ei varsinaisesti tarkastella sähkö- ja elektroniikkaromua laajamittaisesti, vaan tarkastelun painopisteessä ovat sellaiset sähkö- ja elektroniikkaromujakeet, joita voidaan ongelmitta käsitellä perinteisin menetelmin, so. ne eivät vaadi tavanomaista sähkö- ja elektroniikkaromua enempää erityisiä käsittelymenetelmiä tai ympäristönsuojelullisia toimenpiteitä. Näitä käsittelyn ulkopuolelle jääviä jakeita ovat siten mm. säteilyn tai haitallisten kaasujen takia erityisasemassa olevat sähkö- ja elektroniikkaromujakeet.

Tässä työssä käsitellään asiat kautta linjan eurooppalaisesta näkökulmasta. Sikäli kuin esiteltävä asia kulloinkin on maantieteelliseltä kannalta erityislaatuinen, mainitaan siitä erikseen. Näin menetellään esimerkiksi tapauksissa, joissa Suomen kansallinen lainsäädäntö tai muut erityispiirteet toimintaympäristössämme eroavat Euroopan Unionin vastaavasta.

Tätä diplomityötä koskevien ensimmäisten suunnitelmien tuloksena syntynyt otsikko viittaa useampaan tutkittavaan elektroniikkaromujakeeseen – tuotannollisista syistä mahdollisuuksia useampaan koeajoon diplomityön aikataulun puitteissa ei kuitenkaan ollut. Jo suunnitellut muut koeajot suoritetaankin tämän diplomityön valmistuttua ja niiden tutkimustulokset liitetään osaksi ARVI-ohjelmassa tuotettua tietoa.

1.3 Menetelmät, aineisto ja diplomityön rakenne

Työ rakentuu kahdesta osasta: kirjallisuuskatsauksesta sekä kokeellisesta osiosta. Työmenetelminä käytetään kirjallisuustutkimusta, jonka tavoitteena on välittää lukijalle ajantasainen kuva nopeasti kehittyvän kierrätystekniikan alan tilanteesta sähkö- ja elektroniikkaromun osalta, sekä kokeellista tutkimusta edellä mainitun rengasmurskainprosessin kohdalla. Tarkempi rengasmurskainta koskeva koe- ja analyysimenetelmien selostus on kuvattu jäljempänä työn kokeellisessa osiossa, luvussa 7.

Kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena, kuten edellä esitettiin, on mahdollistaa lukijalle tarpeellinen tiedollinen pohja työn kokeellisen osion arvioimiseksi. Kokeellisessa osiossa esitellään tutkimuksen kohteena oleva teollisen mittakaavan rengasmurskainprosessi, tutkittava koemateriaali, tutkimuksessa käytetyt näytteenotto- ja analyysimenetelmät sekä tulosten käsittelymenetelmät. Kokeellisen osion tuloksia esitellään taulukoiden, kuvaajien sekä edellä mainituista muodostettujen johtopäätösten avulla. Tulosten tulkinnan tueksi esitellään keskeisiä kuvia ja havaintoja esimerkiksi taloudellisesti merkittävien alkuaineiden jakautumisesta prosessin sisällä. Saatuja tuloksia verrataan lopuksi toisella prosessointitavalla saatuihin tuloksiin ja viimeisenä esitellään tutkimuksesta tehdyt johtopäätökset.

2 Sähkö- ja elektroniikkaromu

2.1 Sähkö- ja elektroniikkaromun määrittely

Sähkö- ja elektroniikkaromun (WEEE, Waste Electronic and Electrical Equipment) määritelmä Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä 2012/19/EU (EU, 2012) on seuraava: ”sähkö- ja elektroniikkalaitteilla’ [tarkoitetaan] laitteita, jotka tarvitsevat sähkövirtaa tai sähkömagneettisia kenttiä toimiakseen kunnolla, sekä laitteita, joita käytetään kyseisten virtojen ja kenttien tuottamiseen, siirtämiseen ja mittaamiseen, ja jotka on suunniteltu käytettäväksi enintään 1 000 voltin vaihtojännitteellä ja enintään 1 500 voltin tasajännitteellä”.

Tämän ylätasen määritelmän alle on käytännön lainsäädäntötyön sujuvoittamiseksi laadittu kymmenen kategoriaa WEEE:n määrittelemiseksi. Määrittely tulee muuttumaan vuonna 2018 siten, että direktiivin laajentuessa käsittämään kaikkea elektroniikkajätettä, tulee luokkia olemaan vain kuusi (EU, 2014). Luokat on tällä hetkellä määritelty direktiivissä (EU, 2012) seuraavasti:

1. Suuret kodinkoneet
2. Pienet kodinkoneet
3. Tieto- ja teletekniset laitteet
4. Kuluttajaelektroniikka ja aurinkosähköpaneelit
5. Valaistuslaitteet
6. Sähkö- ja elektroniikkatyökalut (lukuun ottamatta suuria kiinteitä teollisuuden työkoneita)
7. Lelut, vapaa-ajan- ja urheiluvälineet
8. Lääkinnälliset laitteet (lukuun ottamatta kaikkia siirteitä ja infektioituvia tuotteita)
9. Tarkkailu- ja valvontalaitteet
10. Automaatit

Mainitun direktiivin tarkoituksena on ”edistää kestäviä tuotanto- ja kulutustapoja ensisijaisesti ehkäisemällä sähkö- ja elektroniikkalaiteromun syntymistä sekä lisäksi edistämällä tällaisen romun uudelleenkäyttöä, kierrätystä ja muita hyödyntämistapoja loppukäsittelyyn tulevan jätteen määrän vähentämiseksi ja resurssien tehokkaan käytön ja arvokkaiden uusioraaka-aineiden keräämisen edistämiseksi.” Näiden tavoitteiden lisäksi direktiivi pyrkii edistämään ympäristönsuojelua ja kestävää kehitystä, perustellen sitä mm. seuraavasti: ” Markkinoiden yhä laajentuessa ja innovaatiocykliden lyhentyessä entisestään tuotteita vaihdetaan aikaisempaa

nopeammin, mistä seuraa, että sähkö- ja elektroniikkalaitteista syntyvän jätteen määrä kasvaa nopeasti.”

Vaarallisten aineiden käytön vähentämiseksi sähkö- ja elektroniikkalaitteissa on laadittu myös erillinen direktiivi 2011/65/EU ”tiettyjen vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa” (EU, 2011). Edellä mainitut direktiivit ovat osa Euroopan unionin yleistä jätehuoltolainsäädäntöä.

2.2 Sähkö- ja elektroniikkaromu raaka-aineena

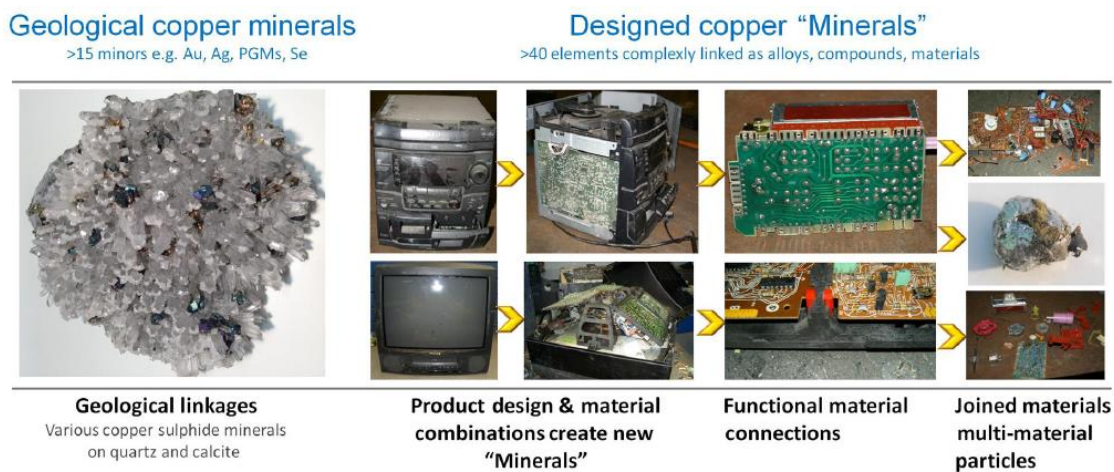
2.2.1 Sähkö- ja elektroniikkaromun yleisiä piirteitä

Sähkö- ja elektroniikkaromun monimuotoisuus materiaalina luo kierrätysalan toimijoille haasteita suoriutua materiaalien erottelusta taloudellisella ja teknisesti tehokkaalla tavalla. Konkreettisenä esimerkkinä tästä voidaan esitellä matkapuhelimen kehitys ja sen suhde matkapuhelinten kierrättämiseen.

Matkapuhelinten kokoonpanossa käytettiin vielä 1990-luvulla laajasti ruuveja puhelimen eri osien kiinnitykseen. Nykyiset puhelimet pannaan kokoon enenevässä määrin liimaamalla tai tekemällä muita ns. kertaluonteisia kiinnityksiä. Tämä tekee kierrätystoimijalle hankalammaksi tuottaa purkamisen ja käsinlajittelun kautta pitkälle esilajiteltuja jakeita, jotka olisivat kierrättämisen tehokkuuden kannalta kaikkein houkuttelevimpia. Puhelinvalmistajilla ketjun alkupäässä ongelma ei tunnu – ellei lainsäädännöllisin keinoin onnistuta ulottamaan vaikutusta myös heihin.

Toinen merkittävä kehitysaskel on paitsi matkapuhelinten, myös muun elektroniikan koon pieneneminen. Tämä tarkoittaa, että tonnissa matkapuhelimia on nykyisin enemmän laitteita kuin ennen – seikka, joka osaltaan myös vaikuttaa kierrätysprosesseihin, erityisesti käsinlajittelu- ja purkamisvaiheessa. Koon pieneneminen aiheuttaa myös sähkö- ja elektroniikkaromun päätymistä väärin jätejakeisiin jo ennen kuin romu päättyy kierrättäjälle asti: puettava elektroniikka ja erilaiset tuotteisiin sisäänrakennetut, elektronisin laittein toteutettavat lisäominaisuudet aiheuttavat WEEE-materiaalin päätymistä kokonaan väärin

Monimuotoisuuden kasvun ohella lisääntyvät myös materiaaliyhdistelmät, jotka ovat entuudestaan tuntemattomia (vrt. luonnosta löytyvät malmit) – tätä havainnollistetaan kuvassa 2. Kuparimalmin tehokkaaseen käsittelyyn ja hyödyntämiseen on kehitetty prosesseja vuosikymmeniä, mutta uudet sekundääriset sähkö- ja elektroniikkaromun myötä kiertoon tulleet ”design-mineraalit” ovat uudehko ilmiö. Näillä design-mineraaleilla tarkoitetaan laitteita, komponentteja ja ennen tuntemattomia funktionaalisia materiaaliyhdistelmiä, jotka sisältävät entuudestaan tunnettuja alkuaineita ei-luonnollisina yhdisteinä. Tämä hankaloittaa kierrätysprosessien suunnittelua, sillä yhdisteitä ei ole enää tunnettua määrää (vrt. tunnetut kuparimalmit) vaan kuparia löytyy niin monesta eri ”yhdisteestä” kuin on yksittäisiä sähkö- ja elektroniikkatuotteita. On selvää, että tämän on johdettava erottelutehokkuuden paranemiseen osana kierrätystekniikan kehitystä. (Worrell, 2014) (UNEP, 2013) (Reuter et al, 2015)



Kuva 2. Luonnon kuparimineraalit (Geological copper minerals) ja ns. design-kuparimineraalit (designed copper minerals) havainnekuvin. Termi ”joined materials” kuvaa odottamattomien materiaaliyhdistelmien syntymistä mekaanisten käsittelyprosessien tuloksena komponenttien takertuessa toisiinsa. (UNEP, 2013)

Kuvassa 3 esitellään tämänhetkisiä toteutuneita kierrätysasteita jaksollisen järjestelmän eri alkuaineille. On huomionarvoista, että monet teknisen kehityksen kannalta olennaiset materiaalit tulevat nykyisin erittäin huonosti kierrätetyiksi, kuten harvinaiset maametallit. Toisaalta niin sanotut bulkkimateriaalit, kuten teräs, kupari ja alumiini saadaan kierrätyksessä paremmin talteen. Luonnollisesti volyymisistä bulkkimateriaalien kierrätysprosentteilla on suurempi merkitys ympäristön kannalta, mutta kuten aiemmin on esitetty, on esimerkiksi harvinaisten maametallien talteenotolla strategistakin merkitystä. Kierrätysprosenttien

alhaisuus ei ole vain teknologinen ongelma, vaan myös lainsäädännöllä on kierrätyksen tehokkuudessa oma roolinsa – tästä problematiikasta enemmän luvussa 3.1.

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	(117) (Uus)	118 Uuo

* Lanthanides

57
La

58
Ce

59
Pr

60
Nd

61
Pm

62
Sm

63
Eu

64
Gd

65
Tb

66
Dy

67
Ho

68
Er

69
Tm

70
Yb

71
Lu

** Actinides

89
Ac

90
Th

91
Pa

92
U

93
Np

94
Pu

95
Am

96
Cm

97
Bk

98
Cf

99
Es

100
Fm

101
Md

102
No

103
Lr

<1%

1–10%

>10–25%

>25–50%

>50%

Kuva 3. Alkuaineiden jaksollinen järjestelmä, josta käyvät ilmi tämänhetkiset kierrätysasteet alkuaineittain. (UNEP, 2013)

2.2.2 Teräs

Teräs on maailman kierrätetyin materiaali. Hieman laskentatavasta riippuen maailman terästuotannosta 40 – 55 % on kierrätettyä terästä. Maailman terästuotanto oli vuonna 2012 n. 1500 miljoonaa tonnia, joten yhdessä suuren volyymin ja huikean energiansäästöpotentialinsa kanssa teräksen kierrättäminen on todellista ympäristönsuojelutyötä. (UNEP, 2013)

Teräksen osuus sähkö- ja elektroniikkaromusta vaihtelee suuresti. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että useimmiten WEEE-tuotteen koon kasvaessa teräksen massaosuus kasvaa. Esimerkiksi matkapuhelinten arvioidaan sisältävän terästä 2,4 – 8,0 %. Teräs on kuitenkin massaosuudeltaan merkittävin komponentti esimerkiksi suurissa kodinkoneissa: esimerkiksi pesukoneissa teräksen osuus on yli puolet tuotteen painosta. Isojen kodinkoneiden materiaalien massaosuuksia on kerrottu tarkemmin taulukossa 1. (UNEP, 2013)

Taulukko 1. Valittujen kodinkoneiden materiaalijakauma painoprosentteina. Ensimmäisessä sarakkeessa ylhäältä lukien neljä merkittävää materiaalia: Teräs, kupari, alumiini ja ruostumaton teräs. Merkittäviä ovat myös betoni (concrete) ja muovit (plastics). Tuotesarakkeissa vasemmalta oikealle: pesukone, kuivausrumpu, astianpesukone ja uuni. (UNEP, 2013)

Material [%]	Washing machine	Dryer	Dish washer	Oven
Iron/Steel	52.1	68.8	45.2	81.3
Copper	1.2	2.3	1.5	0.2
Aluminium	3.1	2.1	0.8	1.9
Stainless Steel	1.9	1.2	23.2	0.7
Brass	0.1	0.1	0.2	0.5
Plastics	6.8	15.9	12.6	0.7
Rubber	2.8	0.9	1.6	0.4
Wood	2.6	4.5	2.1	0.0
Other organic	0.1	–	5.3	0.0
Concrete	23.8	–	1.9	0.0
Other inert material	1.9	1.3	0.9	12.6
PWB	0.4	0.4	0.1	0.1
Cables (internal/external)	1.1	1.8	1.5	1.3
Other materials	2.2	0.8	3.2	0.3
Total	100	100	100	100

2.2.3 Muovit

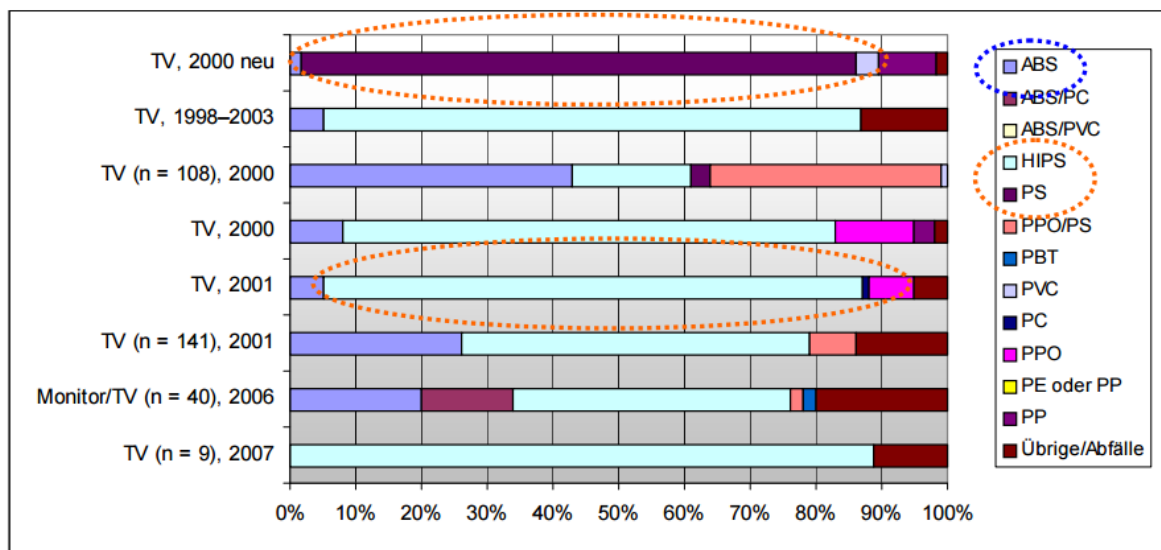
Sähkö- ja elektroniikkaromu sisältää nykyisin suuren määrän eri tavoin seostettuja ja käsiteltyjä muovilaatuja. Ominaisuuksista riippuen jotkin muovilaadut voivat olla myös ympäristölle tai ihmisille haitallisia, joten muovien kierrättämisen haaste ei ole vain taloudellinen. Jotta markkinoille voisi tarjota korkean lisäarvon omaavia laadukkaita uusiomuoviraaka-aineita, tulisi muovilaadut pystyä erottelemaan paljon nykyistä paremmin. Muovikierrätyksen hankaluuden vuoksi kierrätysmuovin kohtalona on usein päätyä kierrätyksen jälkeen funktionaalisesti selkeästi alemmalle tasolle. Käytännössä siis esimerkiksi kännykänkuoren tarkkaan spesifioitu, kallis palonkestävä erikoismuovi voi päätyä maanparannuksessa käytettyjen muovikehikoiden raaka-aineeksi, jolloin muovin sisältämä

”funktionaalinen potentiaali” hukataan. Kierrätysmuovia päätyy myös polttolaitoksiin, jolloin talteen saadaan luonnollisesti enää vain energiasisältö.

Eri muovilaatujen esiintyvyydestä elektroniikkalaitteissa saa hyvän käsityksen, kun tarkastelee kuvaa 4. Siinä on esitelty CRT-televisioiden muovilaatujen jakaumaa eri vuosilta. Sanan ”TV” perässä oleva numero viittaa tutkitun televisioerän vuosimalliin. Huomionarvoista on, että kuvan 3 yhteenvedossa funktionaalisesti kyseessä on sama tuoteryhmä, mutta silti eroavaisuudet muovilaatujen esiintyvyydessä ovat merkittäviä.

Muovien kierrättämisen haasteena ovat paitsi monimuotoisuus ja vaikea eroteltavuus, myös erilaiset seosaineet, kuten palonestoaineet tai haitalliset yhdisteet, kuten kloori. Näistä seosaineista ja niiden roolista kierrätysprosesseissa kerrotaan enemmän luvussa 2.2.5.

Example: Cathode ray tube (CRT) television sets



Kuva 4. Muovilaatujen esiintyvyys kuvaputkitelevisioissa vuosimallista riippuen. Ympyröidyt muovilaadut ylhäältä alas: ABS (akryliniitriilibutadienistyreeni), HIPS (iskunkestävä polystyreeni) ja PS (polystyreeni). (Wäger et al, 2009)

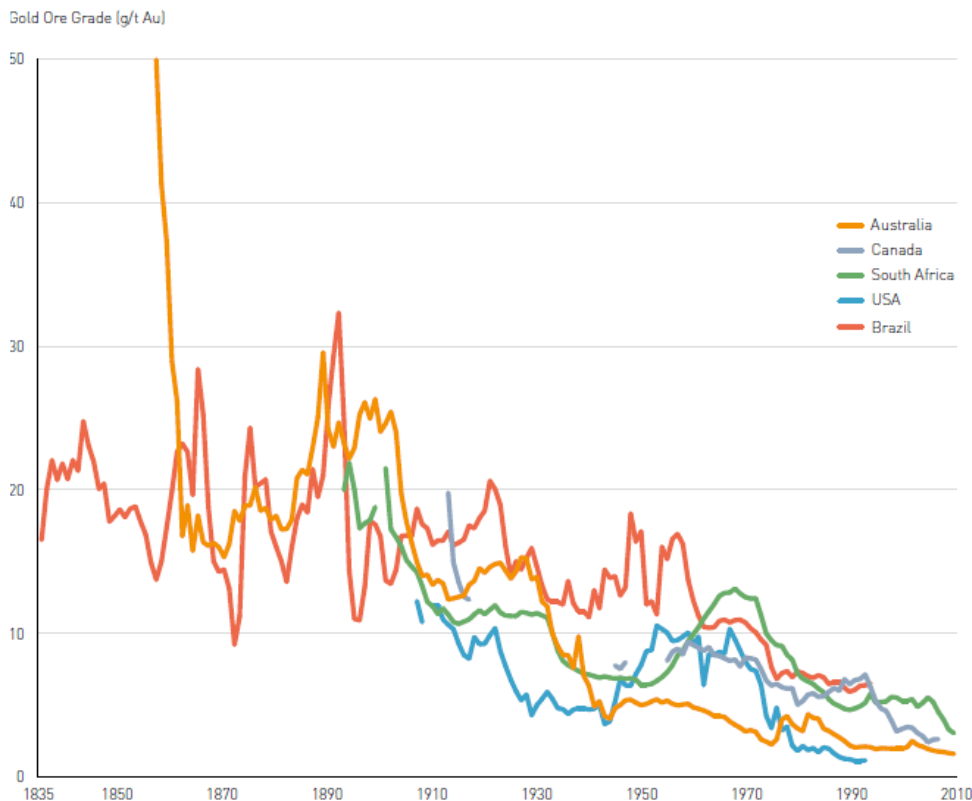
2.2.4 Jalo- ja värimetallit, harvinaiset maametallit

Yksi sähkö- ja elektroniikkaromun sisältämistä houkuttelevimmista jakeista ovat jalometallit. Jalometalleja käytetään elektroniikassa niiden erinomaisen sähkönjohtavuuden ja korroosionkeston vuoksi. Käyttötarkoituksensa vuoksi jalometallit keskittyvät laitteiden sisällä pääosin piirikortteihin, liittimiin ja johtimiin.

Taulukossa 2 on eräiden WEEE-tuotteiden hopea-, kulta-, palladium- ja platinapitoisuuksia. Kuvassa 5 puolestaan on esitelty kultakaivosten kultamalmipitoisuuksien kehitystä. Tämän vertailun pohjalta on helppo nähdä taloudellisten intressien perusta sähkö- ja elektroniikkaromun kierrätyksessä. Esimerkiksi matkapuhelinten kultapitoisuus voi parhaimmillaan nousta yli 900 grammaan tonnissa matkapuhelimia, kun parhaiden kultakaivosten pitoisuudet ovat nykyisin luokkaa 5 grammaa kultaa tonnissa kultamalmia. Jalometallien talteenoton houkuttelevuutta lisää entisestään se, että tonni matkapuhelimia sisältää kullan lisäksi muitakin arvokkaita metalleja, eikä matkapuhelimia tarvitse louhia energiantensiivisesti maan sisältä, vaan ne palautuvat – tosin vaihtelevalla menestyksellä – suhteellisen pienellä vaivalla ja keskitetysti kuluttajilta kierrätykseen. (UNEP, 2013)

Taulukko 2. Eräiden WEEE-tuotteiden jalometallipitoisuuksia grammoina tonnissa. Kiinnostavimpia tuotteita tässä taulukossa ovat matkapuhelimet (mobile phone), tietokoneet (PC) ja litteät näytöt (LCD monitor). (UNEP, 2013)

Product	Content of mother-board in product [%]	Metal concentration in PWB (g/t PWB)				Mass of equipment [kg]
		Ag	Au	Pd	Pt	
Computer key-board	2–2.1	700	70	30		
LCD monitor	4–7.8	1300	490	99		
Computer mouse	8–8.2	700	70	30		
DVD player	10–16.2	700	100	21		2.95–3.4
Hi-fi unit	8–10.6	674	31	10		4.15–5.05
Laptop	15–17.1	1000	250	110		
Speaker	2	674	31	10		
Mobile phone	22–22.1	3573–5540	368–980	285–287	7	
PC	8.9–13	600–1000	81–600	90–110	40	
Printer/fax	6.6–8	350	47	9		
Radio set	20–20.5	520	68	8		5.13–6.2
Telephone	21.9–22	2244	50	241		
Video recorder	10–14	674	31	10		4.0–6.4
Audi & video		674	31			



Kuva 5. Kultakaivosten kultamalmipitoisuuden kehitys eri maissa. Pystyakselilla malmin kultapitoisuus (g/t), vaaka-akselilla aika. (UNEP, 2013)

Myös kuparilla on volyyminsa ja rahallisen arvonsa vuoksi suuri merkitys osana sähkö- ja elektroniikkaromun kierrättämisen taloudellista potentiaalia. Kuparia käytetään mm. sähköjohdoissa ja kaapeleissa sekä keloissa ja sähkömoottoreissa. Kuparin lejeerinkejä (sinkki, tina, nikkeli) esiintyy myös elektroniikkaromussa. Myös alumiinia esiintyy elektroniikkaromussa, tyypillisesti kotelointimateriaalina, rakenteellisissa osissa tai hyvän lämmönjohtavuutensa vuoksi jäähdytyslementeissä.

