



**Aalto-yliopisto**  
Kemian tekniikan  
korkeakoulu

**Kemian tekniikan korkeakoulu**  
**Materiaalitekniikan koulutusohjelma**

**Michael Saulny**

**PIIRIKORTTIEN KÄYTTÄYTYMINEN LEIKKAAVASSA  
MURSKAUKSESSA JA SEN VAIKUTUKSET KIERRÄTYSPROSESSIIN**

**Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-  
insinöörin tutkintoa varten Espoossa 30.10.2015.**

**Valvoja**

**Professori Pekka Taskinen**

**Ohjaajat**

**Diplomi-insinööri Leena Tuominen**

**Diplomi-insinööri Sini Eskonniemi**

---

**Tekijä** Michael Saulny

---

**Työn nimi** Piirikorttien käyttäytyminen leikkaavassa murskauksessa ja sen vaikutukset kierrätysprosessiin

---

**Laitos** Materiaalitekniikan laitos

---

**Professori** Metallurginen termodynamiikka ja **Professuurikoodi** MT-37 mallinnus

---

**Työn valvoja** Pekka Taskinen

---

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

---

**Päivämäärä** 30.10.2015

**Sivumäärä** 101

**Kieli** suomi

---

## Tiivistelmä

Piirilevy on erityisen mielenkiintoinen ja haluttu kierrätystuote, sillä se sisältää kirjavan joukon arvokkaita metalleja kuparista jalometalleihin. Piirikorttien kierrättämisen päätavoite on metallien maksimaalinen talteenotto ja täten arvon tuottaminen. Suurin taloudellinen ongelma piilee yksinkertaisesti siinä, että piirikorttien kierrätys on osittain puutteellista, jolloin hintavia metalleja päätyy murskaus- ja erotusprosessien kombinaation myötä väärin fraktioihin tai häviää pahimmillaan pölyihin. Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia piirilevyjen murskausmekanismeja pyöröleikkurilla sekä yrittää ymmärtää, miten kyseinen murskaus heijastuu erotettujen jakeiden materiaalisäältöihin.

Diplomityössä tuli selkeästi ilmi, että tehokkaammalla ja intensiivisemmällä murskaamisella saadaan partikkelikokoa pienennettyä, minkä ansiosta materiaalit irtautuvat toisistaan paremmin. Tällöin saadaan kasvatettua haluttujen metallien talteenottoprosenttia, mutta se johtaa luonnollisesti myös runsaampaan pölyjen muodostumiseen murskauksen yhteydessä. Lisäksi on huomattava, että perinpohjainen kierrätysvirtojen hienontaminen nostaa tuotanto-, energia- ja työ kustannuksia, eikä se silti takaa kaikkien materiaali-osien irtautumista toisistaan.

Murskausterien tylsistymisen ei havaittu vaikuttavan erityisemmin syntyneisiin jakeisiin. Samoin seulontakokeet paljastivat, että mikään metalli ei suosinut tiettyä partikkelikokoa. Murskauskokeissa otettiin talteen myös pölynäytteitä, jotka todistavat arvokkaiden metallien vapautuvan pieninä partikkeleina pölyihin. Lisäksi jalometallien taseissa havaittiin melko suuret hävikit. Tutkimustulosten perusteella suosittelen jalometallirikkaan pölyn jatkorikastamista, niille erillisten myyntikanavien etsimistä tai yrityksen sisäisten liuotusprosessien kehittämistä sekä prosessointilinjaston tiivistämistä, jotta jalometallihävikkejä voitaisiin pienentää.

---

**Avainsanat** Kierrätys, piirilevy, SER, murskaus, pölyt, jalometallit, hävikki

---

---

**Author** Michael Saulny

---

**Title of thesis** The behaviour of printed circuit boards in knife shredder and its effects on the recycling process

---

**Department** Department of Materials Science and Engineering

---

**Professorship** Metallurgical Thermodynamics and **Code of professorship**  
Modelling MT-37

---

**Thesis supervisor** Pekka Taskinen

---

**Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s)** Leena Tuominen and Sini Eskonniemi

---

**Date** 30.10.2015

**Number of pages** 101

**Language** Finnish

---

## Abstract

Printed circuit boards are particularly interesting recycling products because they contain diverse amount of valuable metals from copper to precious metals. The main focus in recycling printed circuit boards consists of maximal recovery of metals and thereby generates value. The biggest economical issue is related to inadequate recycling process in which case valuable metals end up in wrong fractions or vanish into dust due to combination of crushing and separation processes. The object of this thesis is to study the crushing mechanisms of PCBs in a knife shredder and to try to understand how it reflects to the material content of separated fractions.

In this study it was evident that with more intensive and effective crushing we can decrease the particle size which results in better degree of disconnection. In that case we can achieve higher degree of recovery but it also means creating larger amount of dust in crushing phase. In addition, thorough crushing increases production and energy costs as well as labor expenditure and it still doesn't ensure perfect disconnection of materials.

The blunting of edges in knife shredder didn't seem to have any particularly effect to the separated fractions. Also the sieving tests revealed that no metal favored any particle size. In the crushing tests we captured dust samples which prove the liberation of small particles of precious metals into dust. The formed mass balances indicate quite big losses of precious metals. Based on research results I recommend further enrichment of captured dust, separate sale channels or development of leaching processes as well as sealing off the process itself so that we can minimize the losses of precious metals.

---

**Keywords** Recycling, PCB, WEEE, crushing, dust, precious metals, loss

---

## **Esipuhe**

Tämä diplomityö toteutettiin Kuusakoski Oy:lle osana ARVI (Material Value Chains, Materiaalien arvovirrat) –tutkimusohjelmaa. Haluan kiittää valvojaani professori Pekka Taskista neuvoista ja opastuksesta työn aikana sekä rohkaisevasta asenteesta erinäköisten haasteiden selättämiseksi. Valtava kiitos ohjaajilleni, Leena Tuomiselle ja Sini Eskonniemelle, jotka antoivat suuret työpanokset auttaakseen minut alati muuttuvista tutkimuskysymyksistä kansitettuun työhön.

Haluan kiittää Kuusakoskea tästä tutkimusmahdollisuudesta sekä erityisesti teknologiajohtaja Jyri Taljaa innostavasta johtamistavasta ja ennakkoluulottomasta kehitystyöstä. Haluan myös kiittää Antti Kukkolaa, Jaakko Savolaista, Matti Vaajamaa, Jussi-Pekka Partiota ja Arsi Saukkolaa yhteistyöstä tutkimuksen toteutuksessa ja tulosten arvioinnissa. Lisäksi haluan erityisesti kiittää Kuusakosken laboratoriotiimiä, Panu Parviaista, Maria Lehtistä ja Maiju Lehtistä, näytteiden nopeasta ja ammattimaisesta käsittelystä.

Osoitan huikeat kiitokset Vuorimieskillalle, FTMK 12:lle, ajo-opettajalleni Veiko Sompalle sekä kaikille koulukavereilleni! Te teitte opiskeluvuosistani ikimuistoisen kokemuksen vailla vertaa! Lopuksi haluan vielä lämpimästi kiittää vanhempiani ja sisaruksiani tuesta sekä erityisesti kihlattuani Emmiä, joka on valaissut elämäni lähtemättömällä tavalla.