Harvinaiset maametallit ovat alkuaineryhmä, johon kuuluu IUPAC:n määritelmän mukaan 17 metallia: jaksollisen järjestelmän kolmanteen ryhmään kuuluvat skandium, yttrium sekä kaikki lantanoidit. Maametallien merkitys sähkö- ja elektroniikkaromussa on suuri toiminnallisesti, vaikka niiden massaosuudet ovat usein häviävän pieniä. Elektroniikkalaitteissa maametallit esimerkiksi parantavat akun kestoja, mahdollistavat kosketusnäytöt ja nopeat tietoliikenneyhteydet sekä ovat olennainen komponentti voimakkaiden kestopagneettien valmistamisessa. Maametallit ovat kuitenkin kemiallisilta ominaisuuksiltaan hyvin reaktiivisia ja niitä on hankala erottaa toisistaan keskenään samankaltaisten ominaisuuksiensa vuoksi, joten ne ovat kierrätyksen kannalta todellinen

haaste. Kun hankalaan eroteltavuuteen yhdistetään matalat pitoisuudet (esimerkiksi kännykän kosketusnäytössä milligrammojen luokkaa), on vaikea löytää taloudellisesti kannattavaa tapaa kierrättää harvinaisia maametalleja, siitäkin huolimatta, että ne on tunnustettu yleisesti ”strategisiksi materiaaleiksi” – aiheesta enemmän luvussa 3.2. Taulukossa 3 esitellään PC-tietokoneen materiaali-jakauma, josta käy ilmi myös harvinaisten maametallien hyvin pieni massaosuus ja toisaalta maametallien käyttökohteet, jotka ovat toiminnallisuuden kannalta olennaisia. Taulukon sarakkeet ovat vasemmalta lukien: materiaalin nimi, osuus painoprosentteina, tämänhetkinen kierrätettävyyys toteutuneen perusteella, materiaali-jakeen paino sekä viimeisenä hyödyntämiskohde. Taulukosta voidaan poimia esimerkiksi europiumin hyvin alhainen pitoisuus (2 ppm), mutta se on välttämätön alkuaine tietokoneen näytöllä näytettävien värien tuottamiseksi. (Worrell, 2014)

Taulukko 3. PC-tietokoneen materiaali-jakauma. (UNEP, 2013)

Name	Content [% of total weight]	Recycling Efficiency [current re- cyclability]	Weight of Material (lbs.)	Use/Location
Plastics	22,9907	20 %	13,8	Includes organics, oxides other than silica
Lead	6,2988	5 %	3,8	Metal joining, radiation shield/CRT, PWB
Aluminium	14,1723	80 %	8,5	Structural, conductivity housing, CRT, PWB, con- nectors
Germanium	0,0016	0 %	<0.1	Semiconductor/PWB
Gallium	0,0013	0 %	<0.1	Semiconductor/PWB
Iron	20,4712	80 %	12,3	Structural, magnetivity/ [steel] housing, CRT, PWB
Tin	1,0078	70 %	0,6	Metal joining/PWB, CRT
Copper	6,9287	90 %	4,2	Conductivity/CRT, PWB, connectors
Barium	0,0315	0 %	<0.1	Vacuum tube/CRT
Nickel	0,8503	80 %	0,51	Structural, magnetivity/ [steel] housing, CRT, PWB
Zinc	2,2046	60 %	1,32	Battery, phosphor emitter/ PWB, CRT
Tantalum	0,0157	0 %	<0.1	Capacitors/PWB, power supply
Indium	0,0016	60 %	<0.1	Transistor, rectifiers/PWB
Vanadium	0,0002	0 %	<0.1	Red phosphor emitter/CRT
Terbium	<0	0 %	<0	Green phosphor activator, dopant/CRT, PWB
Beryllium	0,0157	0 %	<0.1	Thermal conductivity/PWB, connectors
Gold	0,0016	99 %	<0.1	Connectivity, conductivity/ PWB, connectors
Europium	0,0002	0 %	<0.1	Phosphor activator/PWB
Titanium	0,0157	0 %	<0.1	Pigment, alloying agent/ [Aluminum] housing

2.2.5 Raskasmetallit ja muut haitalliset aineet

Kierrätysarvoltaan positiivisten alkuaineiden lisäksi sähkö- ja elektroniikkaromu sisältää paljon yhdisteitä, jotka ovat ympäristölle ja ihmisille haitallisia. Näitä ovat mm. PCB-yhdisteet (polyklooratut bifenyylit, polychlorinated biphenyls), bromipitoiset palonestoaineet sekä PVC-yhdisteet (polyvinyylikloridi, polyvinyl chloride). Näitä aineita tavataan käyttötarkoituksesta riippuen johtimien kuorissa (PVC), elektroniikkalaitteiden suojakuorissa ja koteloissa (bromi) sekä piirilevyissä (PCB). (Worrell, 2014)

Myös raskasmetalleja käytetään yleisesti sähkö- ja elektroniikkalaitteissa. EU-direktiivissä (2011/65/EU) on annettu raja-arvot mm. kadmiumin, lyijyn, elohopean ja kuudenarvoisen kromin maksimipitoisuuksille sähkö- ja elektroniikkalaitteissa. Runsaasti raskasmetalleja sisältävät jakeet, kuten CRT-kuvaputkinäyttöjen sisältämä lyijylasi tai elohopeaa sisältävät loisteputket, tulee käsitellä ympäristöä vaarantamatta.

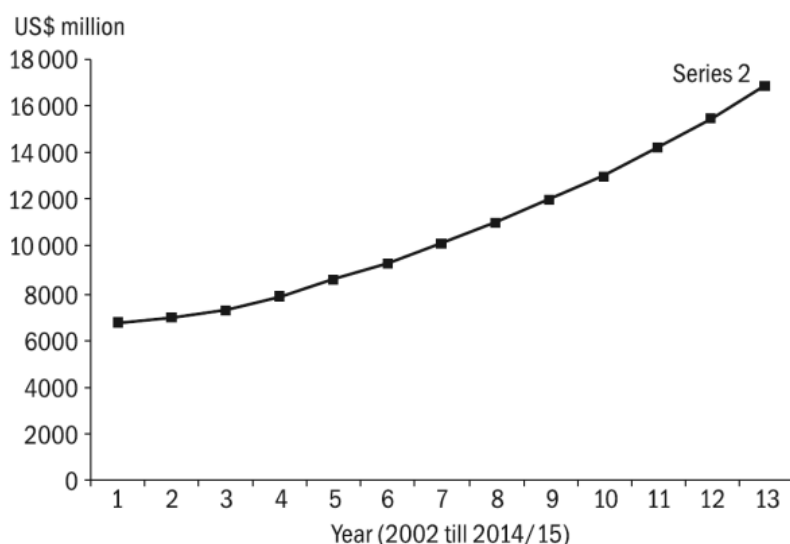
Kylmäaineita sisältävät laitteet, kuten jääkaapit, pakastimet ja ilmastointilaitteet, tulee esikäsitellä niiden sisältämän ympäristölle haitallisen kylmäaineen vuoksi. Nykyisin käytettävät kylmäaineet ovat olennaisesti vähemmän haitallisia ympäristölle kuin vielä 1970-luvulla käytössä olleet, voimakkaasti otsonikerrosta heikentäneet aineet. Tästä huolimatta nykyiset kylmäaineet ovat silti kasvihuonekaasuina niin merkittäviä, että kylmäainetta sisältävien laitteiden esikäsittely aineen poistamiseksi ja talteenottamiseksi on tarpeen. (Worrell, 2014)

2.3 SER-materiaalin määräistä ja maantieteestä

Sähkö- ja elektroniikkaromu on yksi maailman nopeimmin kasvavia jätevirtoja, ja samalla kasvaa siihen liittyvän liiketoiminnan arvo (kuva 6). Sähkö- ja elektroniikkaromua arvioidaan syntyvän maailmassa 20-50 miljoonaa tonnia vuodessa. Arviot vaihtelevat suuresti, sillä tutkimukset mittaavat eri asioita. Euroopassa syntyvän sähkö- ja elektroniikkaromumäärän arvioidaan olevan 5-7 miljoonan tonnin välillä vuodessa (Jain, 2008). Taulukossa 4 esitellään Euroopan unionin alueelta kerätyn sähkö- ja elektroniikkaromun jakaumaa kategorioittain. Kuvan kategorisointi on sama kuin tämän työn kappaleessa 2.1. esitelty luettelo.

Taulukko 4. WEEE:n keskimääräinen jakautuminen tuotteittain EU:ssa. (Williams, 2011)

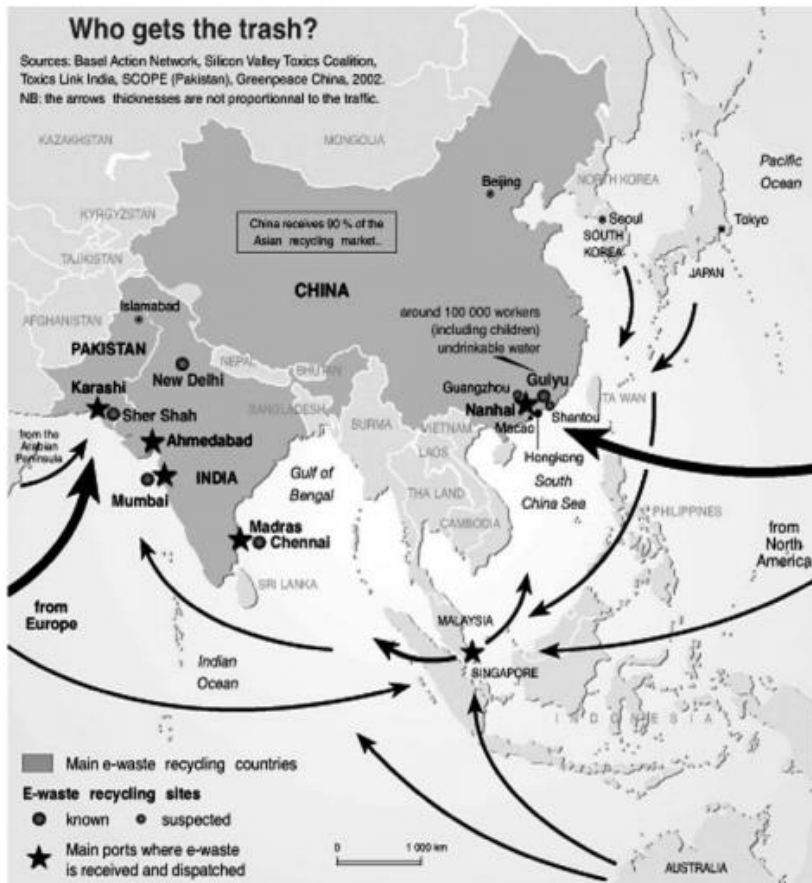
No.	EU WEEE Category (example appliances in parentheses)	% of collected WEEE
1	Large household appliances (refrigerators, ovens, washing machines)	49.07
2	Small household appliances (vacuum cleaners, toasters)	7.01
3	IT and telecommunications equipment (phones, laptops)	16.27
4	Consumer equipment (DVD players, televisions)	21.10
5	Lighting equipment (lamps)	2.40
6	Electrical and electronic tools (drills, saws)	3.52
7	Toys, leisure and sports equipment (game consoles)	0.11
8	Medical devices (pulmonary ventilators, dialysis)	0.12
9	Monitoring and control instruments (smoke detector, thermostats)	0.21
10	Automatic dispensers (drink, money dispensers)	0.18
	Total WEEE (rounded)	100



Kuva 6. Sähkö- ja elektroniikkaromun kierrättämiseen liittyvän liiketoiminnan kasvu maailmassa. Pystyakselilla liiketoiminnan arvo (miljoonaa Yhdysvaltain dollaria) alkaen vuodesta 2001. (Jain, 2008)

On yleisesti tunnettua, että sähkö- ja elektroniikkaromua päätyy kierrättämisen sijaan kehittyneistä maista laittomasti kuljetettuna tiettyihin kehittyviin maihin, missä olosuhteet sähkö- ja elektroniikkaromun oikeaoppiselle käsittelylle puuttuvat tai kapasiteetti on siihen riittämätöntä. Tämä aiheuttaa vastaanottajamaissa ympäristön pilaantumista ja ihmisten terveydentilan heikkenemistä, usein myös seuraavassa sukupolvessa. Tätä ilmiötä on tutkinut mm. Widmer (2005), jonka mukaan Kiinan ja Intian tapaiset valtiot voivat toisaalta myös

hyötyä maahan virtaavasta elektroniikkajätteestä: käytetyt ja rikkinäiset laitteet voivat saada uuden elämän korjattuina ja parantavat näin lyhyellä aikavälillä ihmisten elämänlaatua. Kehittyvissä maissa onkin suuri kysyntä tämänkaltaiselle tavaravirralle. Kuitenkin kokonaisarviot ilmiön suhteen ovat huolestuneita, sillä nykyisenkaltaisen laittoman sähkö- ja elektroniikkaromuviennin mahdollistavat kehitymätön vastaanottajamaiden lainsäädäntö ja toisaalta puutteellinen valvonta lähettäjämaiden rajoilla. Kuvassa 7 esitellään sähkö- ja elektroniikkaromuvirtoja Euroopasta ja Yhdysvalloista Aasiaan.



Kuva 7. Sähkö- ja elektroniikkaromun laitton kuljetus Euroopasta ja Yhdysvalloista Aasiaan. Kuvan suurimmat nuolet johtavat Pohjois-Amerikasta Kiinaan ja Euroopasta Intiaan. (Widmer, 2005)

On esitetty arvioita, joiden mukaan jopa 50-80 % Yhdysvaltojen kotitalouksista peräisin olevasta sähkö- ja elektroniikkaromujätteestä päätyisi kierrättämättömänä laittomaan vientiin. Ongelman tutkiminen ja sitä kautta akateemisen tiedon tuottaminen on hankalaa. Ilmiön taloudellisia ajureita on tutkinut mm. freelance-journalisti Adam Minter, jonka mukaan elektroniikkajätteen viennistä taloudellisesti hyötyviä osapuolia on merireitin molemmissa päissä – seikka, jonka takia laitton vienti on jatkunut niin pitkään (Minter, 2013) – eikä kyse

niinkään ole mustavalkoisesti vain jätteen kuljettamisesta pois silmistä. Eikä kaikki vienti suinkaan ole laitonta: kiinalaiset ostavat aktiivisesti romua Yhdysvalloista. Näin ruokitaan kiinalaista materiaalikysyntää, joka tosin on aivan viime aikoina osoittanut ainakin väliaikaisia laantumisen merkkejä taloudellisen alamäen myötä (Bloomberg, 2015)

3 Sähkö- ja elektroniikkaromun kierrätys liiketoimintana

Sähkö- ja elektroniikkaromun kierrättämisen liiketaloudellinen perusta on tiivistetysti kierrätysraaka-aineiden prosessoinnin energia- ja kustannussäästöissä verrattuna primäärisistä lähteistä tuotettuihin materiaaleihin. Liiketaloudellisessa mielessä kierrätys ei siis ole ensisijaisesti ympäristönsuojelutyötä, vaan markkinataloudellisen järjestelmän luonnollinen ilmiö. Kierrättämistä onkin esiintynyt ihmiskunnan historiassa eri muodoissaan aina: vasta teollistumisen ja halvan raakaöljyn aikakauden myötä kierrättäminen – erityisesti metallien kierrättäminen – on muuttunut mittakaavaltaan globaaliksi.

Tässä kappaleessa tarkastellaan sähkö- ja elektroniikkaromun kierrättämisen kannalta merkityksellisiä liiketaloudellisia vaikuttimia. Rikkaan materiaalisäilytönsä vuoksi SER-materiaali on kierrättäjän kannalta yksi houkuttelevimpia jakeita. Toisaalta globaalissa katsannossa tehottomuutta on joka puolella, alkaen materiaalin talteenotosta – Euroopassa päätyy yhä yli 50% sähkö- ja elektroniikkaromua muualle kuin asianmukaisiin kierrätysprosesseihin, suhteessa siihen elektroniikkamäärään, joka markkinoille tulee (Eurostat, 2012).

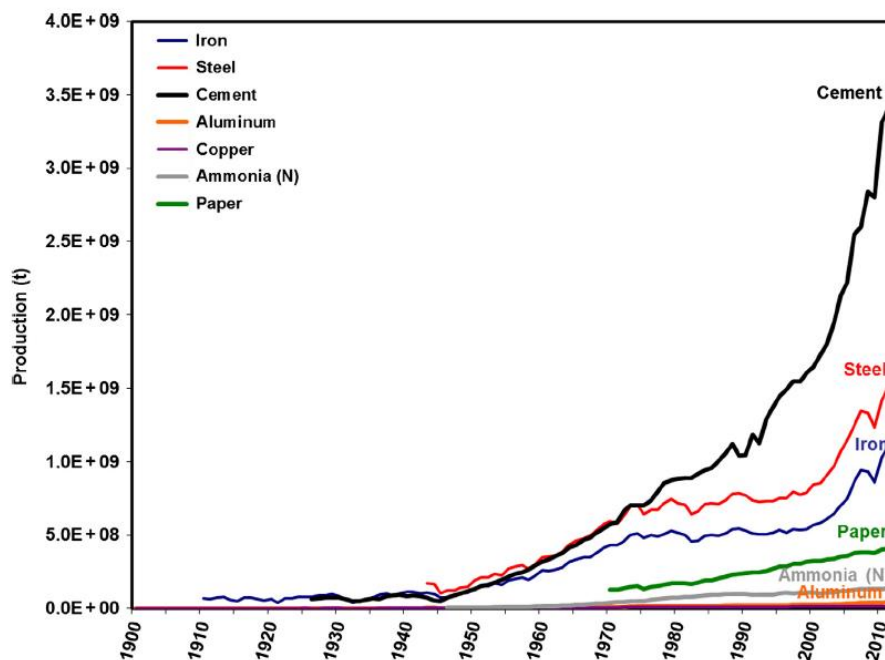
3.1 Reunaehdot taloudelliselle kannattavuudelle

Sähkö- ja elektroniikkaromun kierrättämisen taloudellinen kannattavuus perustuu kierrätysperäisten eli ns. sekundääristen materiaalien hintakilpailukykyyn metallien maailmanmarkkinoilla suhteessa ns. primäärisistä lähteistä peräisin oleviin metalleihin. Hintaehto syntyy yleensä raaka-aineen prosessoinnin ja kuljetuksen energia- ja kustannussäästöistä. Esimerkiksi alumiinikilon tuottaminen kierrätysraaka-aineesta vaatii energiaa jopa 95% vähemmän kuin primäärialumiinin valmistus (UNEP 2013). Toisaalta kierrätysmateriaalin hinta muodostuu monesta tekijästä, kuten kuljetus-, varastointi- ja käsittelykustannuksista, jotka yhdessä voivat nostaa hinnan liian korkeaksi.

Kuten on esitetty, Euroopan unionissa sähkö- ja elektroniikkaromun kierrätyksestä säädetään WEEE-direktiivissä (2002/96/EC), jonka pääsisältönä on velvoittaa sähkö- ja elektroniikkalaitteiden valmistajat ja maahantuojaat järjestämään käytöstä poistuneille WEEE-laitteille asianmukainen kierrätys laitteen elinkaaren lopussa tuottajavastuiksi nimetyn mekanismin avulla. Käytännössä direktiivin myötä tuottajavastuun piiriin kuuluvat toimijat

ovat velvollisia huolehtimaan siitä, että laite palautuu kuluttajalta asianmukaiseen kierrätysprosessiin, jossa ympäristön tai ihmisten hyvinvointi ei ole vaarassa. Tämä menettely on joidenkin tuotteiden kohdalla markkinaehtoisestikin kannattavaa toimintaa – toisaalta myrkyllisyytensä vuoksi erikoiskohtelua vaativat jakeet ovat kierrätysarvoltaan negatiivisia ja siten heikentävät toiminnan kannattavuutta. Luonnollisesti tuottajavastuun tavoitteena on kuitenkin sähkö- ja elektroniikkaromun tehokkaan talteenoton varmistaminen sanktioinnin uhalla, ei niinkään kasvattaa vastuutoimijoiden liiketoimintaa. (UNEP, 2013)

Kierrättäminen on muuttunut idealistisesta ympäristönsuojelutyöstä vakavasti otettavaksi liiketoiminnaksi sitä mukaa, kun ajatus kaikkien luonnonvarojen rajallisuudesta on vallannut oikeutetusti alaa ja raaka-aineiden kysyntä on kasvanut. Kuvassa 8 esitellään muutamien avainmateriaalien tuotannon kehitystä 1900-luvun alusta alkaen. Taulukko 5 puolestaan kuvaa eräiden keskeisten sähkö- ja elektroniikkaromussa esiintyvien metallien tuotannon ja kysynnän suhdetta. Taulukon 5 sarakkeet vasemmalta lukien: metalli, primäärituotanto t/a, minkä metallin sivutuotteena syntyy, metallin tarve elektroniikan valmistuksessa t/a, kysynnän ja tuotannon suhdeluku prosentteina. Viimeisessä sarakkeessa esitellään englanniksi metallien pääasialliset käyttökohteet kuluttajaelektroniikkalaitteiden sisällä.



Kuva 8. Eräiden tärkeiden teollisuuden materiaalien tuotannon kehitys 1900 – 2010. Ylhäältä lukien: rauta, teräs, sementti, alumiini, kupari, ammoniakki ja paperi. (Worrell, 2014)

Taulukko 5. Eräiden metallien tuotantomäärien suhde kysyntään elektroniikan valmistuksessa. (Worrell, 2014)

Metal	Primary Production ¹ (t/y)	By-product from	Demand for EEE (t/y)	Demand/ Production (%)	Main Applications
Ag	20,000	Pb, Zn	6000	30	Contacts, switches, solders
Au	2500	Cu	300	12	Bonding wire, contacts, integrated circuits
Pd	230	PGM	33	14	Multilayer capacitors, connectors
Pt	210	PGM	13	6	Hard disk, thermocouple, fuel cell
Ru	32	PGM	27	84	Hard disk, plasma displays
Cu	15,000,000		4,500,000	30	Cable, wire, connector
Sn	275,000		90,000	33	Solders
Sb	130,000		65,000	50	Flame retardant, CRT glass
Co	58,000	Ni, Cu	11,000	19	Rechargeable batteries
Bi	5600	Pb, W, Zn	900	16	Solders, capacitor, heat sink
Se	1400	Cu	240	17	Electro-optic, copier, solar cell
In	480	Zn, Pb	380	79	LCD glass, solder, semiconductor
Total			4,670,000		

Vaikka tilastoperäisesti katsoen kierrätysteollisuuden tulevaisuus näyttää pitkällä tähtäimellä valoisalta, on käytännön kierrätysliiketoiminnan hankaloittajana pitkälti ihminen itse: ylikansallinen sopiminen, keskinäisten riippuvuussuhteiden luominen ja läpinäkyvään, tieteelliseen tietoon perustuvaan lainsäädäntöön panostaminen yhdessä keskinäisen luottamuksen rakentamisen kanssa ovat tarvittavia askeleita kohti tasa-arvoista kierrättämisen pelikenttää (Reuter, 2005). Riittävä sanktiointi, ekologisesti ja taloudellisesti kannustava lainsäädäntö ja valvotuneisuuden lisääminen kuluttajien parissa lisäävät luontaisesti markkinaehtoisia pyrkimyksiä kohti taloudellisesti kestävästä kierrätysliiketoimintaa.

3.2 Kierrätys resurssiviisaammassa tulevaisuudessa

Kierrättäminen, kiertotalous ja laajemmin resurssien suhteen niukka elintapa nähdään keinoina ihmiskuntaa ja maapalloa uhkaavien ongelmien ratkaisemiseksi. Epäilemättä kierrättämisellä on oma roolinsa, kun väestönkasvu ja keskiluokan suhteellisen osuuden kasvu maapallon väestöstä asettavat ennennäkemättömiä vaatimuksia maapallon ekosysteemille ja resurssien riittävyydelle. On kuitenkin tarpeen tunnustaa eräitä rajoitteita kierrättämisen suhteen – etenkin silloin, kun kierrättäminen nähdään keinona pitää kiinni nykyisestä

elintasosta ja –tavasta, ilman kulutustapojen muutosta. Seuraavassa esitellään eräitä kierrätykseen liittyviä, ratkaisua kaipaavia teemoja matkalla resurssiviisaampaan tulevaisuuteen.

Romun muodossa metallit pitävät sisällään sen energiapotentiaalin, joka niihin primääri valmistusvaiheessa on sitoutunut: malmin louhinta, kuljetus, metalliksi jalostaminen. Muutostyö romumetallista takaisin teollisuuden raaka-aineeksi vaatii verrattain vähän energianlisäystä: karkeasti ottaen vain keräyksen ja käyttöarvon palauttamisen (prosessoinnin) verran. Kierrättäminen on kuitenkin toimintaa, jossa syntyy aina energia- ja ainehäviöitä luonnonlakien mukaisesti. Näin ollen kaikkea metallia ei voi aina saada talteen parhaissa prosesseissa, toisaalta arvonalaskua voi syntyä myös sitä kautta, että romua ei pystytä – ainakaan kaupallisesti kestäväällä tavalla – enää palauttamaan entiseen käyttöarvoonsa. Tällaisissa tapauksissa puhutaan esimerkiksi korkealle jalostettujen ja vaativissa sovellutuksissa käytettyjen muovien päätyemisestä funktionaalisesti alemmalle tasolle – käytännössä siis vaikkapa palonkestävistä muovipuskureista kukkakepeiksi tai jääkaappimagneeteiksi. Tämän ilmiön johdosta esimerkiksi metallien kohdalla on todettu, että kaikkein vaativimmissa sovellutuksissa tarvittavien puhtaiden teräslaatuojen saatavuuden turvaamiseksi tulee kierrätysmateriaalien esikäsittelyvaiheeseen tulevaisuudessa panostaa enemmän, sillä pysyvästi metalliin sekoittuvien epäpuhtauksien kertyessä metallien joukkoon, tippuvat kierrätysperäiset teräkset vääjäämättä laatuasteikolla alaspäin jokaisella kierrätyskierröksellä – ellei laatua varmisteta seostamalla mukaan puhtaampaa terästä. (Reuter, 2005) (Houpert, 1996)

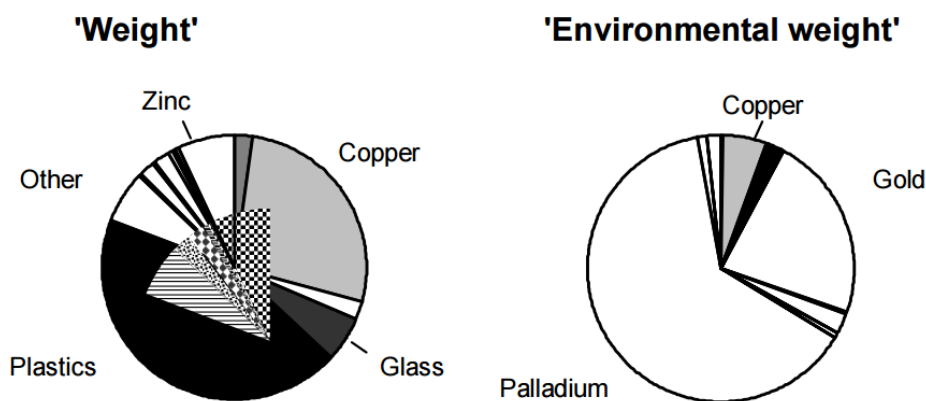
Laadun heikkenemisen lisäksi rajoitteena on, ainakin toistaiseksi, nähtävä ongelmat talteenotossa. Vaikka kierrätysprosessien saantoja kehitettäisiin korkeammiksi, ratkaisee kierrättämisen onnistumisen kokonaisuutena tarkastellen aina talteenoton tehokkuus. Jo aiemmin esitetty arvio keräämättä jäävän sähkö- ja elektroniikkaromun osuudesta Euroopassa (yli 50% suhteessa markkinoille tulevaan romuun) kuvaa ongelman konkreettisuutta, vaikka Eurooppa yleisesti nähdään asiassa edelläkävijänä (Eurostat, 2012).

Kuten työssä on aiemmin esitetty, on Euroopan Unioni kehittänyt tätä ongelmaa ratkaisemaan tuottajavastuomallin. Taloudelliset intressit pitävät huolen romun päätymisestä kierrätysprosessiin tiettyyn rajaan asti, mutta mikäli sähkö- ja elektroniikkaromun talteenotosta halutaan tehdä yhtä itsestään selvää kuin vaikkapa radioaktiivisen jätteen kohdalla, on edessä vuosien ja vuosikymmenien valistus-, tiedotus- ja lainsäädäntötyö.

Osaltaan tätä tavoitetta ajaa EU:ssa eteenpäin sähkö- ja elektroniikkaromujätteen luokittelu vaaralliseksi jätteeksi.

Lainsäädännölliset erot muodostavat omat ongelmansa sujuvan talteenoton järjestämiseksi. Vaikka Euroopan Unionissa on säädetty asiasta direktiivillä, eroavat jäsenmaiden tulkinnat niin paljon, että käytännössä tulkintaerojen takia kansallisesti säädettyt lait eri maissa tekevät sähkö- ja elektroniikkaromuvirtojen hallinnoimisesta tarpeettoman työlästä ja alueittain eroavaa. Tämä hankaloittaa entisestään tuottajille asetetun talteenottovaatimuksen tehokasta täyttämistä (Huisman, 2006).

Sähkö- ja elektroniikkaromun kierrättämisen ekologiset vaikutukset ovat kiistattomat. Käytännössä ekologinen vaikutus syntyy tuottamatta jääneen primäärialkuaineen tuottamatta jättämisestä. Kuva 9 vertailee tästä näkökulmasta matkapuhelimen sisältämän alkuainesisällön jakautumista massaosuuden ja ympäristöjalanjäljen mukaan. Kun asiaa tarkastelee tällä tasolla, muovien kierrättämisen mielekkyys vähenee ja jalometallien merkitys ylikorostuu. Tämänkaltaisen ”ympäristörealistinen”, luonnontieteelliset faktat riittävällä syvyydellä huomioiva näkökulma on olennaisessa osassa tehokasta ja asiantuntevaa lainsäädäntötyötä – seikka, jonka ei voi sanoa toteutuneen kaikilta osin EU:n WEEE-direktiivin valmistelutyössä. (Huisman, 2006)



Kuva 9. Matkapuhelimen sisältämät materiaalit, massaosuuden ja toisaalta ympäristöjalanjäljen mukaan jaoteltuna. Vasemmassa kaaviossa massaosuudet, suurimpina sinkki, kupari, lasi ja muovit. Vastaavasti ympäristövaikutusten mukaan jaoteltuna painuvat viime mainitut materiaalit hyvin merkityksettömiksi; tilalle nousevat jalometallit, kuten kulta ja palladium etenkin. (Huisman, 2006)

Vaikka haasteita matkalla resurssitehokkaaseen tulevaisuuteen riittää, on nyky-yhteiskunnalla käytettävissään kuitenkin ennennäkemättömät resurssit ongelmien ratkaisemiseksi: internetin myötä tosiasiallisesti mitättömät välimatkat ihmisten ja kansojen välillä, alati kasvava koulutettu väestönosa, kaikkien saatavilla oleva ihmiskunnan tietopääoma ja yleinen resurssiongelmiin tunnistetuksi tuleminen ovat kaikki ratkaisuihin ajavia tekijöitä tämän globaalin haasteen edessä.

4 Sähkö- ja elektroniikkaromun kierrättämisen teknologia

Sähkö- ja elektroniikkaromun käsittelyssä on kyse laadun, kustannusten ja lopputuotteesta saatavan hinnan tasapainosta: käsinlajittelun, murskauksen ja jatkokäsittelyn kombinaatio on elektroniikkalaittekohtainen kompromissi, jonka parametrit elävät materiaalien maailmanmarkkinahintojen mukana. Käsittelymenetelmien vaikuttimena on myös lainsäädäntö: esimerkiksi kuvaputkelliset televisiot on prosessoitava omassa suljetussa kierrossaan, jota koskevat paljon tiukemmat ympäristömääräykset kuin vähemmän vaaralliseksi luokiteltua romua. (UNEP, 2013)

Seuraavassa käydään läpi karkealla tasolla sähkö- ja elektroniikkaromun esikäsittely- ja prosessointipolkua. Mekaanisesta esikäsittelyvaiheesta esitellään olennaisimpia yksikköprosesseja, sillä ne ovat lähinnä tämän diplomityön aihepiiriä. Jatkokäsittelymenetelmät esitellään periaatteellisella tasolla.

4.1 Mekaaniset esikäsittely- ja erottelumenetelmät

Mekaanisiin esikäsittely- ja erottelumenetelmiin luetaan karkeasti ottaen sellaiset mekaaniset prosessivaiheet, joiden tavoite on joko tuottaa suoraan myyntikelpoisia raaka-aineita tai valmistella romua jatkokäsittelyä (pyro- tai hydrometallurginen, sähkökemiallinen) varten. Mekaanisen esikäsittelyn tavoite on tuottaa mahdollisimman pienillä operointikustannuksilla mahdollisimman puhtaita jakeita.

4.1.1 Vastaanotto ja materiaalituntemus

Sähkö- ja elektroniikkaromun monimuotoisuus edellyttää kierrätystoimijalta hyvää materiaalituntemusta ja kykyä suunnitella kierrätysreitit tehokkaalla tavalla, luonnollisesti mahdollisimman alhaiseen hävikkiin ja suureen saantoon pyrkien. Lajittelu alkaa tyypillisesti jo kuluttajan päässä, kun hajonnut sähkölaite löytää tiensä sekajätteen sijasta kierrätyspisteeseen. Tehokas, tuoteominaisuudet tunteva lajitteluprosessi ja sitä kautta mahdollistuva romutyypeillä seostaminen (esimerkiksi sinkkipitoisen romun seostaminen tiettyjä teräslaatuja tavoiteltaessa) on älykästä prosessisuunnittelua ja keskeisessä roolissa prosessin tehokkuutta ajatellen. Hyvän materiaalituntemuksen avulla vältytään materiaalien

päätymiseltä sellaisille kierrätysreiteille, missä arvokkaat alkuaineet menetetään – kuten kullan päätyessä kierrätysteräksen joukkoon.

4.1.2 Käsinalajittelu ja purku

Käsinalajittelussa sähkö- ja elektroniikkaromulle tehdään aistinvaraista lajittelua ennalta määrättyjen ehtojen perusteella. Tyypillisessä tapauksessa työntekijät käsittelevät ennalta lajiteltua romujaetta purkaen sitä pienempiin osiin, erotellen mm. piirikortteja, akkuja tai tehden muita toimenpiteitä jotka parantavat myöhempien prosessivaiheiden tehokkuutta. Kuvassa 10 nähdään tyypillinen käsinalpurkajan työasema, paikkana Kuusakosken Heinolan tuotantolaitos.



Kuva 10. Käsinalpurkajan työasema: valikoima sopivia käsityökaluja, akkuväännin kärkisarjoineen ja työaseman ympärillä keräysastioita purussa syntyville jakeille.

Toistaiseksi käsinalajittelua tarvitaan kaikkein moderneimpienkin kierrätyslaitosten tuotantolinjojen alkupäässä suorittamaan sellaisia tehtäviä, mihin ei ole vielä olemassa teknologiaa tai jotka ihminen tekee konetta tehokkaammin.

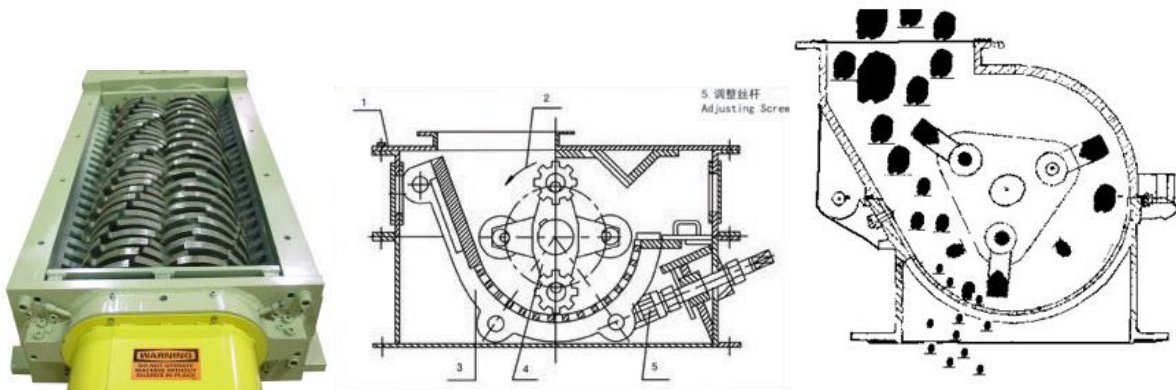
Hyvä manuaalinen purku on tehokkuuden kannalta olennainen osa hyvin toimivaa kierrätysprosessia. Niin kauan kuin mekaaninen prosessointi tai muut menetelmät, kuten robotiikka, ei kykene riittävän laadukkaaseen purkutyöhön, puolustaa ihmisen tekemä käsinalajittelu ja purku paikkaansa.

4.1.3 Murskaus

Murskaamalla esikäsitelty materiaali, saadaan kierrätysmateriaalin kokoa pienennettyä, komponentteja eroteltua ja materiaaliyhdistelmiä rikottua. Murskaus ja hienontaminen tuottavat puhtaampia jakeita myöhemmissä prosessivaiheissa ja nopeuttavat lopun prosessoinnin läpimenoaikaa. Murskeeksi muutettuna kierrätysmateriaalin suhteellinen tiheys kasvaa, jolloin myös logistiikka tehostuu. (Reuter, 2005)

Murskaus on energiainvestointi romuun, jolloin murskeesta on vastineeksi saatava jatkoprosessoinnissa parempi saanto. Murskainten energiankulutus, murskauskoneet ja prosessoitavan jakeen erityisominaisuudet määräävät valittavan murskaintyyppin.

Kuvan 11 kolme murskaintyyppiä (veitsimurskain, rengasmurskain ja vasaramurskain) ovat kaikki sähkö- ja elektroniikkaromun kierrättämisessä hyödynnettyjä murskaintyyppejä. Veitsimurskain eroaa kahdesta seuraavasta murskaimesta murskauskoneensa vuoksi: murskaimella pyritään leikkaavan murskaukseen, joka tuottaa vähemmän pölyä. Rengasmurskain ja vasaramurskain puolestaan perustuvat iskevään ja hirtävään voimaan. Murskauskoneita on käsitelty tarkemmin kappaleessa 7.5.2.



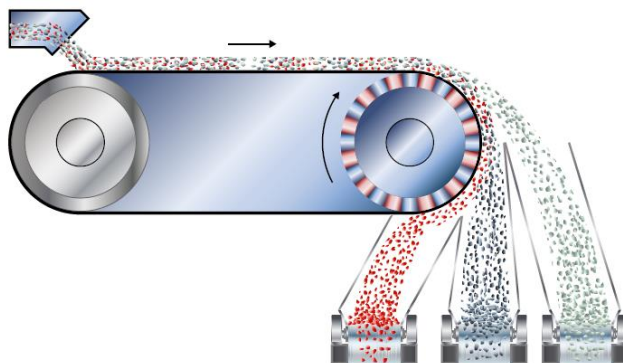
Kuva 11. Murskaintyyppit vasemmalta oikealle: veitsimurskain, rengasmurskain ja vasaramurskain. (Jordan Reduction Solutions 2016, Yifan 2016, ZY Machinery Co 2016)

4.1.4 Magnetismiin perustuva erottelu

Ferromagneettiset aineet voidaan poistaa murskeesta vahvatehoisella magneetilla. Magneetti on tehokas tapa erottaa ferromagneettiset kappaleet. Magneettisen erottelun tehokkuutta kuitenkin alentavat kappaleet, jotka tarttuvat magneettiin ja joihin on sulkeutuneena murskaustapahtuman tai tuotesuunnittelun seurauksena muitakin materiaaleja kuin kohteena

olevia ferromagneettisia aineita. (Reuter, 2005) Esimerkiksi kupari, joutuessaan edellä mainitulla tavalla osaksi teräs- tai rautaromujaetta, huonontaa jakeen laatua ja näin sen myyntiarvoa. (UNEP, 2013) Kappaleessa 7.5.2. esitellään tarkemmin kuvatun kaltaisia ongelmallisia partikkeleita.

Myös pyörrevirtaerottimen toiminta perustuu magnetismiin. Pyörrevirtaerottimen toimintaperiaatteena ovat kuljettimen alle sijoitetut magneetit, jolloin napaisuuden tiheästi vaihtuessa indusoituu kuljettimella kulkeviin kappaleisiin pyörrevirtoja (eddy current). Syntynyt hylkimisvoima riittää muuttamaan kappaleen lentoreittiä siten, että yksinkertaisen jakajalevyn avulla voidaan vaihtuvanapaiseen magneettiin reagoinut materiaalivirta erottaa omaksi jakeekseen. Tällä tavoin voidaan tehokkaasti erottaa yhdestä jakeesta ferromagneettinen, ei-magneettinen ja pyörrevirtoihin reagoiva metalli, kuten alumiini tai magnesium. Laitteen toimintaa hienosäädetään mm. kontrolloimalla erottimen pyörimisnopeutta ja kappaleiden lentoradan perusteella säädettävien ohjurilevyjen kulmaa muuttamalla. Kuvassa 12 on esitetty pyörrevirtaerottimen havainnekuva. (Worrell, 2014)



Kuva 12. Pyörrevirtaerottimen toiminta. Oikeanpuoleisen kuljetinpyörän sisällä magneetit, jotka aiheuttavat pyörrevirtoja magneettirummun yli kulkeviin kappaleisiin ja poikkeuttavat jakeen erikseen. Omiin jakeisiinsa päätyvät ferromagneettinen ja magneetteihin reagoimaton jae. (Worrell, 2014)

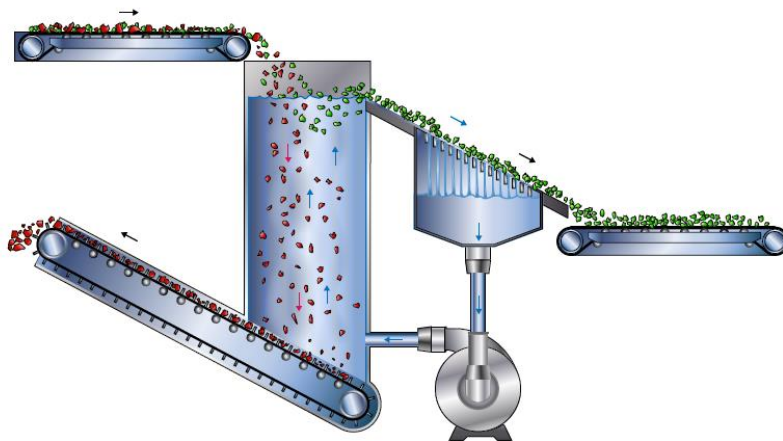
4.1.5 Painovoimaan perustuva erottelu

Painovoimaisen erottelun toiminta perustuu alkuaineiden erilaisiin ominaispainoihin. Tyypillisesti painovoimaisella erottelulla erotetaan metallit kevyemmistä aineista (kuten

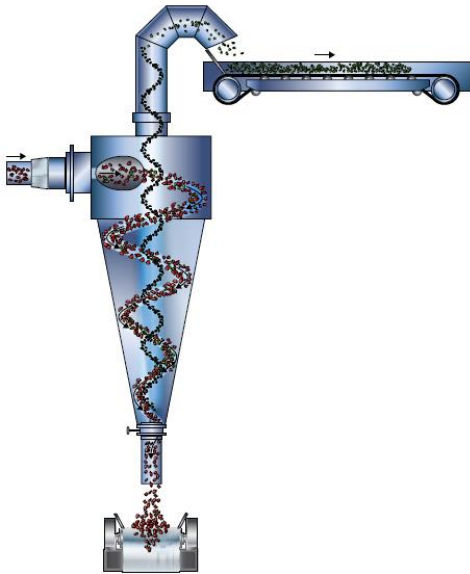
puusta, muovista tai paperista). Näin metallipitoisesta jakeesta saadaan puhtaampi esimerkiksi seulontaa ajatellen.

Kappaleita voidaan erotella painon mukaan esimerkiksi hydrosyklonissa ja vastavirtaerottimessa. Periaatteena näissä on kappaleiden asettaminen sellaisiin virtausympäristöihin, joissa tietyn rajapainon alittavat kappaleet kulkeutuvat omaa reittiään ja rajapainoa raskaammat painuvat alas omaa reittiään. Näitä menetelmiä havainnollistavat kuvat 13 ja 14.

Myös upotus-kellutusmenetelmällä (sink&float) voidaan erotella aineita ominaispainojen mukaan. Esimerkiksi Kuusakosken Heinolan tehtailla on käytössä tällainen prosessi, joka perustuu ferropiiniin ja magnetiitin käyttämiseen väliaineena. Näin kevyet ja raskaat metallit voidaan erotella toisistaan.



Kuva 13. Vastavirtaerotin, väliaineena vesi. Pystysuuntainen veden virtaus nostaa kevyet kappaleet veden pinnalle ja edelleen ulos säiliöstä; raskaammat kappaleet vajoavat alas. (Worrell, 2014)



Kuva 14. Hydrosykloni, väliaineena vesi. Raskaammat kappaleet painuvat alas, kevyemmät kulkeutuvat virtauksen mukana ylös. (Worrell, 2014)

4.1.6 Sensoripohjainen erottelu

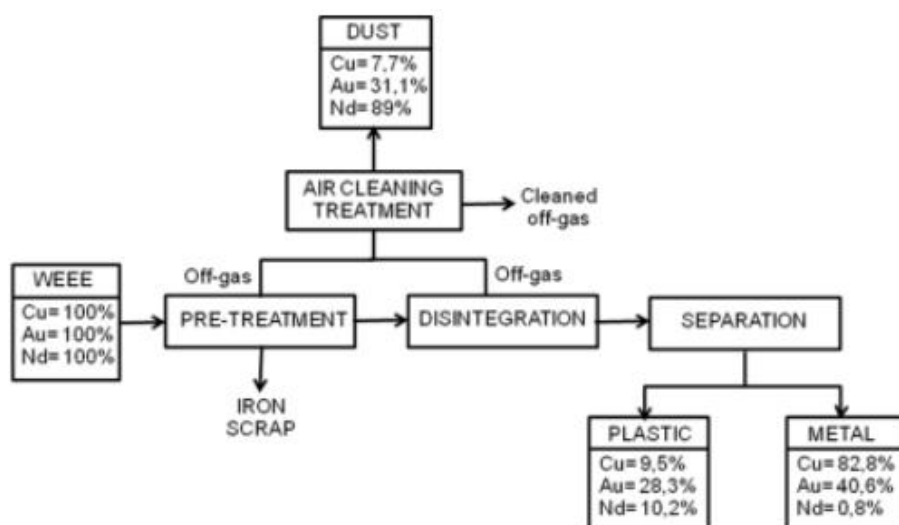
Sensoripohjaisella erottelulla tarkoitetaan teknologioita, joiden avulla kappaleet voidaan tunnistaa kontaktivapaasti. Eri teknologiat perustuvat sähkömagneettisen säteilyn eri aallonpituuksien hyödyntämiseen. Menetelmiä ovat esimerkiksi NIR-menetelmään (near-infrared light, lähi-infrapuna-aallonpituudella oleva valo) tai XRF-analyysiin (x-ray fluorescence, röntgenfluoresenssi). (Eskonniemi, 2015)

NIR-menetelmä perustuu materiaalien tunnistukseen lähi-infrapuna-alueella olevan valon avulla. Materiaalikohtaiset spektrit takaisinheijastuvasta valosta kertovat tarkasti, mistä alkuaineesta on kyse. Käytännössä konenäkölaite on yhdistetty erotuslaitteeseen ja kuljettimeen, jota pitkin eroteltava materiaali kulkee. Varsinainen erotustapahtuma toteutetaan laitteesta riippuen esimerkiksi paineilmasuihkulla tai kuljettimelta poimimalla, esimerkiksi robottikäden avulla. XRF-menetelmän, eli röntgenfluoresenssin toimintaperiaate on muutoin samankaltainen, mutta tunnistuksessa käytetään röntgensäteitä ja aineesta takaisin heijastuvan spektrin muodostumistapa sekä sen tulkinta eroavat teknisesti NIR:stä (Tsuchiya, 2013) (Kalnicky, 2001). Muu XRF-menetelmään liittyvä erottelulaitteisto noudattelee samaa periaatetta kuin NIR:n kohdalla.

4.1.7 Pölynpoisto

Pölynpoistossa käytetään hieman prosessilinjasta riippuen erilaisia sykloneita, vastavirtaerottimia ja imurijärjestelmiä. Esimerkiksi Kuusakosken Heinolan tuotantolaitoksella rengasmurskainprosessin pölynpoistosta huolehtii useampi sykloni sekä pussisuodatinjärjestelmä. Heinolan prosessilinja esitellään tarkemmin kappaleessa 7.1.

Sähkö- ja elektroniikkaromun murskauksessa syntyvät pölyt pitävät sisällään yleensä suhteellisesti eniten hauraimmista osista peräisin olevia materiaaleja. Näin ollen esimerkiksi piirikortit ja niiden sisältämät metallit ovat pölyissä usein yliedustettuina. Chancerelin (2009) tutkimuksessa tutkittiin piirikorttimurskeen metallipitoisuuksia ja todettiin palladiumia katoavan pölyn muodossa murskauksen yhteydessä, verrattuna alkuperäisen syötemateriaalin sisältämään palladiumin määrään. Marran (2015) tutkimus paneutui pölyihin tarkasti ja siinä todettiin sähkö- ja elektroniikkaromun sisältämien jalometallien ja harvinaisten maametallien päätyvän suurimmaksi osaksi pölyjen ja muovijakeen sekaan – ja siten hukkaan, väärän prosessointireitin takia. Marran tutkimuksen olennaiset havainnot on esitelty kuvassa 15. Kuvan 10 prosessiaskaaleet: murskaus ja magneettierottelu (pre-treatment), muovien erottelu (disintegration), seulonta, vesipöytä ja elektrostaattinen erottelu (separation). Kullan ja neodyymin saannon voidaan nähdä olevan heikko, sillä ne päätyvät sellaisiin jakeisiin, joista ne eivät tule talteenotetuiksi. Oguchin (2012) tutkimus puolestaan tutki elektroniikkaromun murskausta ja materiaalien jakautumista koon mukaan. Oguchin tutkimus totesi pölyjen sisältävän merkittävän määrän harvinaisia maametalleja sekä elohopeaa.



Kuva 15. Kuparin, kullan ja neodyymin jakautuminen kierrätysprosessissa. (Marra, 2015)

4.1.8 Seulonta

Tarvittaessa kierrätysprosessin osana voidaan käyttää seuloja prosessin tehostamiseksi tai halutunkokoisen jakeen aikaansaamiseksi muusta syystä. Esimerkiksi murskauksen jälkeen voidaan seuloa ylikokoiset kappaleet pois ja ohjata uudelleen murskattavaksi. Seuloja voidaan käyttää myös prosessioptimoinnin välineenä: tietoa murskatun materiaalin jakautumisesta kokoluokkiin voidaan käyttää apuna suunnittelussa. Edelleen tästä johtuen materiaalien alkuainejakaumat kokoluokittain ovat hyödyllistä tietoa, usein suoraan kaupallisesti hyödyntämiskelpoista.

Seulonnan merkityksen havainnollistaa hyvin Oguchin (2012) tutkimus. Tutkimuksessa murskattiin 12,6 tonnia elektroniikkaromua ja seulottiin murske yli ja alle 30 mm kokoluokkiin. Näille kokoluokille tehtiin alkuaineanalyysit ja verrattiin alkuainepitoisuuksia syötemateriaalin pitoisuuksiin. Oguchin koetuloksissa yli 30 mm kokoluokkaan päätyi ylikorostuneesti rauta, kupari ja alumiini. Karkeasti ottaen kaikki muut metallit päätyivät vähintään 70 % osuudella alle 30 mm jakeeseen. Tämän diplomityön koeajoissa seulonta suoritettiin kolmelle massaosuudeltaan merkittävälle jakeelle yli ja alle 15 mm kokoluokkiin. Analyysit osoittivat, että tässä koeajossa arvometallit (Ag, Cu) rikastuivatkin alle 15 mm kokoluokkaan. Alumiinin osalta ei voida sanoa merkittävää eroa syntyneen. Tuloksia käsitellään tarkemmin luvussa 7.5.1.

4.2 Jatkokäsittely

Sähkö- ja elektroniikkaromun mekaanisen käsittelyn ja erottelun tuloksena syntyy metallipitoisuuksiltaan vaihtelevia jakeita, joiden käyttömahdollisuudet ilman jatkokäsittelyä ovat yleensä vähäiset. Metalliteollisuuden raaka-aineeksi ne puolestaan sopivat, tullakseen jalostetuiksi puhtaiksi alkuaineiksi tai seostukseltaan sopiviksi myyntituotteiksi.

Pyrometallurgisen jatkokäsittelyn tavoitteena teräksen kohdalla on tuottaa suoraan myyntiin kelpaavia teräslaatuja. Tyypillisessä tapauksessa teräsromu sulatetaan valokaariuunissa ja seostetaan vastaamaan asiakkaan haluamaa teräslaatua. Vaihtoehtoisesti teräsromu voi päätyä primääriteräksen valmistusprosessin osaksi, missä kierrätysterästä lisätään teräksen valmistuksen loppuvaiheessa konvertteriin. (UNEP, 2013)

Kuparin kohdalla voidaan pyrometallurgisesti tuottaa joko suoraan eteenpäin myytävää kuparia, mikäli romu on ollut kyllin puhdasta – muutoin kuparilopputuote jatkaa pyrometallurgisen prosessin jälkeen sähkökemialliseen raffinointiin puhtaan kuparin tuottamiseksi. (Davenport, 2002)

Hydrometallurgisen jatkokäsittelyn tavoitteena puolestaan on hyödyntää kaikissa prosessivaiheissa syntyviä metallipitoisuudeltaan köyhiä jakeita, joiden käsittely hydrometallurgisesti on usein kannattavaa hydrometallurgisten menetelmien alhaisten kustannusten vuoksi. Esimerkiksi kuparinsulatuksen kuonia tai eri prosessivaiheissa syntyviä pölyjä voidaan käsitellä hydrometallurgisesti. (Chen, 2012)

5 Näytteenoton teoriaa

Tämän diplomityön kokeellinen osio sisältää näytteenottoa kierrätysprosessin tutkimisen osana. Oikein suoritettu näytteenotto on olennaisen tärkeä osa onnistunutta tutkimusprojektia, kun onnistumisen yhtenä kriteerinä on tulosten luotettavuus ja toisaalta kokeen toistettavuus.

Näytteenottoteorian kehittäjä Pierre Gy laati elämäntyönään kattavan joukon näytteenoton periaatteita kaivosteollisuuden käyttöön. Nämä periaatteet muodostavat yhdessä kokonaisuuden, josta käytetään nimeä Gy'n näytteenottoteoria (Gy's sampling theory) (Gy, 2012).

Gy'n näytteenoton periaatteet tarkoittavat käytännössä joukkoa matemaattisia malleja, jotka käsittelevät mm. näytteen edustavuuden arviointia, virheen suuruuden laskentaa sekä eri näytteenottomenetelmien luotettavuuden vertailua. Kahmaisunäytteenoton (grab sampling) epäluotettavuuden, siis tutkimuksellisesti katsoen ”käyttökelvottomuuden” osoittaminen on konkreettinen esimerkki Gy'n teorioiden urauurtavuudesta (Gy, 2012).

Tämän tutkimuksen kannalta olennaisimpia kohtia Gy'n näytteenottoteoriassa ovat luotettavaan näytteenottotapaan liittyvät ohjeistukset. Näistä ohjeistuksista käytetään yleisesti nimitystä ”hyvä näytteenottotapa”. Hyvällä näytteenottotavalla tarkoitetaan kaikkia sellaisia käytännön valintoja näytteenotossa, jotka ottavat huomioon virheen syntymisen mahdollisuudet ja pyrkivät minimoimaan ne. Käytännössä tämä tarkoittaa mm. näytteenottokertojen riittävää määrää jaettuna tasaisesti koko tutkittavalle ajalle, oikeanlaisen näytteenottovälineen käyttämistä sekä riittävän suurta näytemassaa. (Oja, 2013)

Hyvän näytteenottotavan periaatteita on sovellettu tämän tutkimuksen teossa, sikäli kuin ne kierrätysmateriaaleihin ovat rinnastettavissa. Gy'n periaatteet on laadittu ajatellen kaivoksesta louhittavia malmeja sekä muita yhtä homogeenisia partikkelijoukkoja. Kierrätysmateriaalit ovat huomattavasti kompleksisempi partikkelityyppi, joten esimerkiksi Gy'n laatimia partikkelien alkuainepitoisuuksia koskevia malleja ei voida luotettavasti suoraan soveltaa kierrätysmateriaalien näytteenotossa. Sen sijaan näytteenottotapaan liittyvät lainalaisuudet ovat pääsääntöisesti yleispäteviä ja siten siis sovellettavissa myös tässä tutkimuksessa. Tässä tutkimuksessa suoritettu näytteenotto on selostettu tarkemmin kokeellisessa osiossa, kappaleessa 7.3.1.