Espoo, 30.10.2015

Michael Saulny



## Sisällysluettelo

|     |                                                                              |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1   | Johdanto .....                                                               | 1  |
| 2   | Sähkö- ja elektroniikkaromu .....                                            | 3  |
| 2.1 | Sähkö- ja elektroniikkaromu yleisesti .....                                  | 3  |
| 2.2 | Piirikortit kierrätystuotteena .....                                         | 9  |
| 2.3 | Lainsäädäntö .....                                                           | 14 |
| 3   | Piirikorttien kierrätysprosessi .....                                        | 19 |
| 3.1 | Manuaalinen erottelu ja purku .....                                          | 19 |
| 3.2 | Leikkaava murskaus .....                                                     | 22 |
| 3.3 | Magneettinen erottelu .....                                                  | 24 |
| 3.4 | Pyörrevirtaerotin.....                                                       | 26 |
| 4   | Rikkoutumis- ja irtautumismekanismit.....                                    | 29 |
| 4.1 | Liitoskohdat.....                                                            | 30 |
| 4.2 | Piirikorttien murskautuvuus .....                                            | 33 |
| 4.3 | Murskauksessa vapautuva pöly .....                                           | 41 |
| 5   | Koejärjestelyt .....                                                         | 46 |
| 5.1 | Prosessointilinjan esittely .....                                            | 46 |
| 5.2 | Koemateriaalin esittely .....                                                | 47 |
| 5.3 | Koeajot ja näytteenotto .....                                                | 48 |
| 5.4 | Näytteiden käsittely ja analysointi.....                                     | 57 |
| 6   | Tulokset ja tulosten tarkastelu .....                                        | 64 |
| 6.1 | Erotettujen jakeiden hienon ja karkean partikkelikoon analyysitulokset ..... | 65 |
| 6.2 | Murskauksessa vapautuneiden pölyjen analyysitulokset.....                    | 69 |
| 6.3 | Analyysitulokset massan jakautumisen suhteen .....                           | 74 |
| 6.4 | Magneettisen fraktion irtautumisasteet.....                                  | 82 |
| 7   | Johtopäätökset .....                                                         | 87 |
| 8   | Yhteenveto.....                                                              | 90 |
| 9   | Jatkotutkimuskohteita ja ehdotuksia .....                                    | 95 |
| 10  | Lähdeluettelo .....                                                          | 96 |

## **Symbolit ja lyhenteet**

ABS - Akrylinitriilibutadienistyreeni

BFRs - Palonsuoja-aineet

HIPS - Iskunkestävä Polystyreeni

ICP - Inductively coupled plasma mass spectrometry, induktiivisesti kytketty plasma-massaspektrometria

Degree of disconnection - irtautumisaste

LCD - Liquid Crystal Display, nestekidenäyttö

PC - Polykarbonaatti

PPO - Polyfenyleenioksidi

Degree of liberation - puhtaaksijauhatusaste

Pyöröleikkuri - leikkaava murskain, rotary shear, circular shear, knife shredder, shear shredder

RoHS - The Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment

SEM - Scanning Electron Microscope, Pyyhkäisyelektronimikroskooppi

SER - sähkö- ja elektroniikkaromu

WEEE - Waste Electrical & Electronic Equipment

# 1 Johdanto

Kiihtyvän teknologisen kehityksen myötä sähkö- ja elektroniikkalaitteista on tullut lähtemätön osa ihmisten jokapäiväistä arkea. Samalla laitteiden lyhentynyt elinikä ja tavoitellun elintason ylläpitäminen ovat kasvattaneet hellittämätöntä kulutusvimmaa ja vieläkin tihenevää ostosykliä. Globaalin elintason paranemisen myötä sähkö- ja elektroniikkalaitteet eivät ole enää vain länsimaalaisten etuoikeus, vaan yhä useammalla kehittyvien maiden kansalaisella on mahdollisuus myös Suomessa totuttuihin luksustuotteisiin. Sähkö- ja elektroniikkaromusta on tullutkin yksi maailman nopeimmin kasvavista kierrätysvirroista. Maailmanlaajuisesti tarkasteltuna sähkö- ja elektroniikkaromua tuotetaan jopa 45 miljoonaa tonnia vuosittain ja määrän arvioidaan kasvavan lähitulevaisuudessa eksponentiaalisesti (Ghosh et al. 2015).