5.1 Hyvä näytteenottotapa

Hyvällä näytteenottotavalla tarkoitetaan joukkoa sellaisia näytteenoton periaatteita, missä näytettä otetaan kulloinkin tutkittavana olevasta kohteesta tilastollisesti mahdollisimman tasaisella edustuksella niin, että näytteenottotavalla ei tuoteta virheellistä otosta massavirrasta, vaan pyritään poimimaan massavirran sisältämä vaihtelu, luomatta vaihtelua itse. Kyse on siis tilastollisista periaatteista: että jokaisella partikkelilla olisi ainakin teoriassa samansuuruinen todennäköisyys joutua näytteeseen. Käytännössä hyvällä näytteenottotavalla tarkoitetaan riittävän suuren näytteen ottamista, aina yhtä suuri määrä kerrallaan, tasaisesti virran kestoajan yli jakautuen. Hyvän näytteenottotavan periaate sisältää joukon alakohtia, joiden yhteinen nimittäjä on virheiden välttäminen ja mahdollisimman todenmukainen kuva koko näytevirrasta – ilman, että koko massavirtaa tarvitsee tutkia. Täydellinen näyte olisi siis koko massavirta, mutta käytännön syistä pyritään hyvällä näytteenottotavalla saamaan virrasta mahdollisimman tarkasti todellisuutta kuvaava iteraatio. (Worrell, 2014)

5.2 Näytteenoton virheistä

Näytteenoton virheet voidaan jakaa luonteensa perusteella kahteen päätyyppiin: satunnaisiin ja systemaattisiin virheisiin. Satunnaisen virheen suuruus lähestyy ajan yli nollaa, kun taas systemaattinen virhe pysyy samana. Tätä seikkaa havainnollistaa esimerkiksi ajatus huonosti toimivasta näytteenottimesta, joka kategorisesti jättää poimimatta materiaalivirrasta tietyn kokoisia partikkeleita; tällainen virhe on systemaattinen. Ideaalinäytteenotin luonnollisesti ottaa kaikkia partikkeleita satunnaisesti yhtä suurella poimintatodennäköisyydellä. (Soikkeli, 2008)

Näytteenoton kokonaisvirhe muodostuu kaikista niistä virhettä aiheuttavista osatekijöistä, jotka ovat osana näytteenottoprosessia. Se kattaa virheet aina näytteenottoaikan valinnasta näytteen käsittelyyn liittyviin virheisiin. (Soikkeli, 2008) Tämän diplomityön kohdalla määräävimmit virheet syntyivät näytteenottovaiheessa, kuten myöhemmin tarkemmin käy ilmi. Näytteiden käsittelyvaiheen virheet olivat suuruudeltaan vähäisiä tai olemattomia näytteenottovaiheen virheisiin verrattuna.

6 Kierrättämisen mallintaminen

Kierrätysprosessien mallintaminen tietokoneella on toistaiseksi tarkoittanut yksinkertaistettua elinkaarilaskentaa, joka ei huomioi kierrättämisen fysikaalisia nyansseja ja monimuotoisuutta. Nyansseilla tarkoitetaan tässä esimerkiksi ei-toivottuja materiaaliyhdistelmiä ja niiden käyttäytymistä kierrätysprosessissa (UNEP 2013, Castro 2004). Nykyiset mallit ovat karkeita ylätasoin materiaalivirtoja ilman teknistä syvyyttä. Aidosti holistisen ja perusteiltaan luotettavan kierrätyksen mallintamisen pohjana on tuotelähtöinen kierrätyksen mallintaminen (product-centric simulation-based recycling). Tuotelähtöisen kierrättämisen mallintamisen edellytyksiä on tutkittu pitkään (mm. Reuter & van Schaik: 2002, 2007, 2010, 2012, 2015, 2015 ja Pehlken: 2009).

Tämän diplomityön kirjoitushetkellä tuotelähtöisen kierrättämisen mallinnuksen tuotteistaminen antaa vielä odottaa itseään. Mallintaminen, joka huomioi kierrätettävän tuotteen suunnittelun, murskauskäyttämisen ja sitä kautta syntyvän kierrätysmateriaalijakeen ominaisuudet, luo mahdollisuudet arvioida kierrätyksen tehokkuutta ja materiaalivirtoja entistä tarkemmin (Reuter, 2010). Tuotantoketjun alkupäässä kierrättämisen mallintaminen puolestaan antaa mahdollisuuksia esimerkiksi uutta elektroniikkatuotetta suunnittelevalle insinöörille selvittää vasta suunnitteluasteella olevan tuotteen kierrätysaste normaalin 3D-suunnittelun lomassa. Luonnollisesti myös kiertotalouden, resurssitehokkuuden ja toisaalta talouskasvuun liittyvän materiaali-intensiteetin kontekstissa luotettavammasta kierrätyksen mallintamisesta tulee olemaan suuresti hyötyä.

6.1 HSC Sim –ohjelmisto

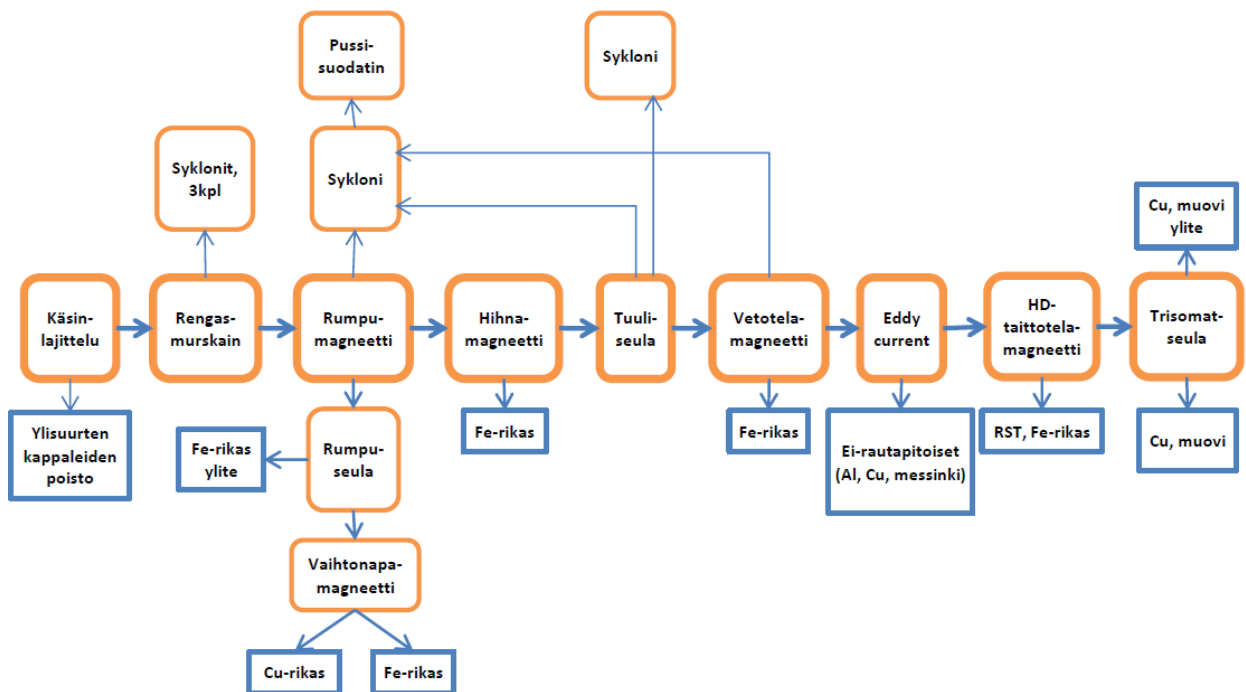
Todennäköinen ja varteenotettava alusta edellä esitetyn kierrätyksen tuotelähtöiselle mallinnukselle on Outotecin lisensoima HSC Chemistry –ohjelmisto, tarkemmin ottaen sen Sim-moduuli. Tuon moduulin avulla voidaan suunnitella metallurgisia prosesseja ja simuloida niiden toimintaa eri parametreilla. Ohjelmisto sisältää kattavat materiaalikirjastot ja laskentamallit kemiallisten reaktioiden ja prosessien mallintamiseksi. Kierrätyksen osalta ohjelmistossa voidaan mallintaa esimerkiksi partikkelitasolla erottelumenetelmiä. Ohjelmistoa on kehitetty pitkään ensin Outokumpu Oy:ssä, sittemmin Outotecissä. (Outotec, 2016)

7 Kokeellinen osio

7.1 Prosessointilinjan esittely

Tämän diplomityön kokeellisen osion murskauskoeajot suoritettiin Kuusakoski Oy:n Heinolan tuotantolaitoksella rengasmurskainprosessissa. Rengasmurskaimella murskataan tuotantokäytössä mm. sähkö- ja elektroniikkaromua.

Rengasmurskaimen tarkka prosessikaavio on esitelty liitteessä 1. Kuvassa 16 esitellään rengasmurskainlinjan olennaiset yksikköprosessit, lisälaitteet ja materiaalivirrat. Kuvassa päämateriaalivirta kulkee vasemmalta oikealle, ohuempien nuolten edustaessa pölyjä. Prosessilaitteet on kuvattu pyöreäreunaisilla oransseilla laatikoilla, prosessituotteet sinisillä nelikulmioilla. Seuraavassa esitellään sanallisesti prosessikaavio ja viitataan prosessilaitteista otettuihin valokuviin. Kuvan 16 laitteista hihnamagneetti oli tämän diplomityön koeajojen aikaan poissa tuotantokäytöstä.



Kuva 16. Rengasmurskainprosessin yksikköprosessit oransseissa laatikossa (keskimäinen linja), tärkeimmät materiaalivirrat sinisellä.

Rengasmurskainta syötetään kauhakuormaajalla syöttökaualosta (kuva 17), jota seuraa käsinlajittelupaikka. Käsinlajittelussa poimitaan ylisuuret metallikappaleet jatkoprosessoinnin onnistumisen varmistamiseksi. Käsinlajittelua seuraa rengasmurskain (kuva 18). Rengasmurskaimelta imetään murskaustapahtumassa syntyvät pölyt talteen ja ne ohjataan sykloneille (kuvat 19 ja 20).

Rumpumagneetin (kuva 21) jälkeen päälinjassa hihnamagneetti poimii rautapitoisia kappaleita hihnan yläpuolelta. Hihnamagneettia seuraa tuuliseula, jossa raskaammat kappaleet erotellaan kevyemmistä. Raskas jae jatkaa prosessin päälinjaa taittelamagneetille, kevyempien partikkelien ohjautuessa syklonierotukseen ja edelleen pussisuodattimiin. Taittelamagneetin tehtävänä on edelleen vähentää materiaalivirran rautapitoisuutta parantaen siten pyörrevirtaerottimen tehokkuutta (kuvassa 16 pyörrevirtaerottimen englanninkielinen nimi eddy current). Pyörrevirtaerotin (kuva 22) erottelee ei-rautapitoiset metallit omaksi jakeekseen. Tämän jälkeen prosessilinjassa on vuorossa vielä yksi voimakastehoinen magneettierotin (high density magnet, eli HD-magneetti, kuva 23), joka erottelee materiaalivirrasta ruostumattomat teräkset sekä luonnollisesti muutkin vielä virrassa jäljellä olevat ferromagneettiset kappaleet. HD-magneettia seuraa enää Trisomat-seula (kuva 24), joka on täristimellä varustettu seula jäljelle jäävän materiaalivirran jakamiseksi yli- ja alle 15mm kokoluokkiin. Nämä prosessiketjun viimeiset tuotteet ovat kupari- ja muovipitoista materiaalia.



Kuvat 17 ja 18. Vasemmalla materiaalin syöttö pyöräkuormaajalla prosessin alkupäästä, oikealla rengasmurskain.



Kuvat 19 ja 20. Rengasmurskaimen pölynpoistoputki (neliömäinen putki vasemmanpuoleisen kuvan keskivaiheilla). Putken oikeanpuoleisessa päässä pölynpoistolaitteet järjestyksessä: vihreä ja sininen sykloni, sekä sininen pussisuodatin.



Kuvat 21 ja 22. Vasemmalla rumpumagneetilta lähtevä rautapitoinen virta. Oikealla kuva pyörrevirtaerottimen kuljettimen päästä, missä näkyy myös ohuena vaaleana viivana erotuslevyn reuna.



Kuvat 23 ja 24. Vasemmalla HD-magneetin luona sijaitseva materiaalin ulostulopaikka näytteenottovälineineen. Oikealla kuvan yläreunassa oranssi Trisomat-seula, joka jakaa materiaalivirran yli ja alle 15mm kokoluokkiin.

7.1.1 Linjalla syntyvät tuotteet

Rengasmurskainprosessin erottelulaitteiden avulla saadaan tuotettua materiaalista riippuen monia tuoteryhmiä. Tärkeimmät tuoteryhmät ovat magneettiset raudat, Eddyn alumiini/ei-rautapitoinen jae, HD-magneetin ruostumaton teräs, Cu-langat sekä muovit. Jakeet eivät koskaan ole puhtaita: esimerkiksi magneettisen virran voisi olettaa sisältävän vain magneettiin tarttuvia materiaaleja. Käytännössä tämä on kuitenkin mahdotonta. Jakeiden epäpuhtauteen on syynä kierrätysmateriaalien erilaiset metallikappaleiden liitostavat ja kiinteät materiaaliyhdistelmät. Käytännössä murskauksen avulla ei koskaan voida täydellisesti irrottaa materiaaliyhdistelmiä toisistaan – asiaa on koeajomateriaalin avulla havainnollistettu kuvien kera kappaleessa 7.4.1.

Asiakastarpeesta riippuen rengasmurskainprosessin erottelema jae voi olla sellaisenaan myyntikelpoista, tai sitten sitä pitää jatkojalostaa paremman puhtausasteen saavuttamiseksi. Esimerkiksi kuparipitoisen romun ollessa kyseessä muovisisältö voi olla asiakkaan kannalta edullista: muovi voi toimia korkean energiasisältönsä takia kupariromun pyrometallurgisen jatkokäsittelyn kannalta hyödyllisenä polttoaineena.

7.2 Koejärjestelyt ja koemateriaali

7.2.1 Koemateriaali

Diplomityön koeajomateriaaliksi valittiin CRT-kuvaputkitelevisioista ja –monitoreista peräisin oleva piirikorttimateriaali (jäljempänä CRT-kortti). Samasta materiaalista on tehty diplomityö Kuusakoskelle aiemmin vuonna 2015 (Michael Saulny). Valitsemalla sama materiaali haluttiin luoda mahdollisuudet vertailulle Saulnyn tutkimuksen kohteena olleen leikkaavan murskaimen sekä tässä työssä käytetyn rengasmurskaimen välillä.

CRT-kortti on piirikortiksi suhteellisen vähäarvoinen, sisältäen vähemmän jalometalleja kuin esimerkiksi tietokoneista peräisin olevat emolevyt. CRT-kortit ovat rakenteeltaan yksinkertaisia: piirikortin perusmateriaalin (orgaanista ainetta, esimerkiksi paperi tai kangas lujitettuna hartsilla) lisäksi piirikortilta löytyy vain joukko peruskomponentteja (vastukset, kelat, kondensaattorit, liittimet), jonkin verran kullattuja liitinpintoja ja kuparijohtimia sekä luonnollisesti juotostinaa. Lähikuvat korttimateriaalista (kuvat 25 ja 26) paljastavat koemateriaalina käytetyn jakeen heterogeenisyyden. Tämä huomioiden, tutkimustuloksia ei voida pitää edustavuudeltaan täydellisenä kuvana CRT-kortin prosessoinnista, sillä jakeen mukana seurasi paljon mm. metallikehyksiä, muovikuoria sekä pitkiä sähköjohtoja.

Lähtötietona koemateriaalin koostumuksesta käytetään tässä tutkimuksessa Saulnyn (2015) koeajoissaan selvittämää murskatun CRT-piirikorttimateriaalin alkuainejakaumaa. Sekä Saulnyn että tämän tutkimuksen koemateriaalit kerättiin ajallisesti lähekkäin samojen lajitteluperusteiden mukaisesti, samalla materiaalinkäsittelypaikalla. Saulnyn tutkimuksen koejärjestelyt mahdollistivat murskeen lähettämisen murskauksen jälkeen analysoitavaksi – tässä koejärjestelyssä murskeen analysointiin ei ollut mahdollisuutta, sillä rengasmurskaimen jälkeen ei ole paikkaa, josta erottelemattoman näytteen voisi heti murskaustapahtuman jälkeen ottaa. Pölynpoistosta johtuen Saulnyn tutkimuksesta peräisin oleva näytemateriaalianalyysi ei luonnollisesti ole aivan täsmällinen kuva materiaalista, mutta Saulnyn tutkimuksessa murskauspölyjen määrän jäätyä prosentin kymmenyksiin suhteessa syötemassaan, todettiin analyysituloksen olevan käyttökelpoinen tämän tutkimuksen referenssinä.



Kuvat 25 ja 26. Koemateriaalin heterogeenisyys vaikuttaa koetulosten arviointiin – kuvissa koeajomateriaaliksi tarkoitettujen CRT-piirikorttien lisäksi mm. ylimääräisiä metallisia komponentteja, muovikuoria ja muualta kuin kuvaputkinäytöistä peräisin olevia piirikortteja.

7.2.2 Esivalmistelut

Ennen koeajoa prosessilinjasto ajettiin tyhjäksi muusta materiaalista ja kaikki keruuastiat tyhjennettiin. Koeajot tehtiin tuotantokäytössä olevalla laitteella, joten kaikkia tieteellisen tarkkuuden edellyttämiä esivalmisteluita ei voitu käytännön syistä suorittaa. Esimerkiksi pölynpuhdistuslaitteiden suodattimien vaihto tulisi suorittaa ja joka puolella linjastoa kiertävät pöly- ja roskavallit tulisi poistaa, mikäli tutkimuksen virhelähteitä haluttaisiin pienentää.

Näytteenottovälineinä käytettiin laatikoita sekä reilun kuutiometrin vetoisia muovisia pressusäkkejä, ns. bigbageja kokoomanäytteen muodostamiseksi (kuva 27). Näitä varusteita täydennettiin metallipakeilla materiaalivirran kokonaismassan määrittämiseksi. Paikan päällä rakennetulla näytekeräimellä (kuva 28) saatiin leveämmästäkin näytevirrasta olosuhteisiin nähden hyvä näyte.



Kuvat 27 ja 28. Vasemmalla näytteenottovälineet Trisomat-seulan luona. Oikealla näytteenotossa käytetty keruuväline kohteisiin, joissa muuttolaatikon leveys ei riittänyt koko materiaalivirran keräämiseen.

Näytteenoton valmisteluihin kuului myös näytteenottosuunnitelman teko (liite 2). Näytteenoton suunnittelulla pyritään varmistamaan etukäteen se, että näytettä tullaan saamaan koeajoissa riittävästi: näin vältetään tarve miettimiselle ja suunnittelulle koeajojen aikana, kun voidaan tukeutua valmiiseen näytteenotto-ohjelmaan.

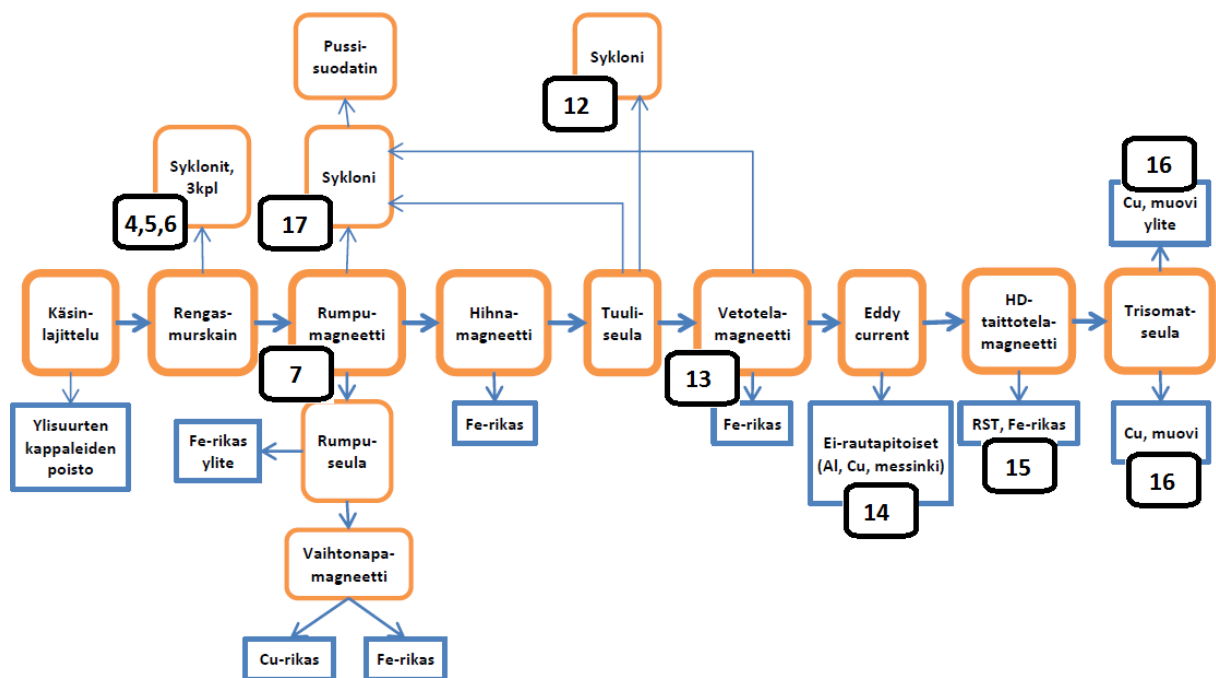
7.3 Näytteenotto

Näytteenottosuunnitelma (liite 2) sisältää tarkan kuvauksen suoritettujen näytteenoton kulusta. Perusperiaatteena näytteenotossa oli ottaa jokaisesta tutkittavana olevasta materiaalivirrasta tasakokoinen näyte määrävälein siten, että kokonaisnäytteestä tulee tasaisesti edustava otos koko koeajon ajalta. Näytteenottosuunnitelman seuraaminen osoittautui koeajojen alettua hankalaksi. Koeajojen epäsäännöllinen kulku ja näytteenoton vaivalloisuus sekä materiaalivirran epäsäännöllisyys pakottivat pidentämään näytteenottohetkien välistä aikaa. Tämä vastaavasti vähensi näytteenottokertoja, mutta nosti niiden aikana kerätyn näytemäärän massaa. Näin näytemäärät olivat tavoitellun mukaisia, mutta edustus jäi hieman suunniteltua huonommaksi.

Näytteitä pyrittiin ottamaan 15 minuutin välein jokaisesta näytteenottopaikasta – käytännössä vaihtelua kuitenkin esiintyi monesta syystä. Prosessin materiaalisyöttö oli epätasaista, sillä prosessin ajomiehen tehtäviin kuului normaalin käsinlajittelun lisäksi tyhjentää ja punnita

keruupakkeja. Tämän lisäksi ajomies otti trukin avulla näytettä kolmesta eri paikasta sekä kutsui kauhakuormaajaa lisäämään muutamia kertoja syötemateriaalia prosessin alkupäähän. Nämä tekijät yhdessä aiheuttavat monia virheitä näytteenottoon: materiaalivirta ei missään vaiheessa tasaantunut siten, että näytettä olisi voitu ottaa häiriöttömästi virrasta. Myös yhden täyden näytteenottokierroksen (annetulla ajanhetkellä näytteenotto kaikista pisteistä) toteuttaminen kesti niin kauan, että näytteiden ottaminen piti aloittaa ennen kuin virta oli ehtinyt katkoksen jälkeisen käynnistymisen jälkeen tasaantumaan. Käytettävissä oleviin resursseihin nähden näytteenotto kokonaisuutena arvioiden sujui kuitenkin hyvin.

Näytteenottopaikat selviävät kuvan 29 virtauskaavion yksinkertaisesta esityksestä. Näytteenottopaikat on merkitty mustareunaisiin laatikoihin numeroin, jotka ovat yhdenmukaisia myöhemmin tulososiossa käytettävän numeroinnin sekä liitteen 1 laajan virtauskaavion kanssa.



Kuva 29 Näytteenottopaikat.

Kuvan 30 näytteenottopaikka oli prosessin järjestyksessä ensimmäinen näytteenottopaikka. Näyte otettiin yksikköprosessin ”7. Rumpumagneetti” kohdalta siten, että rumpumagneetilta lähtevän kuljettimen alle nostettiin näytekeruupakki noin 15 minuutin välein.



Kuva 30. Näytteenottoa trukin avulla korkealla sijaitsevan kuljettimen päästä.

Samalla tavalla trukin avulla näyte otettiin myös kohdista ”12. Sykloni” (paikasta käytetään nimitystä jätekoppi) sekä ”14. Eddy current”, näytteen ottamiseksi NF-tuotteesta.

Näytteenotto muovilaatikoita tai kuvassa 28 esiteltyä näytteenottovälinettä käyttäen voitiin suorittaa paikoissa ”13. Vetotelamagneetti”, ”15. HD-magneetti” sekä ”16. Trisomat-seula”, molempien ulostulojen kohdalla. Kuvassa 31 havainnollistetaan näytteenottoa Trisomat-seulan luona.



Kuva 31. Näytteenotto Trisomat-seulalta.

Myös prosessissa syntyneitä pölyjä otettiin talteen niiltä osin kuin se oli olosuhteet huomioiden mahdollista. Pölynäytteet kerättiin bigbageihin kohteista ”4. Sykloni”, ”6. Sykloni” sekä ”17. Sykloni”. Lisäksi bigbagiin kerättiin kohteesta ”12. Sykloni” peräisin oleva alite. Kuvassa 32 esitellään näytteenotto suoraan syklonin alta. Pölynäytteiden kohdalla

näytteeksi otettiin koko prosessin aikana muodostuva materiaalivirta, materiaalivirran alhaisen kokonaismassan ja toisaalta parhaan edustavuuden vuoksi.



Kuva 32. Pölyjen keräys näytesäkkiin. Pölyjen kohdalla näytteenoton tarkkuus oli korkea, sillä kaikki pöly kerättiin ja keräystapakin aiheutti hyvin vähän virhettä.

Koeajon päätteeksi otettiin vielä, hyvän näytteenoton periaatteiden vastaisesti, kahmaisunäyte jälkikäteen havaitusta mielenkiintoisen näköisestä pölystä/jauheesta (josta käytän tässä nimeä hihnapöly). Tämä hihnapöly varisi erilliseen keruupakkiin rumpumagneetin alapuolella. Näytteenottotavan aiheuttama virhe tunnustaen todettakoon, että näyte otettiin pienissä erissä koko kertyneen kasan alalta, antaen näin pölystä olosuhteisiin nähden parhaan edustavuuden.