Sen sijaan, että näin hälyttävän suuri sähkö- ja elektroniikkaromumäärä mielletäisiin haitallisena jätteenä, sen merkitys on korostunut ennen kaikkea resurssirikkaana raaka-ainelähteenä. Heterogeenisestä sähkö- ja elektroniikkaromujoukosta ehdottomasti kiinnostavimmat komponentit kierrätysliiketoiminnan kannalta ovat piirilevyt. Piirilevyistä, tai toisin sanoen piirikorteista, löytyy runsaasti melko helposti hyödynnettäviä perusmetalleja sekä suhteellisen korkeita jalometallipitoisuuksia, jotka voivat helposti ylittää moninkertaisesti primääriraaka-aineena käytettävien malmien vastaavat jalometallipitoisuudet. Valitettavasti piirilevyjen sisältämät arvokkaat metallit sijaitsevat siroteltuna monimutkaisissa komponenteissa ja osissa, joista löydetään myös ihmisille ja ympäristölle haitallisia materiaaleja. Piirikorttien kierrättäminen on haastavaa, sillä ne vaihtelevat tyypin, koon ja muodon mukaan, minkä lisäksi niiden sisältämä materiaali- ja komponenttikirjo on todella laaja.

Kuitenkin runsaan kupari- ja jalometallimäärän ansiosta piirilevyjen kierrättämiselle on korkea taloudellinen kannustin. Piirikorttien kierrättäminen tarkoittaa tyypillisesti jonkinasteista purkamista emolaitteestaan, murskausta pyöröleikkurilla johonkin partikkelikokoon, magneettista erotusta ja pyörrevirtaerotusta. Eroteltuja jakeita joko jatkojalostetaan edelleen tai myydään sellaisenaan sekundäärisenä raaka-aineena esimerkiksi pyrometallurgiseen prosessiin. Valitettavasti piirilevyjen kierrätys on osittain puutteellista, jolloin hintavia metalleja päättyy murskaus- ja erotusprosessien kombinaation myötä väärin fraktioihin tai häviää pahimmillaan pölyihin. Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia piirilevyjen murskausmekanismeja pyöröleikkurilla sekä yrittää ymmärtää, miten kyseinen murskaus heijastuu erotettujen jakeiden materiaalisisältöihin.

Ylätason teemaa voidaan jakaa tarkemmin määriteltyihin tutkimuskysymyksiin: Suosivatko metallit jotakin kokoluokkaa murskauksessa, ja olisiko tämän perusteella

suositeltavaa käyttää seulaa osana kierrätysprosessia? Vapautuuko murskauksessa pölyihin arvokkaita metalleja, ja mitä se tarkoittaa pölyjen käsittelyn kannalta? Miten metallit kulkeutuvat kierrätysprosessissa ja miten ne jakautuvat erotettuihin fraktioihin? Syntykö prosessissa hävikkejä? Voiko komponenttien irtautumisasteesta murskauksessa sanoa mitään? Vaikuttaako pyöröleikkurin terien tylsistyminen piirilevyjen murskaukseen ja siten eroteltuihin fraktioihin? Loppujen lopuksi, mikä olisi edellisten tutkimuskysymysten valossa optimaalinen piirilevyjen käsittelyprosessi?

Diplomityö aloitetaan kirjallisella osuudella. Kappaleessa 2 perehdytään yleisesti sähkö- ja elektroniikkaromuun, piirikorttien erityispiirteisiin kierrätettävyyden kannalta sekä toimintaa ohjaavaan lainsäädäntöön. Kappaleessa 3 keskitytään tämän diplomityön kannalta oleellisiin yksikköprosesseihin: manuaaliseen erotteluun ja purkuun, leikkaavaan murskaukseen, magneettiseen erotteluun ja pyörrevirtaerottimeen. Kappale 4 syventyy varsinaisiin piirilevyjen rikkoutumis- ja irtautumismekanismeihin. Aihetta käsitellään liitoskohtien, piirikorttien murskautuvuuden sekä murskauksessa vapautuneiden pölyjen näkökulmasta.