7.3.1 Näytteenotossa syntyneet virheet

Näytteenoton yhteydessä syntyi erilaisia virhetekijöitä, joiden vaikutusta kokonaisvirheeseen on vaikea arvioida. Olosuhteet olivat koeajopäivänä hankalat: sää oli tuulinen ja sateinen, mikä aiheutti hävikkiä hienoaineksen suhteen, sillä kuljettimet kulkevat rengasmurskainprosessissa pitkälti tuulelle alttiina (kuva 33). Sade puolestaan sitoo hienoainesta ja estää sitä näin päätymästä suodattimiin ja edelleen näytteiden joukkoon.



Kuva 33. Prosessi sijaitsee ulkona, joten mm. tuuli aiheuttaa oman virheensä tuloksiin. Kuvassa pieni osa hihnakuljettimilta lentänyttä pölyä, piirikortin paloja ja muita kevyitä partikkeleita.

Kesken koeajojen poistettiin prosessia ajavan henkilöstön päätöksestä eräs prosessinosa, kun kokonaisajasta oli kulunut noin kolmannes. Poistettu osa oli putkirakenteinen yksinkertainen seula Trisomat-seulan yhteydessä, joka ei toiminut toivotulla tavalla. Tämä poisto muutti näytteenottoa siten, että tuosta ajanhetkestä alkaen avattiin uusi näytteenottopaikka muuttuneen paikan tilalle. Ennen tätä poistoa kerätyt näytteet kyseisestä paikasta (joita käsiteltiin nimillä Trisomat yli 15 mm, oikea ja vasen) punnittiin ja ne lisättiin kokonaismassaan, mutta näytteitä ei analysoitu pidemmälle. Mainitun muutoksen jälkeinen aloitettu uusi näyte edustaa siis tässä tutkimuksessa Trisomat-seulan yli 15 mm jaetta, vaikka ei tosiasiallisesti olekaan ajallisesti täydellisen edustava esitetyn prosessimuutoksen vuoksi.

Koeajon aikana materiaalin syöttäminen rengasmurskaimeen katkaistiin useampaan otteeseen keruupakkien täyttymisen ja pakkien punnituksen vuoksi. Normaalitylanteessa katkoksia ei sattuisi: tuotantotilanteessa materiaali ajetaan kasoihin ja kerätään kauhakuormaajalla talteen. Koeajotilanteessa siis syntyi jatkuvasti käynnistykseen ja pysäytykseen liittyviä häiriöitä materiaalivirrassa, joka luonnollisesti vaikuttaa myös otettavien näytteiden edustavuuteen. Tilanteeseen pyrittiin kuitenkin näytteenoton kannalta sopeutumaan siten, että materiaalivirran annettiin tasaantua mahdollisimman hyvin ennen näytteiden ottamista. Kuten edellä esitettiin, tästäkin periaatteesta jouduttiin aika ajoin joustamaan, jotta näytettä voitiin ylipäättään kerätä. Kaikkia esiteltyjä hankaluuksia voitaisiin etukäteen lieventää valmistamalla näytteenottopaikkoja varten yksilöllisesti sopivat näytteenottovälineet ja varaamalla riittävästi henkilöstöä suorittamaan näytteenotto-, punnitus ja trukilla-ajotehtäviä.

Lisäksi näytteenoton virheisiin lukeutuvat näytteenottovälineiden epätäydellisyydestä aiheutuvat talteenotto-ongelmat. Käytännössä useimmat materiaalin ulostulopaikat rengasprosessin yhteydessä ovat niin korkealla tai materiaalivirta on niin leveä, että niitä varten tulisi valmistaa omat, oikeaan muotoon tehdyt näytekauhat, jotka varmuudella saavat talteen ulostulevan materiaalin koko virran leveydeltä – herkästi pölyävä hienoaines huomioiden.

Näytteenoton ja tutkimuksen kannalta mielenkiintoinen näytteenottopaikka olisi edellä esitettyjen lisäksi ollut pussisuodatinyksikkö. Tuotannollisista ja taloudellisista syistä pussisuodattimen näytettä ei kuitenkaan voitu ottaa – tai tarkkaan ottaen näyte olisi voitu ottaa, mutta otetulla näytteellä ei olisi ollut tutkimuksellista arvoa, sillä pussisuodatinta ajetaan kerrallaan useita kuukausia ennen suodattimien vaihtoa. Suodattimien vaihtoperaatioon ei tätä koeajoa varten ryhdytty, sillä se on kallis ja aikaa vievä toimi. Toisaalta, pussisuodattimen voisi odottaa sisältävän tutkimuksen kannalta kiinnostavaa hienoainesta, joten lienee järkevää selvittää, voisiko näytteenottoon ko. paikasta tai pussisuodattimelle johtavasta putkistosta löytyä jokin edullinen ja prosessin kannalta vähemmän raskas tapa. Tätä tutkimusta suunniteltaessa kävi ilmi, että rengasmurskaimen tuottaman hienoaineen analysointi saattaisi tuottaa kaupallisesti kiinnostavaa tietoa.

7.4 Näytteiden käsittely ja analyysit

Kerätyt näytteet suojattiin koeajopäivän päätteeksi epäpuhtauksilta ja nimettiin (kuva 34). Tämän jälkeen ne kuljetettiin Lahteen Kuusakoski Oy:n tutkimuslaboratorioon, jossa niille tehtiin seuraavassa kappaleessa esiteltävät tutkimustoimenpiteet.



Kuva 34. Näytteet säkitettiin, suojattiin ja merkittiin huolellisesti ennen laboratorioon siirtoa.

7.4.1 Seulonnat ja käsinlajittelu

Rumpumagneetin tuottama materiaalivirta sekä pyörrevirtaerottimen NF-jae (non-ferrous, ei-rautametallit) olivat massaltaan niin merkittäviä, että niiden tutkimusta päätettiin laboratoriovaiheen aluksi syventää seulomalla ko. jakeet yli ja alle 15 mm kokoluokkiin. Kuten tulosisio myöhemmin osoittaa, oli seulontapäätös hyvä ja vaivan arvoinen. Muille jakeille tehtiin vain alkuaineanalyysi ilman kokojakauman selvitystä.

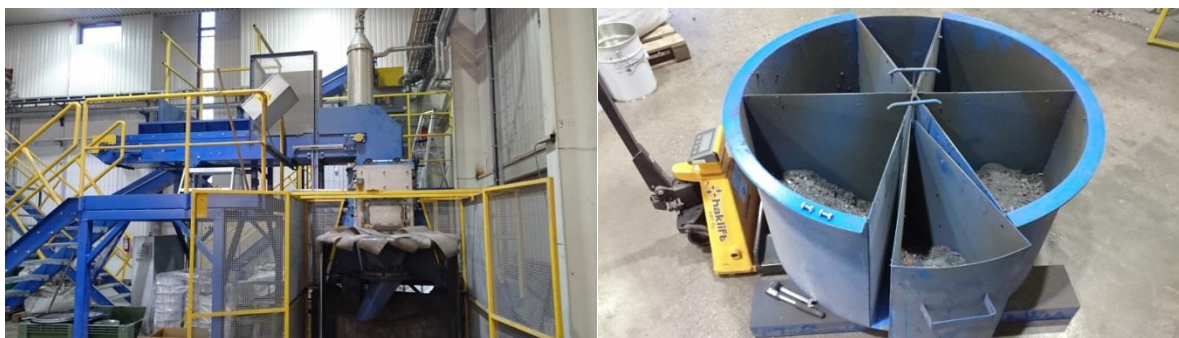
Seulonta rumpumagneetin jakeelle sekä NF-jakeelle suoritettiin käsin (kuva 35) ja analyysin kannalta liian suuret pölynäytteet pienennettiin juoksevan virran periaatteiden mukaisesti (kuva 36). Seulonnan yhteydessä poimittiin talteen eräitä prosessin toiminnan kuvauksen kannalta kiinnostavia partikkeleita. Näitä poimintoja esitellään kappaleessa 7.5.2. Kuvista käy ilmi elektroniikkaromun kierrättämiseen liittyviä klassisia ongelmatapauksia: erilaiset

sulkeumat ja materiaalien jatkojalostuksen kannalta epäedulliset materiaalikombinaatiot toisaalta huonontavat tavoitejakeen laatua, mutta myös aiheuttavat materiaalihävikkiä. Esimerkiksi rautasydämellä varustetut kuparikäämit päätyvät tällä hetkellä sattumanvaraisesti joko rauta- tai kuparipitoisen jakeen sekaan. Sama ongelma toistuu alumiinikappaleissa, joihin on kiinnittyneenä teräsruuveja tai –pultteja.



Kuvat 35 ja 36. Vasemmalla seulonta yli ja alle 15mm jakeisiin. Oikealla pienen pölynäytteen ottaminen suuresta pölymäärästä.

Luotettavan alkuaineanalyysin tekeminen heterogeeniselle romujakeelle edellyttää määrättyjä valmisteluita. Alkuaineanalyysin tarvitsema näytemäärä on hyvin pieni, mutta näytemateriaalia kerättiin hyvän edustavuuden takaamiseksi näytteenottopaikasta riippuen useita satoja kiloja. Tuosta määrästä hyppysellisen poimiminen analyysia varten niin, että se sisältää oikean suuruisen edustuksen kaikkia näytteessä olevia alkuaineita, edellyttää näytemateriaalin määrän pienentämistä sekä sulattamista ja sekoittamista. Näin ollen, käyttäen Lahden tutkimuslaboratorion leikkaavateräistä Bomatec-murskainta ja sekä siihen kuuluvaa jakolaitetta (kuvat 37 ja 38) valmistettiin näyte pyriittisulatusta varten. Pyriittisulatuksessa näytepanos, suuruudeltaan n. 15-40 kg, sulatetaan ja seostetaan pyriitillä (FeS_2) ja seos valetaan kokillille (kuvat 39 ja 40). Kokillilla valettu kappale jäähtyy ja muodostuneeseen näyteharkkoon porataan reikä. Porauksessa syntyneet porauslastut muodostavat lopullisen näytteen.



Kuvat 37 ja 38. Bomatec -murskain-jakolaitteyhdistelmä, joka mahdollistaa näytekoon pienentämisen näytteen edustavuutta huonontamatta.



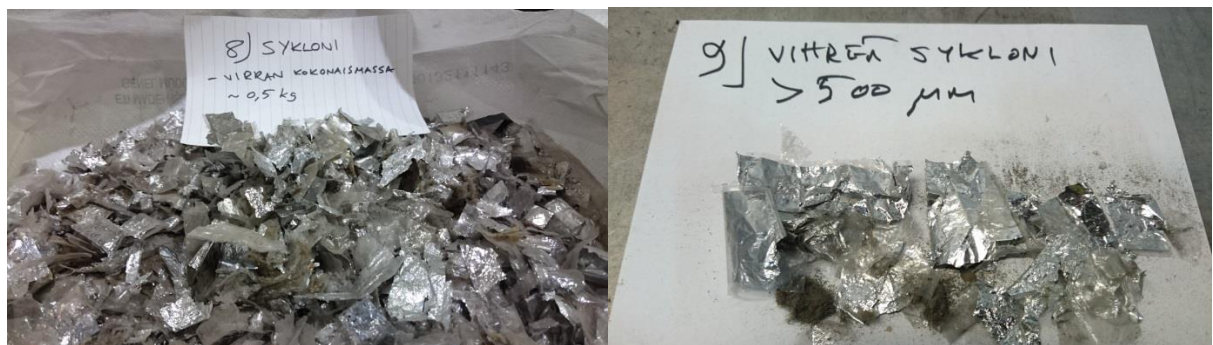
Kuvat 39 ja 40. Sulatusnäytteen panostus (vasen) ja sulatetun, pyriitillä seostetun näytteen valu.

Pölynäytteet, joiden partikkelikoko pysyttelee alle 500 µm, pystytään analysoimaan ICP-analyysissä sellaisenaan, ilman sulatusvaihetta. Tämän tutkimuksen pölynäytteiden kokojakauma ja niiden käsittely analyysiä varten osoittautui kuitenkin hankalaksi. Pölyt sisälsivät paljon hienojakoista, kuitupitoista massaa, mutta myös merkittävän osan (n. 50 m-%) vähäarvoiseksi havaittavaa, analysoinnin kannalta vähemmän mielenkiintoista roskaa, kuten muovikalvon palasia. Pölynäyte päädyttiin seulomaan epäkiinnostavan ylitteen erottamiseksi. Hylättäväksi menevät ylitteet valokuvattiin ja punnittiin. Kaikista pölynäytteistä jäi laboratorion varastoon alkuperäiset, prosessista kerätyt näytesäkit, joten tutkimustyön sujuvuuden nimissä tämä tieteellisesti kyseenalainen toimi nähtiin soveliaaksi tehdä.

Näiden pölyseulontojen, jotka suoritettiin 500 µm seulaverkolla, tavoitteena oli erottaa näytteestä sellaiset partikkelit, jotka eivät kokonsa puolesta sopisi ICP-analyysiin, mutta jotka eivät toisaalta olisi tuottaneet analysoituina merkittävää lisäinformaatiota. Mainittakoon, että laboratorion löytyvien hienonnuksen menetelmien avulla yritettiin tätä syntynyttä ylitettä (ja siten analysoimatta jätettyä jätettä) ensin hienontaa ja siten ”pakottaa” näytteeseen, siinä

kuitenkaan onnistumatta. Koska seulonta ja siten näytteen tietyn kokoluokan hylkääminen aiheuttaa jonkin verran vinoumaa pölyjen analyysituloksiin, esitellään kuvissa 41 ja 42 pölyistä seulomalla erotettuja partikkeleita. Analysoiduiksi tulleet pölynäytteet sisälsivät siis todellisuuteen nähden hieman ylikorostuneesti muuta kuin ao. kuvissa esiteltyä materiaalia, kuten piirikorttimassaa (silminnähden merkittävä osuus pölystä) sekä muuta haurasta, helpommin hienontuvaa materiaalia.

Laboratoriotutkimuksessa selvitettiin materiaalivirtojen alkuainejakaumat. Käytetty menetelmä oli ICP-analyysi (Inductively coupled plasma mass spectrometry), joka on hyvin tarkka analyysimenetelmä alkuainepitoisuuksien selvittämiseksi. Kuusakoski Oy:n laboratoriossa tällä menetelmällä havaitaan luotettavasti kaikki yli 15 ppm alkuainepitoisuudet. Liitteessä 3 on laboratorion alkuperäinen tutkimusraportti.



Kuvat 41 ja 42. Pölynäytteet sisälsivät jokainen n. 50 m-% kuvien mukaisia muovikalvon paloja sekä ohuita alumiinifolion palasia, jotka olivat suurimmaksi osaksi peräisin auki purkautuneista kondensaattoreista ja jotka seulottiin käytännön syistä pois pölyjen alkuaineanalysoinneista.

7.4.2 Näytteiden analyysivaiheessa syntyneet virheet

Näytteiden analysointivaiheessa syntyi eri työvaiheissa jonkin verran pölyämisen ja materiaalin siirtelyn kautta vähäisiä määriä materiaalihukkaa, vaikka sen syntymistä yritettiin seulontojen ja muun työn yhteydessä välttää. On kuitenkin huomattava, että kaikki laboratoriovaiheessa syntyneet virheet ovat merkitykseltään vähäisiä näytteenotossa syntyneisiin virheisiin nähden. Kuvassa 43 esitellään Bomatec-jakolaitteen käytön aikana syntyneitä vähäisiä materiaalihäviöitä.



Kuva 43. Bimatec-jakolaitteen tarkkuus ei ole 100% - osa materiaalista päätyy astian ulkopuolelle, kuten vasen kuva antaa ymmärtää. Oikealla näkyy pölypilvi, joka syntyy, kun jakolaitteen astian sisältö kipataan pussituskaualoon ylimääräistä näytemateriaalia varastoitaessa. Molemmat ovat virhelähteitä, tosin kokonaisuuteen nähden vähäisiä merkitykseltään.

7.5 Tulokset

Tässä kappaleessa esitellään rengasmurskainprosessin materiaalivirtojen alkuainepitoisuudet, massajakauma sekä tarkastellaan tärkeimpien alkuaineiden talteenoton tehokkuutta. Käsittelemätön laboratorion alkuaineanalyyysien tulodata löytyy liitteestä 3.

7.5.1 Massa- ja ainetase rengasmurskaimelle

Liitteestä 4 löytyvä taulukko esittelee alkuaineiden ja massavirtojen jakautumisen rengasmurskainprosessissa. Hakasulkeisiin merkitty numero viittaa prosessikaavion yksikköprosessinumerointiin.

Kuten taulukosta nähdään, joidenkin alkuaineiden kohdalla talteenottomäärä on ilmoitettua syötepitoisuutta suurempi. Kuten edellä kerrottiin, syötteen analyysi on peräisin Saulnyn (2015) tutkimuksesta. Näin ollen syötteen osalta jakauma toimii suuntaa-antavana arviona tässä tutkimuksessa käsitellyn romun alkuainepitoisuuksista. Kuitenkin talteenottomäärät taulukon viimeisellä rivillä ovat todellisia ja mitattuja.

Liitteen 4 materiaalivirtojen alkuainepitoisuuksien osalta voidaan esittää muutamia näkökohtia. Jalometallien osuus on jo syötemateriaalin koostumuksesta johtuen yleisesti ottaen matalalla tasolla. Jalometalleista kullin ja palladiumin taso on syötemateriaalissa niin alhainen, ettei niiden jakautumisesta ole tutkimusmenetelmien tarkkuuden vuoksi mahdollista esittää arvioita. Kuitenkin hopea, jota syötteessä on havainnoinnin luotettavuuden kannalta

riittävä määrä, rikastuu kolmessa kokoluokan mukaan seulotussa jakeessa aina pienempään kokoluokkaan. Massaosuudeltaan hopean suhteen merkittävin Trisomat-seulan alite sisältää hopeaa ylitteeseen nähden suhteessa 2,3:1. Kuparirikkaan Trisomat-seulan tuottaman jakeen reitti jatkokäsittelyyn kuparintuottajalle tekee mahdolliseksi hopean talteenoton myöhemmin. Hieman ennakko-odotuksista poiketen pölynäytteiden jalometallipitoisuudet jäävät maltilliselle tasolle eivätkä anna aihetta jatkotutkimuksille, ainakaan tämän materiaalin kohdalla.

Alkuaineanalyysien ja punnitustulosten perusteella tutkittiin 10 alkuainetta ja pystyttiin määrittämään niiden reitti murskainprosessissa. Nämä 10 alkuainetta muodostavat yhdessä 26% massaosuuden kokonaissyötteestä. Jäljelle jäävä 74% muodostuu mm. raudasta, orgaanisista aineista, hartseista ja lasikuidusta.

Kuparin todettiin päätyvän 71,3-prosenttisesti Trisomat-seulan ylitteeseen tai alitteeseen. Rautapitoisten jakeiden tai pölyjen sekaan kuparia päätyi 12,4%. Alumiinia saatiin talteen pyörrevirtaerottimen tuotteen muodossa 71,4% ja vastaavasti väärin materiaalivirtoihin (rautapitoisiin ja pölyihin) havaitusta alumiinista päätyi 11,6%. On merkillepantavaa, että tämän koemateriaalin kohdalla Trisomat-seulasta saadun materiaalivirran kuparipitoisuudessa yli ja alle 15mm kokoluokissa ei ole merkittävää eroa. Näkyvää kuparia tämän koemateriaalin joukossa oli merkittävästi piirilevyjen johdinpinnoissa sekä eri paksuisissa sähköjohdoissa. Kuparipitoisuus magneettisissa jakeissa johtunee pääosin kappaleen 7.5.2 kuvissa esitettävien epäedullisia materiaaliyhdistelmiä sisältävien komponenttien ja kappaleiden puutteellisesta murskautumisesta. Osa tällaisista yhdistelmistä on kuitenkin murskauksen kannalta hyvin ongelmallisia, kuten rautasydämellä varustetut kuparikäämit. Näin ollen murskauksen tehokkuuden lisäys ei voi olla ainut lähestymistapa tämän tehokkuusongelman korjaamiseksi; kuparin poimimiseksi erilleen rautapitoisesta jakeesta voisikin ajatella kokeiltavan esimerkiksi röntgenfluoresenssiin perustuvaa erottelua (XRF). Intuiitiivisesti ajatellen tämä olisi myös taloudellisesti kiinnostavampi vaihtoehto, sikäli kuin rautapitoisen materiaalivirran ohjaaminen XRF-erotteluun on toteuttamiskelpoinen ajatus.

Alumiinin kohdalla talteenotto pyörrevirtaerottimen kautta onnistuu tehokkaasti. Suuria alumiinipitoisuuksia ei hukata mihinkään materiaalivirtaan, joten pyörrevirtaerotin toimii kuten pitääkin ja koemateriaalin sisältämä alumiini on murskainprosessin tehokkuuden kannalta suotuisassa muodossa. Alumiinikappaleet olivat syötemateriaalia silmämääräisesti

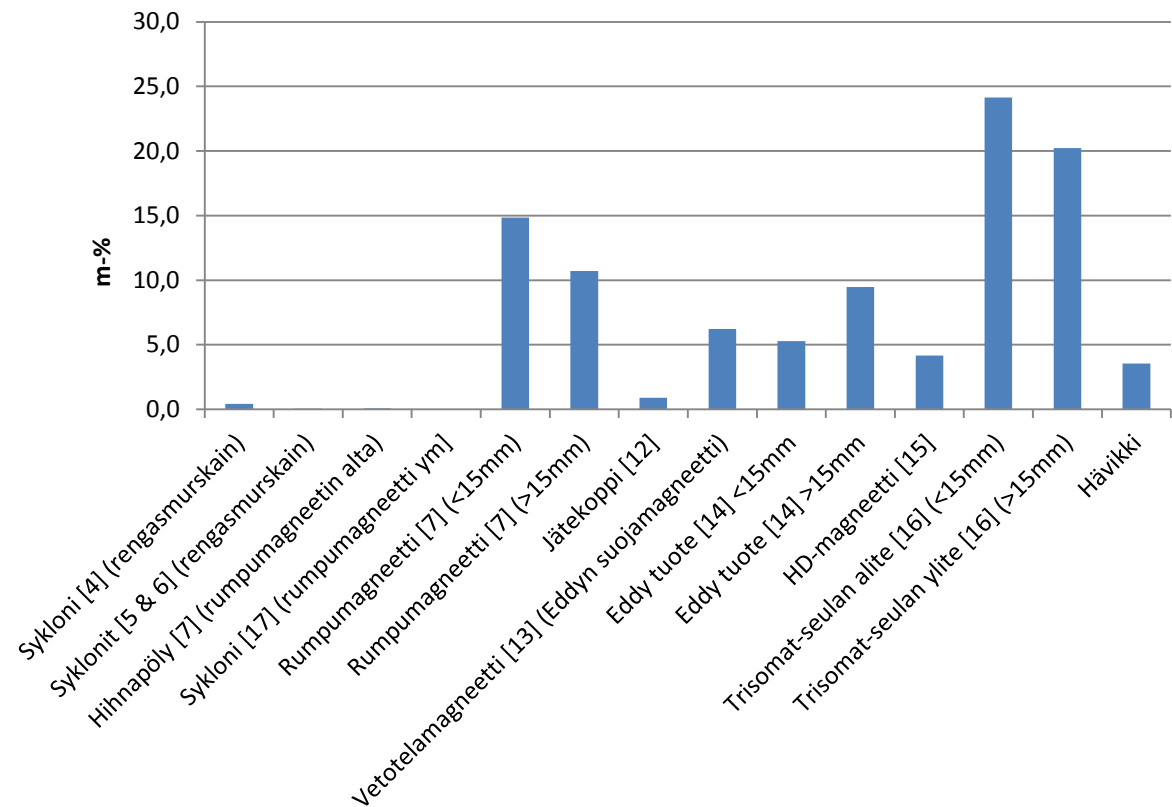
arvioiden lähes poikkeuksetta yksinkertaisia peltilevyjä tai jäähdytyslementtejä. Tällaisten kappaleiden irrottamiseen piirilevystä riittää suhteellisen vähäinen työmäärä murskaimessa.

Loput alkuaineet ovat massaosuuksiensa pienenä takia tässä tarkastelussa vähäisemmässä roolissa. Todettakoon kuitenkin, että nikkeli ja mangaani näyttävät päätyvän enimmäkseen rautapitoisen jakeen sekaan todennäköisesti siksi, että ovat yleisiä teräksen seosaineita. Samasta syystä sinkkiä lienee korostuneesti rautapitoisen jakeen seassa, sinkittyjen teräskappaleiden pintakerroksena. Lyijy ja tina puolestaan esiintyvät merkittävinä Trisomat-seulan molemmissa jakeissa mitä ilmeisimmin juotostinan muodossa – siis kiinteänä osana piirilevyjä.

Tämän työn ennakkokäsityksiä ajatellen mittaustuloksista nousee esille taloudellisesta näkökulmasta kaksi merkittävää asiaa: kupari ja rauta, jotka ovat volyymiltaan, ja siten myös taloudellisesti merkittävimpiä, tulevat erotelluiksi tyydyttävällä tavalla – riippuen muista tekijöistä, voisi kuparipitoisuuden alentamiseen rautapitoisissa jakeissa olla syytä panostaa. Toiseksi huomioitakoon pölyjen alhainen jalometallipitoisuus ja massaosuus. Pölyjen tutkimus tässä diplomityössä osoitti kuitenkin, että jalometallien tutkintaa on syytä jatkaa käyttämällä rikkaampaa syötemateriaalia ja tarkempia tutkimusmenetelmiä.

Mittausmenetelmistä johtuen taulukoista puuttuvat orgaanisten aineiden pitoisuudet, sillä ne palavat pyriittisulatuksen mukana pois. Rautapitoisuuksia ei voida myöskään esitellä käytetystä pyriittisulatusmenetelmästä johtuen.

Koeajon massajakaumaa esitellään kuvassa 44 ja taulukossa 6. Hakasulkeiden numero viittaa liitteen 1 prosessiokaavion numerointiin.



Kuva 44. Koemateriaalin massajakauma näytteenottoaikoittain.

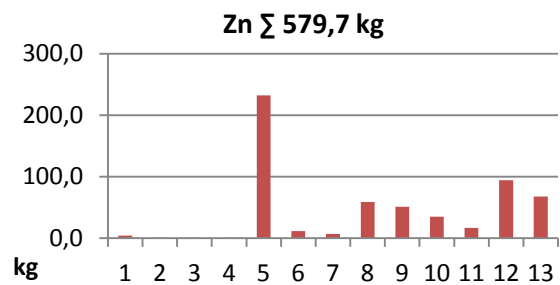
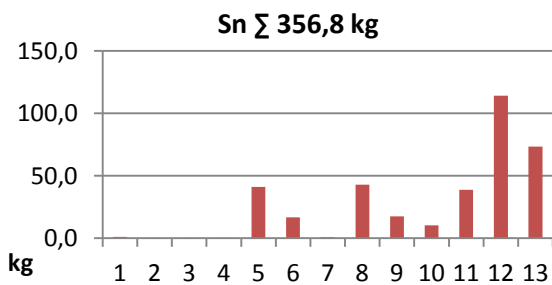
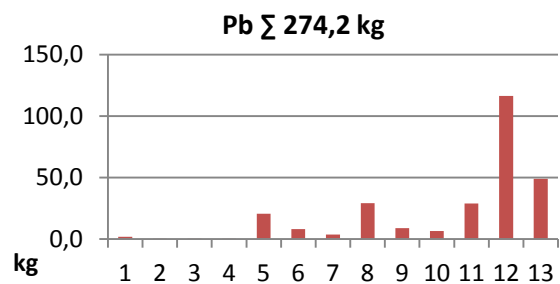
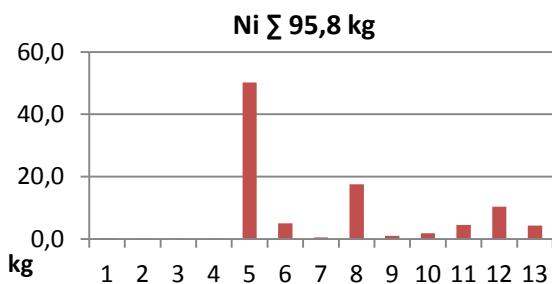
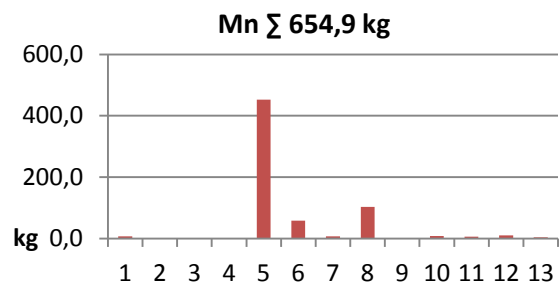
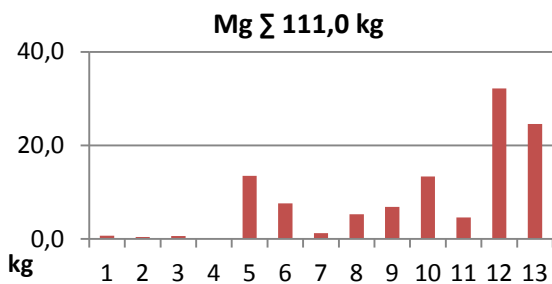
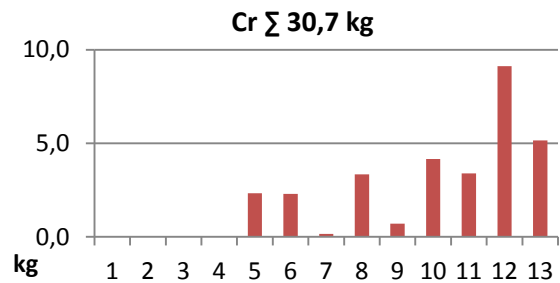
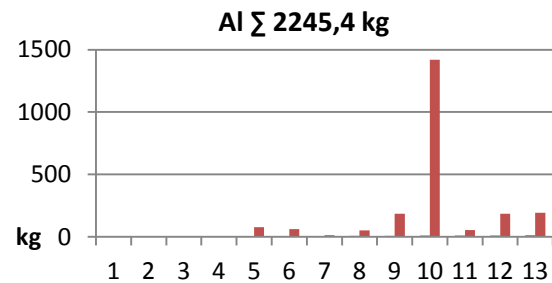
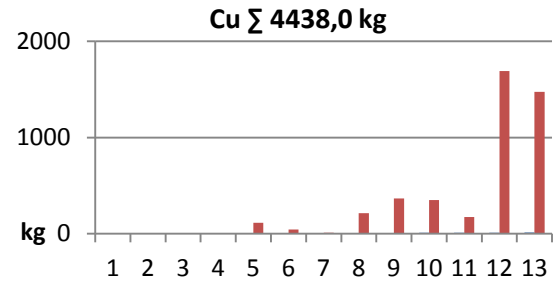
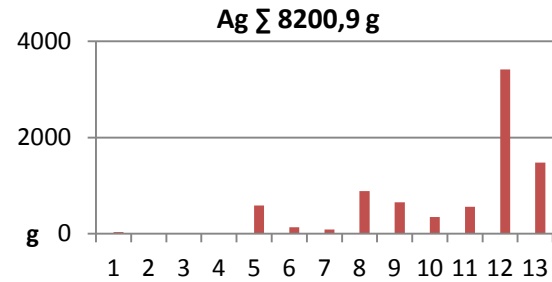
Taulukko 6. Massajakauma kiloina.

Syötteen massa	30740
Sykloni [4] (rengasmurskain)	128
Syklonit [5 & 6] (rengasmurskain)	15
Hihnapöly [7] (rumpumagneetin alta)	21
Sykloni [17] (rumpumagneetti ym]	1
Rumpumagneetti [7] (<15mm)	4565
Rumpumagneetti [7] (>15mm)	3289
Jätekoppi [12]	273
Vetotelamagneetti [13] (Eddyn suojamagneetti)	1912
Eddy tuote [14] <15mm	1623
Eddy tuote [14] >15mm	2912
HD-magneetti [15]	1278
Trisomat-seulan alite [16] (<15mm)	7418
Trisomat-seulan ylite [16] (>15mm)	6215
Hävikki	1091

Kuva 45 esittelee puolestaan massa- ja ainejakaumaa alkuaineiden näkökulmasta. Analyysitulosten perusteella laskettu prosessista talteen otetun hopean määrä oli hieman yli 8200 grammaa. Tuon määrän jakautuminen näytteenottoaikoittain esitellään kuvaajassa 45. Vastaavalla tavalla esitellään yhdeksän muun alkuaineen jakautuminen rengasmurskainprosessin jälkeen. On huomattava, että alkuaineiden summaksi merkitty paino on toteutunut, mitattu paino, ei syötevirran pitoisuuden mukaan laskettu. Siten esitystapa antaa käsityksen toteutuneesta talteenoton tehokkuudesta. Taulukon pystyakselina on massa, taulukon otsikosta riippuen joko gramma tai kilogramma.

Kuvaaja 45. Talteen otettujen alkuaineiden jakautuminen materiaa livirroittain

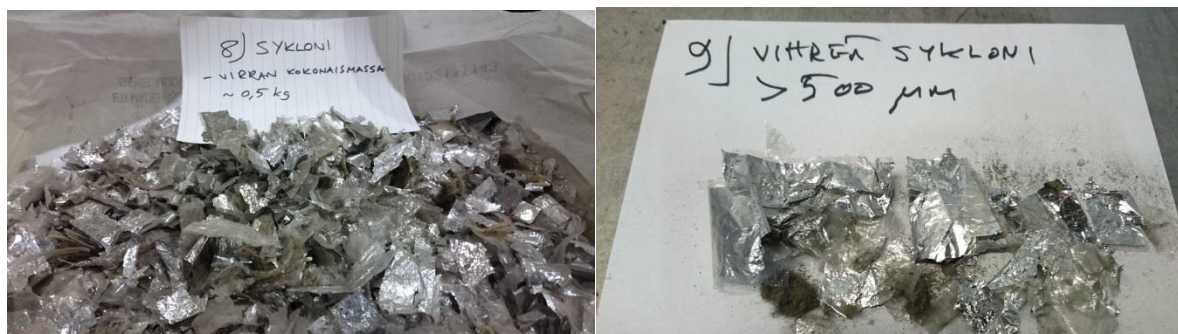
1	Sykloni [4] (rengasmurskain)	8	Vetotelamagneetti [13] (Eddyn suojamagneetti)
2	Syklonit [5 & 6] (rengasmurskain)	9	Eddy tuote [14] <15mm
3	Hihnapöly [7] (rumpumagneetin alta)	10	Eddy tuote [14] >15mm
4	Sykloni [17] (rumpumagneetti ym)	11	HD-magneetti [15]
5	Rumpumagneetti [7] (<15mm)	12	Trisomat-seulan alite [16] (<15mm)
6	Rumpumagneetti [7] (>15mm)	13	Trisomat-seulan ylite [16] (>15mm)
7	Jätekoppi [12]		



7.5.2 Koemateriaalin käyttäytyminen rengasmurskaimessa

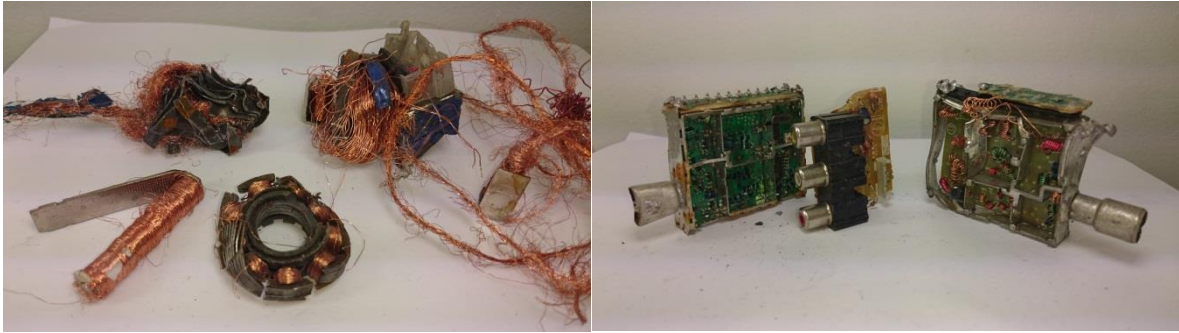
Rengasmurskaimen toimintaperiaatteen sydän on pyörivä, materiaalivirran suuntaan nähden poikittain oleva roottori, johon on kiinnittyneenä neljä akselia roottorin ulkokehällä. Jokainen näistä akseleista on varustettu hammastetuilla renkailla, jotka pyörivät vapaasti. Roottorin alapuolella on rosti (reikälevy), jota vasten roottori pyöriessään hiertää ja murskaa syötemateriaalin. Kun partikkelit ovat rikkoutuneet alle rostin reikäkoon, ne tippuvat tai tulevat työnnettyksi ulos murskaimesta alapuolella sijaitsevalle kuljettimelle. Murskaustapa tuottaa pölyä, eritoten piirilevyjen tapauksessa, koska hauraana ja kuitupitoisena materiaalina levyt hiertyessään eivät muokkaudu tai repeä, vaan murskautuvat ja hienontuvat – päätyen siten kevyenä jakeena pölynpoiston kautta suodattimille.

Pölynpoisto tehdään suoraan murskaustilasta roottorin yläpuolelta, joten suurin osa murskauksen aikana syntyvästä pölystä saadaan talteen. Kuitenkin hihnakuljettimelle (tai ulkoilmaan leijumaan) pääsee pölyä myös – tosin vain marginaalinen osa. Pölyjen koostumuksesta esitellään seuraavassa kaksi havainnekuvaa (46 ja 47). Silmämääräisesti arvioiden pölynäytteet näytteenotto paikasta riippumatta koostuivat hienojakoisesta, herkästi pölyävästä kuitumaisesta piirilevypölystä sekä suuremmista muovi- ja alumiinifoliopaloista.



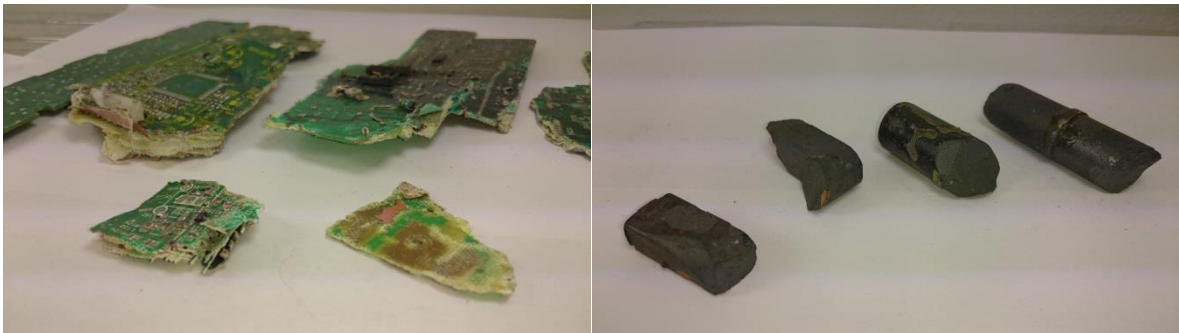
Kuvat 46 ja 47. Kaksi esimerkkiä pölynäytteiden ulkonäöstä: määräävinä komponentteina kuitumainen piirilevypöly sekä kondensaattoreista peräisin olevat folio- ja muovisuikaleet.

Kuvat 48-53 esittelevät muutamia mielenkiintoisia esimerkkitapauksia tämän tutkimuksen tuloksena syntyneistä partikkeleista. Kuvissa 48 ja 49 esitellyt kappaleet on poimittu rumpumagneetin tuottamasta materiaalivirrasta (materiaalivirta nro. 6 edellä esitetyissä kuvaajissa). Kuvassa 48 nähdään esimerkkejä rautasydämellä varustetun kuparikäämin päätyemisestä rautapitoiseksi tarkoitetun jakeen sekaan. Kuva 49 puolestaan osoittaa, että piirilevy, sisältäessään teräskomponentteja, voi päätyä rautapitoisen jakeen sekaan.



Kuvat 48 ja 49. Rautapitoisen yli 15mm jakeen sisältämät ei-toivotut partikkelit.

Kuvat 50 ja 51 esittelevät hauraiden kappaleiden rikkoutumista. Näiden kuvien partikkelit on poimittu pyörrevirtaerottimen tuottaman jakeen seasta yli 15 mm kokoluokasta (materiaalivirta nro 10 tässä työssä). Kuvassa 50 katkenneita piirilevyjä, joiden jäykkä kerrosrakenne käy ilmi rikkoutumiskohdasta. Kuvassa 51 murtuneita kestopagneetteja.



Kuvat 50 ja 51. Hauraiden kappaleiden murtumakohdat. Vasemmalla piirilevyjä ja oikealla kestopagneetteja.

On selvää, että komponenttien ja partikkelien käyttäytymisellä murskauksessa on suora vaikutus lopputuotteiden puhtauteen: Materiaaliyhdistelmien rikkoutumisen onnistumista kuvataan puhtaaksijauhatusteella (degree of liberation, kierrätyksessä myös degree of disconnection, vapaasti kääntäen irtautumiste). Epäonnistunut irtautuminen voi johtaa alkuaineiden päätymiseen talteenoton kannalta epäedulliseen prosessiin. Tästä käyvät konkreettisina esimerkkeinä seuraavien kuvien partikkelit: kuvassa 52 alumiinisiin jäädytyslementteihin kiinnittyneet teräksiset ruuvit sekä kuvassa 53 erilaisia sulkeumia sisään kätkenneet kokoonpuristuneet peltilevyt – kaikki peräisin pyörrevirtaerottimen tuottamasta jakeesta (materiaalivirta 10).



Kuvat 52 ja 53. Alumiiniset jäähdytyslementit sekä niihin kiinnittyneet ruuvit (vasen) sekä murskauksen tuloksena kokoon puristuneet, erilaisia komponentteja sisäänsä sulkeneet teräksiset ja alumiiniset pellinpalat.

On murskauksen tavoitteista kiinni, millä murskaimella ja miten kauan mitäkin romutyyppiä ajetaan – tietty määrä kuvatus kaltaisia laatuvirheitä on aina pakko hyväksyä. Tehokkaammalla tai pitempikestoisella murskauksella saavutettu parempi irtautumisaste tuottaa luonnollisesti puhtaampia jakeita, mutta kääntöpuolena on murskauksen energiankulutuksen kasvu ja sitä kautta tuotantokustannusten nousu. Zhangin (1997) tutkimuksessa tutkittiin piirilevyjen murskausta ja todettiin metallien puhtaaksijauhatusasteen olevan lähes täydet 100% alle 2 mm kokoluokassa. Kuparin kohdalla yli 50% puhtaaksijauhatusasteeseen päästiin partikkelikoon alittaessa n. 6 mm. Zhangin tutkimuksessa alle 6 mm kokoluokka muodosti kokonaismassasta n. 50% osuuden. Kun verrataan näitä tietoja tämän tutkimuksen tuloksiin (40 m-% materiaalista yli 15mm kokoluokassa), voi melko suurella todennäköisyydellä olettaa tässä tutkimuksessa käytetyn rostikoon (35x110 mm) olevan liian suuri piirilevyjen tehokkaaseen murskaukseen. Rostikoon pienentäminen luonnollisesti laskisi keskimääräistä partikkelikokoa, tuottaen oletettavasti puhtaampia jakeita – mutta se toisaalta nostaa murskauksen kuluja, joten avoimia kysymyksiä suoran kehitysehdotuksen tekemiseksi on liikaa.

Puhtaaksijauhatusasteen ja murskauksen kulujen yhteyden selvittäminen ei ole reaali maailmassa ainut relevantti suure murskauksen taloudellista tehokkuutta arvioitaessa. Riippuu myös jatkokäsittelymenetelmistä, mitä kulloinkin kannattaa tavoitella: yleispätevää kannattavuuslaskelmaa edes yksittäiselle romujakeelle on siten mahdotonta laatia. Tällaisen laskelman laatimiseksi tulisi esimerkiksi tämän tutkimuksen kaltaista koeasetelmaa laajentaa siten, että sama koemateriaalierä murskattaisiin toisen kerran ja analyysit tehtäisiin materiaalivirtakohtaisesti yhteen ja kahteen kertaan murskatulle materiaalille. Näitä

tutkimustietoja pitäisi sitten peilata toimitussopimusten ehtoihin eri materiaalin ostajien välillä.

Kuten edellä teoriaosassa selvitettiin, on trendi elektroniikkatuotteiden suunnittelussa jo pidempään ollut kohti kompleksisempia ja kierrättämisen kannalta hankalampia materiaaliyhdistelmiä. Siten voidaan todeta, että murskauksen rooli yhdessä muiden erottelumenetelmien kehittymisen kanssa on tulevaisuudessa yhä painavammassa asemassa. Sähkö- ja elektroniikkaromun heterogeenisyys, murskauksen ja erottelun tuottamat erilaiset materiaalivirrat sekä niiden hyödyntämistavat edellyttävät kuitenkin tapauskohtaista syventymistä, mikäli puhtaaksijauhatustason ja materiaalin käsittelyyn sitoutuneen energiankulutuksen välistä yhteyttä halutaan tutkia kaupallisesta näkökulmasta.

7.5.3 Vertailukohteena veitsimurskain

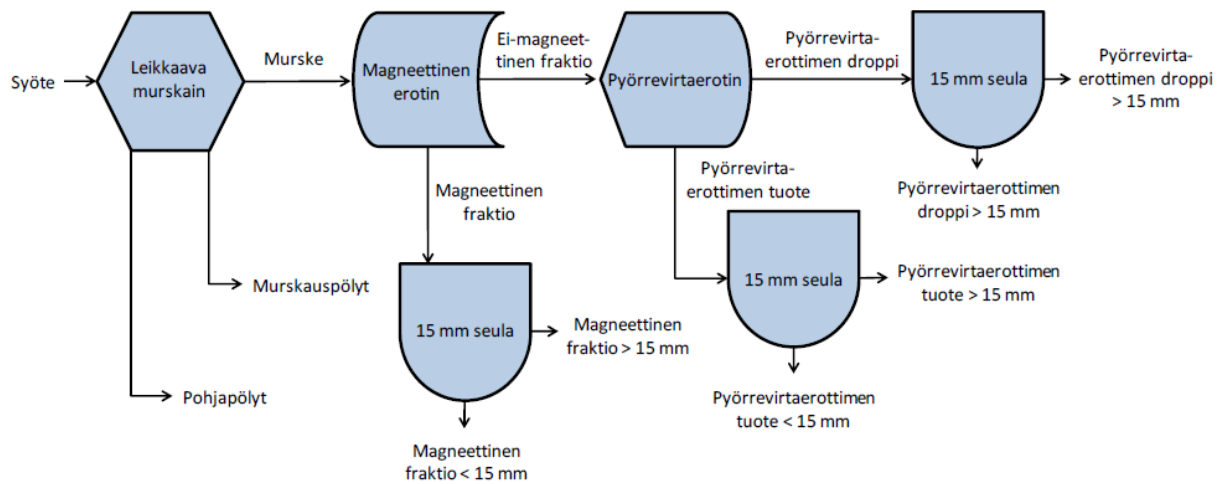
Vuonna 2015 tehtiin Kuusakoski Oy:llä Michael Saulnyn toimesta diplomityö, johon tässäkin työssä on jo aiemmin viitattu. Saulnyn diplomityössä tutkittiin muun muassa saman piirikorttimateriaalin murskaamista kuin tässä tutkimuksessa sillä erotuksella, että murskaukset suoritettiin Kuusakoski Oy:n Espoon toimipisteessä leikkaavalla murskaimella. Tässä kappaleessa vertaillaan tämän työn tuloksia Saulnyn tuloksiin.

Rengasmurskaimen ja veitsimurskaimen (knife shredder) murskausmekanismit eroavat siten, että veitsimurskaimen tavoitteena on tuottaa leikkaavia voimia pyörivien leikkuuterien avulla. Tämän murskausmenetelmän etuna on sen vähäinen pölyntuotto ja siten sopivuus piirilevyjä sisältävälle elektroniikkaromulle. Kuvassa 54 esitellään veitsimurskaimen leikkuuterät. Toimintaperiaate on murskausmekanismia lukuun ottamatta samankaltainen kuin rengasmurskaimessa: partikkelit tippuvat murskauksen jälkeen murskainterien alla olevan rostin päälle ja ollessaan oikean suuruisia, jatkavat rostin läpi kuljettimelle. Rostiin nähden ylisuuret kappaleet kulkeutuvat jatkuvasti uudelleen murskattavaksi leikkuuterien pyörimisen seurauksena. Myös leikkaavateräisen murskaimen pölynpoisto suoritetaan terien päältä imemällä.



Kuva 54. Veitsimurskaimen terät. (RMI, 2016)

Seuraavassa käydään läpi tulosten vertailukelpoisuuteen vaikuttavia asioita. Saulnyn tutkimuskohteena olevan veitsimurskainlaitteiston prosessikaavio esitellään kuvassa 31. Prosessikaavioita vertailemalla voidaan todeta, että Saulnyn työn vertailukelpoiset fraktiot näyttäisivät olevan magneettisen fraktion ylite ja alite (vrt. rumpumagneetti tässä tutkimuksessa), pyörrevirtaerottimen tuotteen ylite ja alite, pyörrevirtaerottimen dropin ylite ja alite sekä pölynäyte suoraan murskaimelta imettynä. Magneettisia fraktioita ei kuitenkaan voida tässä vertailussa käsitellä, sillä Saulnyn tutkimuksessa ”resurssien puutteen vuoksi magneettista fraktiota ei analysoitu”, joten vertailua ei voida siltä osin tehdä. Myöskään täysin vastaavaa tuotetta kuin Saulnyn pyörrevirtaerottimen droppi ei ole tässä tutkimuksessa, sillä kyseinen materiaalivirta jakautuu rengasmurskainprosessissa kahteen osaan: pyörrevirtaerottimen jälkeen tulee HD-magneetti ja sen jälkeen vasta erottelu yli ja alle 15 mm kokoluokkiin Trisomat-seulalla. Siten yksi vaihtoehto olisi yhdistää HD-magneetin materiaalivirta ja Trisomat-seulan jakeet laskennallisesti, mutta ongelmaksi muodostuu HD-magneetin materiaalivirran kokojakauma, jota ei tunneta: jotta tällaisen keinotekoisen jakeen voisi tehdä, pitäisi myös HD-magneetista olla seulonta-analyysit yli ja alle 15 mm kokoluokkiin. Jotta jonkinlaista vertailua kuitenkin saadaan tehtyä, otetaan vertailupariksi veitsimurskaimen pyörrevirtaerottimen droppi sekä rengasmurskaimen Trisomat-seulan jakeet, huolimatta HD-magneetin aiheuttamasta virheestä.



Kuva 55. Veitsimurskainprosessi Kuusakoski Oy:n Kauklahden tuotantolaitoksella.

Syötemateriaalien erot näiden tutkimusten välillä jäävät pieniksi – vain alumiinin osalta ero on selkeä siten, että Saulnyn syötemateriaalissa alumiinia oli n. puolet vähemmän. Toisaalta kultaa oli Saulnyn tutkimuksessa juuri yli analysoitavuusrajan, tässä tutkimuksessa taas ei. Syötteitä voi vertailla liitteen 4 taulukon avulla: syöte-rivin tiedot ovat Saulnyn tutkimuksesta, alimman rivin alkuainekohtaiset määrät taas tässä tutkimuksessa mitattuja alkuainekohtaisia talteenottomääriä. Näytteenottomenetelmät ja analyysit olivat molempien tutkimuksissa käytännössä samat – tosin virheen suuruus näytteenottovaiheessa jäi Saulnyn tutkimuksessa parempien olosuhteiden takia pienemmäksi. Edelliset asiat huomioiden vertailua siis voidaan tehdä siltä osin kuin vertailukelpoisia asioita löytyy. Taulukossa 7 vertaillaan edellä mainittujen vertailuparien alkuainepitoisuuksia.

Kaiken vertailun taustalla on syytä huomata murskainten suurehko mittakaavaero: rengasmurskaimen moottori on teholtaan 400 kW. Veitsimurskain puolestaan 2x50 kW (kaksi sähkömoottoria). Kyseiset murskaimet hyvin tunteva ulkopuolinen asiantuntija on arvioinut (Väli-Torala, 2016) että piirilevyn murskauskapasiteetti on rengasmurskaimella n. 6 tonnia tunnissa. Tämä arvio on oikean suuntainen, sillä tämän diplomityön koeajoissa murskausnopeus oli n. 6,8 tn/h. Vastaavasti leikkaavan murskaimen kapasiteetti on tästä n. kymmenesosa, eli 0,6 tonnia tunnissa. Siten karkeat arviot tehokkuudelle arvioituna yksiköllä [syötemäärä kg / kWh] ovat rengasmurskaimelle 15 kg/kWh ja veitsimurskaimelle 6 kg/kWh – täydellä teholla ajettaessa. Edelleen samaisen asiantuntijan lausunnon perusteella on vertailuissa huomioitava kulutusosakustannukset, jotka rengasmurskaimen kohdalla ovat n. 3 € / 1 tn syötettä ja veitsimurskaimella n. 10 € / 1 tn syötettä. Edellä esitellyistä tehoon

liittyvistä arvioista on syytä huomauttaa, että niiden suuruuteen vaikuttavat olennaisesti käytetty syötemateriaali sekä murskaimen ajonopeus.

Taulukko 7. Kolmen materiaalivirran alkuainepitoisuuden vertailua rengas- ja veitsimurskainprosessin välillä, syötteenä sama CRT-piirikorttimateriaali.

	E. tuote <15mm		E. tuote >15mm		E. droppi <15mm		E. droppi >15mm		Murskainpöly	
	Rengas	Veitsi	Rengas	Veitsi	Rengas	Veitsi	Rengas	Veitsi	Rengas	Veitsi
Murskain										
Au (g/t)	-	21,09	-	16,35	-	-	-	-	-	78
Pd (g/t)	-	-	-	-	-	-	-	-	20	76
Ag (g/t)	404	256,1	120	312,3	460	314,8	238	315,1	304	681
Cu %	22,6	9,788	12	10,42	22,8	14,49	23,7	15,6	0,546	1,68
Al %	11,4	21,81	48,7	55,91	2,49	4,685	3,1	4,627	2,53	3,77
Cr %	0,04	0,11	0,143	0,301	0,123	0,142	0,083	0,056	0,026	0,026
Mg %	0,424	0,446	0,459	0,292	0,434	0,293	0,395	0,252	0,573	0,247
Mn %	0,062	0,246	0,279	0,134	0,134	2,393	0,054	1,932	5,41	4,06
Ni %	0,064	0,074	0,065	0,148	0,14	0,265	0,069	0,193	0,237	0,322
Pb %	0,549	0,297	0,228	0,134	1,57	1,033	0,789	0,906	0,153	1,53
Sn %	1,08	0,486	0,357	0,237	1,54	1,467	1,18	1,467	0,779	1,43
Zn %	3,14	0,43	1,2	0,337	1,27	2,062	1,09	1,775	3,33	2,38

Kuten taulukosta 7 havaitaan, suuria eroja murskainten välillä on vaikea löytää. Esimerkiksi hopeapitoisuuden vaihteluista on vaikea löytää mitään loogista jatkuvuutta. Alumiinista eteenpäin listan alkuainepitoisuudet ovat niin matalia, että niiden vaihtelusta lienee turha kommentoida mitään. Pitoisuuksien vertailu keskenään rengas- ja veitsimurskaimen välillä tuoteparien välillä on myös hankalaa, vaikka syötemateriaalit ovat samat: Yksikköprosessit matkalla pyörrevirtaerottimelle ovat rengas- ja veitsimurskainprosessin välillä niin erilaiset. Harmillisesti vertailun kannalta ehkä luotettavin jae (murskaimen jälkeinen magneettierottelu) olisi luultavasti ollut kaikkein luotettavin vertailukohde, mutta sitä ei nyt voida edellä esitetyistä syistä tehdä.

Muutamia havaintoja voidaan kuitenkin nostaa esiin: kupari, joka on massaltaan merkittävä alkuaine, tuntuu olevan pitoisuudeltaan selkeästi korkeampi niin pyörrevirtaerottimen tuotteen kuin dropinkin kohdalla. Toki tässä vaikuttaa se, että HD-magneetti on jo alentanut Trisomat-seulan alitteen ja ylitteen rautapitoisuutta nostaen samalla kuparipitoisuutta, mutta tämä ei selitä pyörrevirtaerottimen tuotteen pitoisuuseroja. Luultavasti kuitenkin rengasmurskaimen prosessiketjussa juuri ennen pyörrevirtaerotinta oleva vetotelamagneetti nostaa sen verran kuparipitoisuutta, ettei tätäkään vertailua voi pitää aukottomana.

Jalometallit ovat yleisesti ottaen joko pitoisuusrajan alla tai sitten täpärästi yli – pois lukien veitsimurskaimen murskainpölyt. Pölyjen kokonaismassa jäi kuitenkin molempien murskainten kohdalla niin alhaiseksi, että toimintaohjeiden laatiminen jalometallirikkaiden pölyjen suhteen ei liene ensi tilassa tarvetta. Mikäli kuitenkin keksitään edullinen tapa varastoida ja käsitellä jalometallirikkaita pölyjä tehtaalla esimerkiksi kerran vuodessa, kannattanee toimintaan panostaa.

Metallipitoisuuksien tutkinta johtopäätösten tekemiseksi ei riitä, vaan tarvitaan tietojen yhdistämistä massaosuuksiin. Veitsimurskaimen osalta tarkkoja massaosuuksia jakeiden sisältä ei ole käytettävissä. Tutkimuksen tekijä on kuitenkin arvioinut alitteen osuudeksi n. 10% kaikissa jakeissa 15 mm seulaa käytettäessä. Tämä on jo itsessään kiinnostava tieto vertailun kannalta: rengasmurskaimen kohdalla alitetta syntyi kaikissa jakeissa enemmän kuin 10% ylitteeseen nähden. Pyörrevirtaerottimen tuotteen kohdalla alitetta syntyi noin puolet ylitteestä, Trisomat-seulan kohdalla puolestaan alitetta syntyi noin 1,4-kertainen määrä ylitteeseen nähden. Kokoluokkiin jakautumista voidaankin pitää merkittävänä havaintona ja eroavaisuutena näiden kahden murskausmenetelmän välillä: rengasmurskain tekee enemmän pienempää kokoluokkaa. Tulos on loogisesti ajatellen järkeenkäypä, kun kyseessä on hauras koemateriaali ja rengasmurskain perustuu iskevään ja hiertävään murskaukseen – ja on lisäksi moottoriteholtaan suurempi. Siten myös yksittäisten murskaustapahtumien voi odottaa olevan rengasmurskaimessa pidemmälle vietyjä kuin veitsimurskaimen isoiksi jääneiden partikkeleiden kohdalla.

Edelleen massoja vertailtaessa havaitaan, että veitsimurskaimen kohdalla pyörrevirtaerottimen droppiin päätyi n. 78% syöttestä. Rengasmurskainprosessin kohdalla vastaava luku on 48% (luku koostuu nyt HD-magneetin, Trisomatin ylitteen ja alitteen massojen suhteesta syötteen kokonaismassaan). Pyörrevirtaerottimen tuotetta syntyi veitsimurskaimessa 6,9% syöttestä ja rengasmurskaimessa 14,8%. Magneettisen fraktion massaosuus veitsimurskaimessa oli 12,5%, rengasmurskaimella vastaava luku oli 24,4%. Kun näihin lukuihin yhdistetään tieto rengasmurskaimen Trisomatin alitteen ja ylitteen kuparipitoisuudesta (joka on kummassakin n. 8 prosenttiyksikköä suurempi kuin veitsimurskaimen pyörrevirtaerottimen dropin vastaavat kokoluokat), voitaneen vetää varovainen johtopäätös, että rengasmurskain murskaa piirilevyt tehokkaammin, tuottaen siten alhaisempaa partikkelikokoa ja paremmin irtautuneita kappaleita. Se näkyy Trisomat-seulalla kohonneena kuparipitoisuutena ja toisaalta massan tasaisempana jakautumisena eri erotuslaitteisiin.

Pölymäärien suhde syötteisiin tukee edellistä johtopäätöstä: Veitsimurskaimen kohdalla talteenotetun pölyn massaa ei ole käytettävissä, mutta tutkimuksen tekijä on arvioinut pölyn määräksi 0,1% syötteen massasta, joka tarkoittaa noin 10 tonnin syötteen tapauksessa noin 10 kiloa. Vastaavasti kaikkien mitattujen pölyjen massasuhde syötteeseen oli rengasmurskaimen tapauksessa n. 1,1% - siis merkittävästi enemmän kuin veitsimurskaimen kohdalla.

Talteenoton tehokkuudesta ei voida edellä mainituista syistä vetää pitkälle meneviä vertailuja (veitsimurskaimen tapauksessa magneettisen fraktion alkuaineanalyysiä ei tehty). Pyörrevirtaerottimen tuotteelle ja dropille voidaan kuitenkin etsiä vertailuarvot taas rengasmurskaimelta: pyörrevirtaerottimen tuotteessa oli veitsimurskaimen tapauksessa kuparia n. 10% ja alumiinia 53%. Rengasmurskaimen kohdalla pyörrevirtaerottimen tuote sisälsi 16% kuparia ja 35,6% alumiinia. Pyörrevirtaerottimen droppi veitsimurskaimessa, joka oli siis massaosuudeltaan merkittävin veitsimurskaimen tuote, sisälsi 15,5% kuparia ja 4,6% alumiinia. Vastaavasti droppina vertailun vuoksi käsiteltävä yhdistelmä ”rengasmurskaimen HD-magneetti + Trisomatin ylite ja alite” sisälsi kuparia 22,4% ja 2,9% alumiinia. Prosessin aikana syntyi hävikkiä veitsimurskaimessa 3,2% kokonaissyötemäärästä, rengasmurskaimessa noin 5%.

Murskaustehokkuutta irtautumisasteen (degree of disconnection) näkökulmasta arvioitaessa on käytettävissä vertailutietona veitsimurskaimen alitteen ja ylitteen suhde kaikissa materiaalivirroissa: hieman yllättäen hauras piirikorttimateriaali muodosti veitsimurskaimen jakeista alle 15 mm kokoluokassa vain n. 10% osuuden suhteessa ylitteeseen. Rengasmurskaimen tapauksessa 15 mm seulonta kolmelle suurimmalle materiaalivirralla johti alitteeseen, joka oli massaosuudeltaan 40% ylitteestä. Yksin tämä tieto kertoo siitä, että murskaustapahtuman edistymisen kannalta piirikortin tapaisen hauraan materiaalin kohdalla rengasmurskaimen iskevä ja hiertävä murskaustapa on tehokas. Oma osuutensa on luonnollisesti myös murskainta pyörittävän moottorin tehokkuudella, jonka osuutta tässä tutkimuksessa ei tutkittu. On kuitenkin selvää, että teholtaan rengasmurskain oli tästä vertailuparista suurempi: rengasmurskaimen kapasiteetiksi on ilmoitettu 5 t/h, kun veitsimurskaimen kapasiteetin kerrottiin olevan vain 0,5 t/h. Näin ollen tehoeron takia ei murskaintyyppin, murskautumismekanismien, partikkelikokojen ja irtautumisasteen välille voida näillä lähtötiedoilla esittää selvää yhteyttä.

Edellä esitetyn informaation perusteella ei ole mahdollista vetää yksioikoisia johtopäätöksiä siitä, kumpi murskain on CRT-piirikorttien murskauksessa parempi vaihtoehto. Suuremman

kapasiteettinsa ja paremman hienonnustuloksensa takia rengasmurskain voi osoittautua tuotannollisessa käytössä veitsimurskainta tuottavammaksi hävikistään huolimatta, mutta yleispätevää vastausta edes piirikorttien tasolla on mahdoton antaa muuttujien suuresta määrästä johtuen. Yksin rengasmurskaimen hävikin suuruuden takia on kuitenkin suositeltavaa käyttää arvokkaampia piirikorttilaatuja murskattaessa veitsimurskainta, sikäli kuin se tuotannollisista näkökohdista katsoen on mahdollista ja taloudellisesti kannattavaa.

7.6 Johtopäätökset tuloksista ja vertailusta

Koetulosten yhteenvetona voidaan todeta, että rengasmurskain on hauraan piirikorttimateriaalin kohdalla tehokas murskain ja rengasmurskainprosessi toimii koeajossa pääsääntöisesti hyvin. Hävikin suuruus (5%), jalometallipitoisuuden alhaisuus koemateriaalissa sekä näytteenottovirheiden suuruus kuitenkin estävät pitkälle menevien johtopäätösten teon sen suhteen, millaisia parannuksia prosessin suhteen juuri tämän materiaalityypin kohdalla tulisi tehdä. Joitakin näkökohtia seuraavassa kuitenkin esitetään.

Tämän diplomityön kannalta kiinnostavia seikkoja työn alkaessa oli mm. jalometallien käyttäytyminen murskauksessa. Kirjallisuusviitteet antoivat odottaa jalometallien suhteen lupaavia tuloksia pölyjen jalometallipitoisuudesta. Koemateriaali oli kuitenkin liian köyhää kertoakseen pölyjen sisältämistä arvometalleista riittävällä luottamustasolla. Jalometalleista vain hopeaa havaittiin merkityksellisiä määriä – ja siltä osin tulokset noudattivat pääsääntöisesti kirjallisuuden perusteella tehtyä hypoteesia. Hopea rikastui pienempiin kokoluokkiin ja pölyynkin sitä kertyi noteerattava määrä, joskin pölyjen absoluuttinen massa jäi niin pieneksi, että suuresta läpimurrosta tuottavuuden lisäyksen suhteen ei voida puhua. Mikäli kustannustehokkaita menetelmiä pölyjen talteenotolle ja käsittelylle osana jokapäiväistä tuotantoa kuitenkin pystytään kehittämään, ei niitä ole syytä jättää rengasmurskaimen ja piirilevyjen kohdalla kokeilematta. Saulnyn tutkimuksessa veitsimurskaimen kohdalla koemateriaalina käytettiin CRT-kortin lisäksi korkea-arvoisia emolevyjä, jolloin jalometallejakin käsiteltiin jo kaupallisesti kiinnostavia määriä. Ei ole syytä olettaa, etteivätkö havainnot rengasmurskaimen kohdalla olisi olleet saman suuntaisia, mikäli arvokkaampaa piirikorttilaatuja olisi tutkittu.

7.7 Jatkotutkimusehdotuksia

Kaikkea tutkittua tietoa pitäisi soveltaa osana laajempia kustannus- ja tuottavuuslaskelmia, jotka huomioivat esimerkiksi energiankulutuksen, henkilötyötunnit ja muut tuotannon kustannukset sekä odotettavissa olevat myyntituotot. Pelkkiä saantoja tai pitoisuuksia tutkimalla kaupallisesti merkityksellistä tietoa ei luonnollisesti voida tuottaa. Jatkotutkimuksen aiheiksi jalometallipitoisen pölyn käsittelyn lisäksi nostaisin tämän tutkimuksen perusteella myös tarpeen materiaalikohtaisen hajonnan selvittämiseksi: samaa koeajomateriaalia tulisi kerätä niin paljon, että koeajot voitaisiin ajaa peräkkäin ja siten tutkia koeajojen välistä hajontaa, ts. materiaalin heterogeenisyyden vaikutusta. Luonnollisesti tällaista koeajoa varten tulisi vakioda paljon sellaisia muuttujia, jotka tässä tutkimuksessa olivat liian epämääräisesti määriteltyjä tai joita ei voida enää täsmällisesti toistaa. Käytännössä tämä tarkoittaa riittävää miehitystä näytteenottovaiheessa sekä näytteenottopaikkojen mukaan kustomoituja näytteenottovälineitä – tai automatisoitua näytteenottoa.

Samalla suosittelisin seulonnoissa otettavan myös alle 5 mm kokoluokan alkuainejakauma selville. Tämä kertoisi edelleen kattavammin arvometallien rikastumistrendistä partikkelikoon suhteen. Lisäksi pölynpoistovälineistä tehtävään näytteenottoon tulisi rengasmurskaimen kohdalla panostaa: suoraan rengasmurskaimen yläpuolelta imevään huippuimuriin tulisi ehdottomasti rakentaa putkiyhde mahdollisimman lähelle rengasmurskainta, josta näytteenotto on helppo ylimääräisellä imurilla suorittaa, samaan tapaan kuin Saulnyn veitsimurskaintutkimuksessa.

Tämän lisäksi mahdollisuudet kustannustehokkaaseen näytteenottoon pussisuodattimelta on syytä selvittää. Koeajoja varten voisi esimerkiksi vaihtaa pussisuodattimesta vain muutaman pussin ja merkitä ne ennen koeajon alkua. Siten kalliiseen kaikkien pussien vaihtoparaatioon ei tarvitsisi ryhtyä. Luonnollisesti pussien vaihto tulisi tehdä yöaikaan, kun laitos ei ole tuotantokäytössä. Hävikin alentamiseksi myös avoimet hihnakuljettimet tulisi peittää jollakin tarkoitukseen sopivalla levymateriaalilla, esimerkiksi paksulla kumimatolla. Tämä estäisi hienojakoisen aineksen pölyämisen ja suorat materiaalitappiot pienen (ja todistetusti arvometalleissa rikkaan) partikkelikokoluokan kohdalla.

Jatkotutkimuskohteeksi suosittaisin lisäksi jonkin sopivan energiankulutuksen huomioivan tehokkuussuureen kehittämistä, ellei sellaista ole jo. Nähdäkseni esimerkiksi suhdeluku ”kWh

kulutettua sähköenergiaa/1kg laskennallisesti puhdasta kuparia tunnetusta referenssimateriaalista” tai vastaava voisi olla käyttökelpoinen murskainten vertailussa.

Vertailussa veitsimurskaimeen ei voitu osoittaa selvästi kummankaan murskausmenetelmän paremmuutta, joskin lupaavia merkkejä rengasmurskaimen suuremmasta hienonnustehokkuudesta piirikorttien kohdalla saatiin. Toisaalta hävikin suuruus ohjaa valitsemaan ennemmin veitsimurskaimen sellaisissa tapauksissa, kun prosessoitava määrä on pieni ja materiaalin arvometallipitoisuus suuri. Kaikkea tarvittavaa dataa kattavan vertailun tekemiseksi ei ollut käytettävissä. Toisaalta se data, mikä oli saatavilla, ei tukenut johtopäätöksen tekemistä vahvasti kummankaan murskaimen hyväksi. Onkin todennäköisesti niin, että murskaimen kapasiteetti, tuotantolaitoksen sijainti, toimintavarmuus ja monikäyttöisyys muodostuvat yhdessä spekulatiivisen pieniä tehokkuuseroja suuremmaksi tekijäksi oikeaa murskausmenetelmää valittaessa. Hävikin, näytteenoton virheiden ja materiaalin heterogeenisyyden vuoksi olisi siis lyhytnäköistä antaa toimintasuosituksia suuntaan tai toiseen, varsinkin, kun on yleisesti tiedossa, että piirikorttien arvot vaihtelevat suuresti.

8 Yhteenveto

Sähkö- ja elektroniikkaromu on yksi maailman nopeimmin kasvavia jätevirtoja, ja se sisältää houkuttelevia määriä jalometalleja, terästä ja harvinaisia alkuaineita (Widmer, 2005). Sähkö- ja elektroniikkalaitteisiin on sitoutunut suuria määriä potentiaalienergiaa kaivostoiminnan ja metallien jalostuksen kautta. Siksi ei ole vain taloudellisesti järkevää, vaan myös ympäristön kannalta yhä tärkeämpää suunnitella sähkö- ja elektroniikkaromun talteenotolle ja kierrätykselle mahdollisimman tehokas talteenotto- ja käsittelyjärjestelmä globaalilla tasolla. Yhdessä maapallon väestönkasvun, absoluuttisen köyhyyden vähenemisen ja suhteellisesti kasvavan keskiluokan kanssa tällaiset toimet sähkö- ja elektroniikkaromun suhteen voivat osoittautua yksinkertaisesti välttämättömiksi yleisen elintason säilyttämisen ja parantumisen kannalta.

Tässä diplomityössä tutkimuskohteena olivat arvometallipitoisuudeltaan vähäiset CRT-piirikortit, jotka ovat peräisin kuvaputkitelevisioista ja –monitoreista. Juuri tämä kyseinen korttilaatu tulee lähes katoamaan kierrätysmarkkinoilta, sillä kuvaputkitekniikka on vanhentunutta. Vähäarvoisia piirikortteja kuitenkin löytyy monista eri sovellutuskohteista, joten sikäli tämän tutkimuksen tulokset eivät vanhene aivan lähitulevaisuudessa. Itse asiassa, elektroniikkalaitteiden valmistajien intresseissä on tehdä *mahdollisimman monista* piirikorteista mahdollisimman vähäarvoisia – tämä kun laskee luonnollisesti uuden tuotteiden valmistuskustannuksia. Esimerkiksi tietokoneiden komponenteissa arvometallipitoisuudet ovat olleet laskussa jo pitkään (UNEP, 2013). Vähäarvoiset kortit muodostavat myös volyymiltaan suuren kokonaisuuden, joten merkityksettömästä materiaalivirrasta ei voida puhua, jalometallipitoisuuden alhaisuudesta huolimatta.

Tässä tutkimuksessa CRT-piirikortteja murskattiin noin 30 tonnia Kuusakoski Oy:n Heinolan tuotantolaitoksella rengasmurskainprosessissa. Murskauksen yhteydessä otettiin ylös murskaukseen kulunut aika, mitattiin piiristä ulos tulleiden materiaalivirtojen kokonaismassat ja suoritettiin samalla kattava prosessinaikainen näytteenotto noudattaen hyvän näytteenottotavan periaatteita. Kerätyt näytteet punnittiin, tutkittiin ja osittain myös seulottiin massa- ja alkuainejakauman selvittämiseksi. Tutkimus osoitti, että kultaa ja muita jalometalleja oli syötemateriaalissa pääsääntöisesti alle havaitsemisrajan (<15 g/t). Sen sijaan kuparia, alumiinia ja muita perusmetalleja havaittiin ja niiden osalta todettiin rengasmurskainprosessin toimivan tyydyttävästi. Murskainprosessin laitteiden tavoitteena on

jakaa materiaali murskauksen jälkeen mahdollisimman tarkasti eri alkuaineista koostuviin virtoihin. Esimerkiksi magneetit tavoittelevat rautapitoisia kappaleita, mutta epätäydellisen murskautumisen seurauksena magneettiset jakeet sisältävät aina myös esimerkiksi kuparia, joka on rautapitoisessa romussa laatua huonontavana tekijänä ei-toivottu alkuaine. Syntyneiden materiaalivirtojen todettiin olevan puhtaudeltaan tyydyttävällä tasolla. Kupari saatiin talteen Trisomat-seulan kautta 71-prosenttisesti. Alumiini puolestaan päätyi yhtä suurella osuudella pyörrevirtaerottimen tuotteeseen, kuten on tarkoituskin. Tunnetusta kuparista 12,5% päätyi hävikkinä joko rautapitoisten jakeiden sekaan tai pölyihin. Magneettisten jakeiden jatkokäsittelyllä kuparin osuutta voitaisiin alentaa. Jalometallien osalta hopeaa lukuun ottamatta ei voida tehdä vahvoja johtopäätöksiä. Hopea päätyi talteenoton kannalta edulliseen Trisomat-seulan ylitteeseen tai alitteeseen 60-prosenttisesti. Loput hopeasta katosivat muihin jakeisiin tai hävikkiin.

Työn osana tehtiin myös murskautumismekanismien ja prosessoinnin erojen arviointia veitsimurskaimeen. Näitä käsitellään omassa kappaleessaan tulososion osana. Vertailussa rengasmurskaimen todettiin olevan veitsimurskainta suurempi kapasiteetiltaan ja moottoriteholtaan ja tuottavan suhteellisesti enemmän alle 15 mm kokoluokan partikkeleita. Toisaalta rengasmurskaimen hävikki oli suurempi, määrättyjen materiaalivirtojen arvometallipitoisuudet alhaisempia eikä kaikilta osin vertailu ollut määrättyjen tietojen puuttuessa mahdollista, joten suoraviivaisen paremmuusjärjestykseen laittamisen todettiin olevan näiden tietojen valossa vaikeaa: prosessointitavan valintaan vaikuttavat käytännössä monet muutkin tekijät kuin yksittäisten materiaalivirtojen pitoisuuserot. Vaikuttaa kuitenkin vertailun tulosten perusteella siltä, että rengasmurskain puolustaa paikkaansa vähempiarvoisen piirikorttimateriaalin murskauksessa. Veitsimurskaimen voi perustellusti olettaa olevan sitä tuottavampi mitä arvokkaampia piirikorttilaatuja murskataan, sillä hävikin määrä on pienempi.

Tämä diplomityö on osa laajempaa tutkimuskokonaisuutta, kuten työn alkupuolella on kerrottu. Maamme näkökulmasta laajamittaisen ARVI-tutkimusohjelman päämääränä on ”laajentaa ja syventää suomalaisten materiaalien talteenoton parissa toimivien yritysten tietotaitoa” sekä ”parantaa niiden kilpailukykyä globaaleilla markkinoilla” (CLIC-innovation, 2016). Toivon tämän tutkimuksen hyödyttävän tutkimusohjelman tavoitteiksi kirjattujen asioiden kehittymistä.

9 Lähdeluettelo

Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., Buchert, M. Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, vol. 51, 15.6.2013, s. 1-22.

Bloomberg-uutistoimisto, 29.9.2015. "Asia Stocks Head for Lowest Since 2012 as Commodity Firms Slump". <http://www.bloomberg.com/news/articles/2015-09-29/asia-stocks-head-for-lowest-since-2012-as-material-shares-slump>

Castro, M.B.G., Remmerswaal, J.A.M., Reuter, M.A., Boin, U.J.M. A thermodynamic approach to the compatibility of materials combinations for recycling. *Resources, conservation and recycling*. Vol. 43, issue 1, 12/2004, pp. 1-19.
doi:10.1016/j.resconrec.2004.04.011

Chen, Y., Liao, T., Li, G., Chen, B., Shi, X.: "Recovery of bismuth and arsenic from copper smelter flue dusts after copper and zinc extraction". *Minerals Engineering*, vol. 39, 12/2012, pp. 23-28.

CLIC-Innovation, ARVI (Material value chains, Materiaalien arvovirrat) -tutkimusohjelman verkkosivut. Haettu 4.4.2016. <http://clicinnovation.fi/activity/arvi/>

Davenport, W.G., King, M., Schlesinger, M., Biswas, A.K.: "Extractive metallurgy of copper". Elsevier, 2002. ISBN: 0-08-044029-0

Eskonniemi, S. "Technical testing and applicability of a x-ray fluorescence device for metal recycling". Master's Thesis, Aalto University School of Chemical Technology, 2015.

EU, 2011. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2011/65/EU, annettu 8 päivänä kesäkuuta 2011, tiettyjen vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2011.174.01.0088.01.FIN

EU, 2012. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/19/EU, annettu 4 päivänä heinäkuuta 2012, sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta (1). <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=OJ:L:2012:197:TOC>

EU, 2014. Euroopan komission julkaisu, huhtikuu 2014: "Frequently Asked Questions on Directive 2012/19/EU on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)". <http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/faq.pdf>

Eurostat, 2012. Haettu 30.11.2015. Tilasto: Electrical and electronic equipment (EEE) put on the market and waste EEE collected and treated, EU, 2007–12. [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Electrical_and_electronic_equipment_\(EEE\)_put_on_the_market_and_waste_EEE_collected_and_treated,_EU,_2007%E2%80%9312.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Electrical_and_electronic_equipment_(EEE)_put_on_the_market_and_waste_EEE_collected_and_treated,_EU,_2007%E2%80%9312.png)

Gy, P. "Sampling of Particulate Materials Theory and Practice". Developments in Geomathematics 4. Elsevier, 2012. ISBN 044460135X, 9780444601353

Houpert, C., Lanteri, V., Jolivet, J. M., Guttman, M., Birat, J. P., Jallon, M., Confente, M., Production of high quality steels using the scrap/electric arc furnace route, konferenssijulkaisu "79. steelmaking and 55th ironmaking conference, Pittsburgh, PA", Yhdysvallat, 24.-27.3.1996. Julkaistu julkaisusarjassa Ironmaking conference proceedings nro. 55

Huisman, J., Stevels, A., Marinelli, T., Magalini, F., Where did WEEE go wrong in Europe? Practical and academic lessons for the US, konferenssijulkaisu: "Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics & the Environment". 8.-11.2006, Scottsdale, AZ, Yhdysvallat. DOI: 10.1109/ISEE.2006.1650039

Jain, A. Global e-waste growth. TERI Press, The Energy and Resources Institute. Batra Art Press, New Delhi, India, 2008.

Jordan Reduction Solutions, kuva haettu 30.3.2016. <http://www.jordanreductionsolutions.com/contact.html>

Kalnicky, D., Singhvi, R. Field portable XRF analysis of environmental samples, Journal of Hazardous Materials, vol. 83, nro. 1-2, 5/2001, s. 93-122

Marra, A., Cesaro, A., Belgiorno, V., Konferenssijulkaisu: WEEE mechanical treatments: recovery effectiveness of critical materials. CEST 2015 –konferenssi (Conference on Environmental Science and Technology), Rhodos, Kreikka, 3.-5.9.2015.

Minter, A. The Atlantic –verkkolehti 1.11.2013. "How China Profits From Our Junk". <http://www.theatlantic.com/china/archive/2013/11/how-china-profits-from-our-junk/281044/>

Oguchi, M., Sakanakura, H., Terazono, A., Takigami, H. Fate of metals contained in waste electrical and electronic equipment in a municipal waste treatment process. Waste management, vol. 32, nro 1, 1/2012, s. 96-103. Doi: doi:10.1016/j.wasman.2011.09.012

Oja, M. 2013. Näytteenoton 7 virhettä –luentomoniste. MT-0.2216 Yksikköprosessit ja mekanismit. Aalto-yliopiston Kemian tekniikan korkeakoulu.

Ongondo, F. O., Williams, I. D., Cherrett, T. J., How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes, Waste Management, vol. 31, nro 4, 4/2011, s. 714-730

Outotec 2016. HSC Chemistry 8 –ohjelmiston esittelymateriaali Outotec Oyj:n verkkosivuilla.

http://www.outotec.com/ImageVaultFiles/id_1612/cf_2/OTE_Outotec_HSC_Chemistry_8_eng.PDF Haettu 29.2.2016

Pehlken, A., Müller, D.H. Using information of the separation process of recycling scrap tires for process modelling. Resources, conservation and recycling. Vol 54, issue 2, 12/2009, pp. 140-148. doi:10.1016/j.resconrec.2009.07.008

Reuter, M. A.; van Schaik, A. Dynamic modelling and optimisation of the resource cycle of passenger vehicles. Minerals engineering, vol. 15, issue 11, Supplement 1, 11/2002, pp. 1001-1016, doi:10.1016/S0892-6875(02)00080-8

Reuter, M. A.; van Schaik, A. The use of fuzzy rule models to link automotive design to recycling rate calculation. Minerals engineering, vol. 20, issue 9, 8/2007, pp. 875-890, doi:10.1016/j.mineng.2007.03.016

Reuter, M. A.; van Schaik, A. Opportunities and limits of recycling: A dynamic-model-based analysis. Materials Research Society. Vol. 37, 04/2012. DOI: 10.1557/mrs.2012.57

Reuter, M. A.; van Schaik, A., Gediga, J.: Simulation-based design for resource efficiency of metal production and recycling systems: Cases - copper production and recycling, e-waste (LED lamps) and nickel pig iron. International journal of Life Cycle Assessment, 02/2015, DOI 10.1007/s11367-015-0860-4

Reuter, M. A.; van Schaik, A. Product-Centric Simulation-Based Design for Recycling: Case of LED Lamp Recycling. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2015. DOI 10.1007/s40831-014-0006-0

RMI (Recycling Machinery International). Untha RS50 –murskain. Haettu 28.2.2016. <http://recyclingmachineryinternational.com/content/untha-rs50-shredder>

Schluep, M., et al., 2009. Recycling e from e-Waste to Resources, Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies. United Nations Environment Programme (UNEP), Paris, France. http://www.unep.org/pdf/Recycling_From_e-waste_to_resources.pdf

Soikkeli, V. “Elektroniikkaromun ja kuparipitoisen romun näytteenotto, -valmistus ja analytiikka” Pro Gradu –tutkielma, Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos, Epäorgaanisen ja analyttisen kemian osasto, 2008.

Tsuchiya, K., Goto, Y., Hatano, T., Owad, S., Takasugi, A., Kato, Y., Funakoshi, T., Tannno, H., Yamazaki, H. Establishment of Aluminum “Sash to Sash” Recycling by using XRT and XRF Sorters. ASEAN 2013 “Moving forward” -konferenssijulkaisu, 11.-13.11.2013, Chiang Mai, Thaimaa

UNEP, 2013. Reuter, M. A., Hudson, C., van Schaik, A., Heiskanen, K., Meskers, C., Hagelücken, C. Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metal_Recycling_Full_Report.pdf

van Schaik, A., Reuter, M.A. Dynamic modelling of E-waste recycling system performance based on product design. *Minerals engineering*, vol. 23, issue 3, 2/2010, pp. 192-210, doi:10.1016/j.mineng.2009.09.004

Väli-Torala, Tapio. Ulkopuolinen asiantuntijalausunto (Rectec Engineering, toimitusjohtaja ja osakas). Puhelinkeskustelu 29.3.2016.

Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., Böni, H. Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 25, issue 5, 06/2005, pp. 436-458. doi:10.1016/j.eiar.2005.04.001

Williams, I. D. et al. How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. Waste Management, huhtikuu 2011. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.10.023

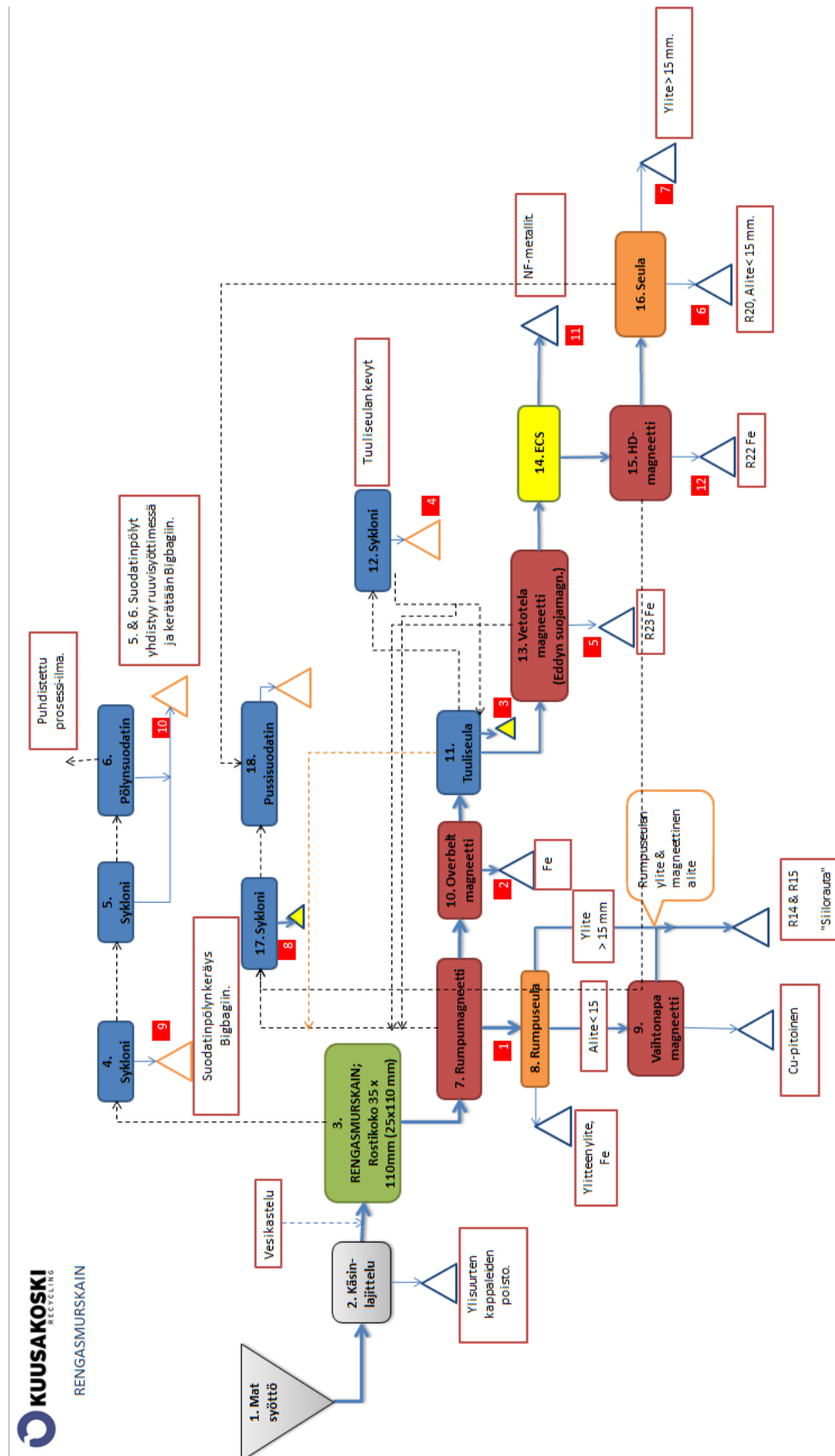
Worrell, E., Reuter, M. A., Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists. Elsevier, 2014. ISBN: 978-0-12-396459-5

Wäger et al. 28.11.2015. "Recycling of Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) – Tentative Results of a Swiss Study. http://ewasteguide.info/system/files/Waeger_2009_R09_slides.pdf

Yifan (Zhengzhou YiFan Machinery Co), murskainlaitevalmistajan verkkosivut, kuva haettu 30.3.2016: <http://www.yifancrusher.com/>

Zhengzhou ZY Machinery CO, laitevalmistajan verkkosivut. Kuva haettu 30.3.2016. <http://www.zzywzg.com/en/index.asp>

LIITE 1. Rengasmurskainprosessin prosessikaavio.



LIITE 2. Näytteenottosuunnitelma.

Diplomityö / Kuusakoski Oy
Tatu Karlström

Näytteenottosuunnitelma 22.10.2015

Näytteenottosuunnitelman tarkoituksena on kuvata periaatteet ja menetelmät, joilla Tatu Karlströmin diplomityöhön liittyvä rengasmurskaimella tehtävä koeajo suoritetaan. Koeajojen tavoitteena on muodostaa riittävä tietomäärä massa- ja ainetaseen laatimiseksi rengasmurskaimelle. Tämän takia prosessoinnin myötä syntyvät jakeet punnitaan sekä niille suoritetaan alkuaineanalyysit Kuusakosken Lahden laboratoriossa.

Näyttemateriaalina low value piirikortti (CRT-kortti). Prosessoitava määrä n. 30tn. Koeajopäivä torstai 22.10.2015.

Esivalmistelut

Syötemäärä punnitaan.

Rengasmurskaimen linjasto putsataan ajomiehen toimesta, virhettä aiheuttavat vieraat aineet poistetaan ja kaikkien virtojen alle asetetaan tyhjt pakit ja bigbagit. Näytteenottovälineitä asetetaan saataville riittävästi.

Säädettävien prosessilaitteiden säätöarvot kirjataan ylös.

Koejärjestelyt ja toteutus

Näytteenottopaikat merkitty on prosessikaavioon. Numerointi ja paikat varmistuvat 19.10.15 tehtävällä vierailulla (Lipponen & Karlström). Periaatteena on, että jokaisen virran alle asetetaan pakki sekä pölykeräimien yhteyteen bigbagit.

Suurimmista virroista otetaan näyte juoksevasta virrasta hyvän näytteenottotavan periaatteiden mukaisesti. Suurimpia virtoja ovat luultavimmin Trisomatille menevä virta sekä 9-halliin menevä, joten näille otetaan näytteet tasaisesti ajan yli juoksevasta virrasta, tavoitteena saada tasainen, edustava näyte, kooltaan n. 1 bigbagillinen.

Murskauksen alettua seurataan virran kulkua ja mikäli osoittautuu, että muidenkin virtojen kuin edellä mainittujen osalta näytettä kertyisi yli bigbagillinen, siirrytään ko. virran osalta ottamaan näytettä liikkuvasta virrasta. Mikäli jakeen suuruus jää alle bigbagilliseen, otetaan se talteen kokonaan. Alle muuttolaatikkollisen kokoista jacta ei analysoida, mutta sen olemassaolo kirjataan

ylös ja jae punnitaan. Näytteenottopaikkoja on 13, mutta kaikista ei välttämättä kerry analysoitavaa näytettä.

Näytteenoton toimittavat prosessin ajomies sekä Tatu Karlström. Pyöräkuormaaja avustaa tarvittaessa.

Pölynäytteet otetaan suoraan bigbageista, eli niitä ei erikseen kerätä talteen. Tähän syynä on prosessin sisältämä oma tehokas imurilaitteisto, joka estää ylimääräisen imurin liittämisen suoraan murskaimen yläpuolelle (joka olisi paras sijoituspaikka).

Koeajon päätyttyä kaikki jakeet punnitaan ja merkitään asianmukaisesti, Lahden laboratorion edellyttämällä tavalla.

Näytteiden käsittely ja analyysit

Seulonta tehdään massaltaan merkittävimmille jakeille, poislukien Trisomatin näytteet, joista syntyy automaattisesti >15mm ja <15mm jakeet. Seulonta, silloin kun se tehdään, tehdään kolmeen luokkaan (fine, coarse, mid), seulojen koot päätetään myöhemmin.

Analyysit tehdään noudatellen Michael Saulnyn diplomityön analyysejä. Analysointi tulee edellyttämään pyriittisulatuksen tekemistä useille näytteille joka vie aikaa – tämän takia mm. seulomalla tuotettujen lisänäytteiden määrä tulisi pitää mahdollisimman pienenä.

Näytteet varastoidaan ja merkitään asianmukaisesti (vrt. Saulnyn käyttämä menetelmä). Säilytyspaikasta neuvoteltava erikseen.

LIITE 3. Laboratorion tulosraportti.

				011SU/0
				Sulatettu
Näytenumero	Tulopäivä	Ottopäivämäärä	Näytteen nimi	
15MS00045	5.11.2015 10:45	4.11.2015	Rumpumagneetin alta	
15MS00046	5.11.2015 10:45	4.11.2015	8) Sykloni	
15MS00047	5.11.2015 10:45	4.11.2015	9) Sykloni vihreä	
15MS00048	5.11.2015 10:45	4.11.2015	10) Sykloni	
15PS00061	2.11.2015	22.10.2015	4) Jätekoppi	11.12.2015 0:00
15PS00062	2.11.2015	22.10.2015	5) R23 Eddyn suojamagneetti	18,11
15PS00063	2.11.2015	22.10.2015	7) Trisomat ylite (> 15 mm)	16,11
15PS00064	2.11.2015	22.10.2015	12) HD-magneetti	13,11
15PS00065	2.11.2015	22.10.2015	6.1) Trisomat alite	19,11
15PS00066	17.11.2015	22.10.2015	Rumpumagneetti <15mm	26,11
15PS00067	17.11.2015	22.10.2015	Rumpumagneetti >15mm	27,11
15PS00068	16.11.2015	22.10.2015	Eddy tuote <15mm	24,11
15PS00069	16.11.2015	22.10.2015	Eddy tuote >15mm	25,11
		Au_kok_NE/1	Au_kok/0	
		ICP, Au, pitoisuus näyte- erässä	ICP, Au, määrä koko erässä	
Näytteen nimi		g/tn	kg	
Rumpumagneetin alta		18	0,00002	
8) Sykloni		<15	0	
9) Sykloni vihreä		<15	0	
10) Sykloni		<15	0	
4) Jätekoppi		<15		
5) R23 Eddyn suojamagneetti		<15		
7) Trisomat ylite (> 15 mm)		<15		
12) HD-magneetti		<15		
6.1) Trisomat alite		<15		
Rumpumagneetti <15mm		<15		
Rumpumagneetti >15mm		<15		
Eddy tuote <15mm		<15		
Eddy tuote >15mm		<15		
		Pd_kok_NE/1	Pd_kok/0	
		ICP, Pd, pitoisuus näyte- erässä	ICP, Pd, määrä koko erässä	
Näytteen nimi		g/tn	kg	
Rumpumagneetin alta		20	0,00002	
8) Sykloni		<15	0	
9) Sykloni vihreä		20	0	
10) Sykloni		<15	0	
4) Jätekoppi		<15		
5) R23 Eddyn		<15		

suojamagneetti			
7) Trisomat ylite (> 15 mm)		<15	
12) HD-magneetti		<15	
6.1) Trisomat alite		<15	
Rumpumagneetti <15mm		<15	
Rumpumagneetti >15mm		<15	
Eddy tuote <15mm		<15	
Eddy tuote >15mm		<15	
		Pt_kok_NE/1	Pt_kok/0
		ICP, Pt, pitoisuus näyte- erässä	ICP, Pt, määrä koko erässä
Näytteen nimi		g/tn	kg
Rumpumagneetin alta		<15	0
8) Sykloni		<15	0
9) Sykloni vihreä		<15	0
10) Sykloni		<15	0
4) Jätekoppi		<15	
5) R23 Eddyn suojamagneetti		<15	
7) Trisomat ylite (> 15 mm)		<15	
12) HD-magneetti		<15	
6.1) Trisomat alite		<15	
Rumpumagneetti <15mm		<15	
Rumpumagneetti >15mm		<15	
Eddy tuote <15mm		<15	
Eddy tuote >15mm		<15	
		Ag_kok_NE/1	Ag_kok/0
		ICP, Ag, pitoisuus näyte- erässä	ICP, Ag, määrä koko erässä
Näytteen nimi		g/tn	kg
Rumpumagneetin alta		287	0,00024
8) Sykloni		59	0
9) Sykloni vihreä		304	0,00007
10) Sykloni		129	0,00003
4) Jätekoppi		319	
5) R23 Eddyn suojamagneetti		465	
7) Trisomat ylite (> 15 mm)		238	
12) HD-magneetti		440	
6.1) Trisomat alite		460	
Rumpumagneetti <15mm		128	
Rumpumagneetti >15mm		41	
Eddy tuote <15mm		404	
Eddy tuote >15mm		120	
		Cu_kok_NE/1	Cu_kok/0
		ICP, Cu, pitoisuus näyte- erässä	ICP, Cu, määrä koko erässä

Näytteen nimi		%	kg
Rumpumagneetin alta		0,823	0,00693
8) Sykloni		0,507	0,0002
9) Sykloni vihreä		0,546	0,0013
10) Sykloni		0,567	0,00133
4) Jätekoppi		3,59	
5) R23 Eddyn suojamagneetti		11,2	
7) Trisomat ylite (> 15 mm)		23,7	
12) HD-magneetti		13,6	
6.1) Trisomat alite		22,8	
Rumpumagneetti <15mm		2,5	
Rumpumagneetti >15mm		1,36	
Eddy tuote <15mm		22,6	
Eddy tuote >15mm		12	
		Al_kok_NE/1	Al_kok/0
		ICP, Al, pitoisuus näyte-erässä	ICP, Al, määrä koko erässä
Näytteen nimi		%	kg
Rumpumagneetin alta		1,29	0,01088
8) Sykloni		7,69	0,003
9) Sykloni vihreä		2,53	0,00601
10) Sykloni		3,38	0,00795
4) Jätekoppi		4,62	
5) R23 Eddyn suojamagneetti		2,7	
7) Trisomat ylite (> 15 mm)		3,1	
12) HD-magneetti		4,31	
6.1) Trisomat alite		2,49	
Rumpumagneetti <15mm		1,71	
Rumpumagneetti >15mm		1,93	
Eddy tuote <15mm		11,4	
Eddy tuote >15mm		48,7	
		Cr_kok_NE/1	Cr_kok/0
		ICP, Cr, pitoisuus näyte-erässä	ICP, Cr, määrä koko erässä
Näytteen nimi		%	kg
Rumpumagneetin alta		0,018	0,00015
8) Sykloni		0,037	0,00001
9) Sykloni vihreä		0,026	0,00006
10) Sykloni		0,061	0,00014
4) Jätekoppi		0,06	
5) R23 Eddyn suojamagneetti		0,175	
7) Trisomat ylite (> 15 mm)		0,083	
12) HD-magneetti		0,265	
6.1) Trisomat alite		0,123	

Rumpumagneetti <15mm		0,051	
Rumpumagneetti >15mm		0,07	
Eddy tuote <15mm		0,043	
Eddy tuote >15mm		0,143	
		Mg_kok_NE/1	Mg_kok/0
		ICP, Mg, pitoisuus näyte- erässä	ICP, Mg, määrä koko erässä
Näytteen nimi		%	kg
Rumpumagneetin alta		2,94	0,02471
8) Sykloni		1,06	0,00041
9) Sykloni vihreä		0,573	0,00136
10) Sykloni		2,89	0,0068
4) Jätekoppi		0,454	
5) R23 Eddyn suojamagneetti		0,275	
7) Trisomat ylite (> 15 mm)		0,395	
12) HD-magneetti		0,36	
6.1) Trisomat alite		0,434	
Rumpumagneetti <15mm		0,296	
Rumpumagneetti >15mm		0,232	
Eddy tuote <15mm		0,424	
Eddy tuote >15mm		0,459	
		Mn_kok_NE/1	Mn_kok/0
		ICP, Mn, pitoisuus näyte- erässä	ICP, Mn, määrä koko erässä
Näytteen nimi		%	kg
Rumpumagneetin alta		0,464	0,00391
8) Sykloni		0,527	0,00021
9) Sykloni vihreä		5,41	0,01287
10) Sykloni		1,17	0,00276
4) Jätekoppi		2,67	
5) R23 Eddyn suojamagneetti		5,36	
7) Trisomat ylite (> 15 mm)		0,054	
12) HD-magneetti		0,434	
6.1) Trisomat alite		0,134	
Rumpumagneetti <15mm		9,91	
Rumpumagneetti >15mm		1,75	
Eddy tuote <15mm		0,062	
Eddy tuote >15mm		0,279	
		Ni_kok_NE/1	Ni_kok/0
		ICP, Ni, pitoisuus näyte- erässä	ICP, Ni, määrä koko erässä
Näytteen nimi		%	kg
Rumpumagneetin alta		0,091	0,00077
8) Sykloni		0,104	0,00004
9) Sykloni vihreä		0,237	0,00056

10) Sykloni		0,242	0,00057
4) Jätekoppi		0,197	
5) R23 Eddyn suojamagneetti		0,917	
7) Trisomat ylite (> 15 mm)		0,069	
12) HD-magneetti		0,355	
6.1) Trisomat alite		0,14	
Rumpumagneetti <15mm		1,1	
Rumpumagneetti >15mm		0,153	
Eddy tuote <15mm		0,064	
Eddy tuote >15mm		0,065	
		Pb_kok_NE/1	Pb_kok/0
		ICP, Pb, pitoisuus näyte- erässä	ICP, Pb, määrä koko erässä
Näytteen nimi		%	kg
Rumpumagneetin alta		2,14	0,01799
8) Sykloni		0,534	0,00021
9) Sykloni vihreä		1,53	0,00364
10) Sykloni		2,32	0,00546
4) Jätekoppi		1,32	
5) R23 Eddyn suojamagneetti		1,53	
7) Trisomat ylite (> 15 mm)		0,789	
12) HD-magneetti		2,26	
6.1) Trisomat alite		1,57	
Rumpumagneetti <15mm		0,449	
Rumpumagneetti >15mm		0,248	
Eddy tuote <15mm		0,549	
Eddy tuote >15mm		0,228	
		Sn_kok_NE/1	Sn_kok/0
		ICP, Sn, pitoisuus näyte- erässä	ICP, Sn, määrä koko erässä
Näytteen nimi		%	kg
Rumpumagneetin alta		0,339	0,00285
8) Sykloni		0,079	0,00003
9) Sykloni vihreä		0,779	0,00185
10) Sykloni		0,188	0,00044
4) Jätekoppi		0,307	
5) R23 Eddyn suojamagneetti		2,24	
7) Trisomat ylite (> 15 mm)		1,18	
12) HD-magneetti		3,04	
6.1) Trisomat alite		1,54	
Rumpumagneetti <15mm		0,898	
Rumpumagneetti >15mm		0,509	
Eddy tuote <15mm		1,08	
Eddy tuote >15mm		0,357	

		Zn_kok_NE/1	Zn_kok/0
		ICP, Zn, pitoisuus näyte- erässä	ICP, Zn, määrä koko erässä
Näytteen nimi		%	kg
Rumpumagneetin alta		2,03	0,0171
8) Sykloni		1,37	0,00053
9) Sykloni vihreä		3,33	0,00792
10) Sykloni		3,43	0,00807
4) Jätekoppi		2,57	
5) R23 Eddyn suojamagneetti		3,07	
7) Trisomat ylite (> 15 mm)		1,09	
12) HD-magneetti		1,31	
6.1) Trisomat alite		1,27	
Rumpumagneetti <15mm		5,09	
Rumpumagneetti >15mm		0,36	
Eddy tuote <15mm		3,14	
Eddy tuote >15mm		1,2	
		Fe_kok_NE/1	Fe_kok/0
		ICP, Fe, pitoisuus näyte- erässä	ICP, Fe, määrä koko erässä
Näytteen nimi		%	kg
Rumpumagneetin alta		3,6	0,03029
8) Sykloni		9,06	0,00353
9) Sykloni vihreä		22,5	0,05346
10) Sykloni		13,4	0,03147
4) Jätekoppi			
5) R23 Eddyn suojamagneetti			
7) Trisomat ylite (> 15 mm)			
12) HD-magneetti			
6.1) Trisomat alite			
Rumpumagneetti <15mm			
Rumpumagneetti >15mm			
Eddy tuote <15mm			
Eddy tuote >15mm			

LIITE 4. Tulostaulukko.

NIMI	kg/h	Au		Pd		Ag		Cu		Al		Cr		Mg		Mn		Ni		Pb		Sn		Zn	
		g/t	kg/h	g/t	kg/h	g/t	kg/h	%	kg/h	%	kg/h	%	kg/h	%	kg/h	%	%	kg/h	%	kg/h	%	%	kg/h	%	kg/h
Syöte	6831,1	20,44	0,1	7,22	0	307	2,09	14,8	1009,6	4,0	275	0,1	6,83	0,3	17,1	1,6	109,98	0,2	15	0,9	61,5	1,3	88,80	1,7	113
Sykloni [4] (rengasmurskain)	28,4	<15	-	20	0,00	304	0,01	0,5	0,16	2,5	0,72	0,0	0,0	0,6	0,16	5,4	1,54	0,2	0,07	1,5	0,44	0,8	0,22	3,3	0,95
Syklonit [5 & 6] (rengasmurskain)	3,3	<15	-	<15	-	129	0,00	0,6	0,02	3,4	0,11	0,1	0,00	2,9	0,10	1,2	0,04	0,2	0,01	2,3	0,08	0,2	0,01	3,4	0,11
Hihnapöly [7] (rumpumagneetin alta)	4,7	18	0,00	20	0,00	287	0,00	0,8	0,04	1,3	0,06	0,0	0,0	2,9	0,14	0,5	0,02	0,1	0,00	2,1	0,10	0,3	0,02	2,0	0,09
Sykloni [17] (rumpumagneetti ym.)	0,1	<15	-	<15	-	59	0,00	0,5	0,00	7,7	0,01	0,0	0,0	1,1	0,00	0,5	0,00	0,1	0,00	0,5	0,00	0,1	0,00	1,4	0,00
Rumpumagneetti [7] (<15mm)	1014,4	<15	-	<15	-	128	0,13	2,5	25,36	1,7	17,35	0,1	0,52	0,3	3,00	9,9	100,52	1,1	11,16	0,4	4,55	0,9	9,11	5,1	51,63
Rumpumagneetti [7] (>15mm)	731,0	<15	-	<15	-	41	0,03	1,4	9,94	1,9	14,11	0,1	0,51	0,2	1,70	1,8	12,79	0,2	1,12	0,2	1,81	0,5	3,72	0,4	2,63
Jätekoppi [12]	60,7	<15	-	<15	-	319	0,02	3,6	2,18	4,6	2,80	0,1	0,04	0,5	0,28	2,7	1,62	0,2	0,12	1,3	0,80	0,3	0,19	2,6	1,56
Vetotelamagneetti [13]	424,9	<15	-	<15	-	465	0,20	11,2	47,59	2,7	11,47	0,2	0,74	0,3	1,17	5,4	22,77	0,9	3,90	1,5	6,50	2,2	9,52	3,1	13,04
Eddy tuote [14] <15mm	360,7	<15	-	<15	-	404	0,15	22,6	81,52	11,4	41,12	0,0	0,16	0,4	1,53	0,1	0,22	0,1	0,23	0,5	1,98	1,1	3,90	3,1	11,33
Eddy tuote [14] >15mm	647,1	<15	-	<15	-	120	0,08	12,0	77,65	48,7	315,1	0,1	0,93	0,5	2,97	0,3	1,81	0,1	0,42	0,2	1,48	0,4	2,31	1,2	7,77
HD-magneetti [15]	284	<15	-	<15	-	440	0,12	13,6	38,62	4,3	12,24	0,3	0,75	0,4	1,02	0,4	1,23	0,4	1,01	2,3	6,42	3,0	8,63	1,3	3,72
Trisomat-seulan alite [16] (<15mm)	1648,3	<15	-	<15	-	460	0,76	22,8	375,82	2,5	41,04	0,1	2,03	0,4	7,15	0,1	2,21	0,1	2,31	1,6	25,88	1,5	25,38	1,3	20,93
Trisomat-seulan ylite [16] (>15mm)	1381,1	<15	-	<15	-	238	0,33	23,7	327,32	3,1	42,81	0,1	1,15	0,4	5,46	0,1	0,75	0,1	0,95	0,8	10,90	1,2	16,30	1,1	15,05
Talteenottomäärä kg/h			0		0		1,8		986,2		499		6,8		24,7		145,5		21,3		60,9		79,3		129