Kirjallisuusosion jälkeen päästää kokeelliseen osioon. Kuusakosken Espoon kierrätyslaitoksella murskattiin pyöröleikkurin juuri vaihdetuilla terävillä terillä korkea-arvoisia emolevypiirikortteja ja matala-arvoisia kuvaputkinäytön piirikortteja niin, että murskauksessa vapautuneet pölyt otettiin teollisuusimurilla talteen. Lisäksi matala-arvoisia kuvaputkinäytön piirikortteja murskattiin myöhemmin uudessa koeajossa tuotannon tylsistytämällä pyöröleikkurin terillä. Murskauksen lisäksi prosessiin kuului magneettinen erottelu ja pyörrevirtaerotin. Jokaisesta fraktiosta kerättiin näytteet, jotka seulottiin 15 mm seulalla Kuusakosken Lahden laboratoriotiloissa. Seulotut näytteet käsiteltiin pyriittisulatusuunilla ja analysoitiin ICP-analysaattorilla. Yllä mainittuja koejärjestelyjä ja näytteiden analysointia käsitellään tarkemmin kappaleessa 5. Saatuja analyysituloksia avataan kappaleessa 6 ja kappaleessa 7 hahmotellaan tulosten pohjalta perusteltuja johtopäätöksiä. Lopuksi diplomityön sisältö tiivistetään yhteenvetoon kappaleessa 8 sekä ehdotetaan jatkotutkimuskohteita kappaleessa 9.

## **2 Sähkö- ja elektroniikkaromu**

Sähkö- ja elektroniikkaromu on erityisen mielenkiintoinen ja haluttu kierrätystuote, sillä se sisältää kirjavien joukkojen arvokkaita metalleja kuparista jalometalleihin, joiden tarve on kasvanut lähiaikoina huomattavasti. Toisaalta sähkö- ja elektroniikkaromun kierrättämiseen sisältyy lukuisia haasteita. Liiketoiminnan kannalta arvostetut metallit löytyvät usein siroteltuna monimutkaisista komponenteista ja osista, joista löydetään myös ihmisille ja ympäristölle haitallisia materiaaleja. Kierrätysvastuusta ei voi kuitenkaan sanoutua irti, sillä elintason parantuminen kehittyvissä maissa, vuosikymmenten suuret teknologiaharppaukset ja laitteiden lyhentynyt elinikä ovat johtaneet sähkö- ja elektroniikkaromun valtavaan kasvuun. Pelkästään Euroopassa sähkö- ja elektroniikkaromua tuotetaan 12 miljoonaa tonnia vuodessa, ja määrän odotetaan kasvavan keskimäärin 4 % vuodessa, mikä on kolme kertaa enemmän kuin yhdyskuntajätteen kasvuprosentti (Reuter et al. 2013).

Sähkö- ja elektroniikkaromu käsittää valtavan heterogeenisen aparaattikategorian: kodinkoneet, tieto- ja teletekniset laitteet, kuluttajaelektroniikan, valaistuslaitteet, sähkö- ja elektroniikkatyökalut, lelut, vapaa-ajan- ja urheiluvälineet, terveydenhuollon laitteet, tarkkailu- ja valvontalaitteet sekä automaattit. Sähkö- ja elektroniikkaromuun liittyy monia erityispiirteitä, jotka heijastuvat sen kierrätysvaatimukseen niin lainsäädännöllisesti kuin prosessiteknisesti. Piirikortit ovat pieniä, mutta tärkeä osa SER:n kierrätystä, ja se on otettu arvokkaan materiaaliluonteensa takia tämän diplomityön keskiöön. Tässä kappaleessa johdatetaan sähkö- ja elektroniikkaromun erityisominaisuuksiin, syvennyttään piirikorttien rakenteeseen ja materiaalisisältöön sekä tarkastetaan, miten lainsäädäntö vaikuttaa piirikorttien kierrättämiseen.

### **2.1 Sähkö- ja elektroniikkaromu yleisesti**

Sähkö- ja elektroniikkalaitteiden tuotanto on kasvanut merkittävästi viimeisten kolmenkymmenen vuoden ajan, ja ne kuuluvat tiiviisti useiden ihmisten jokapäiväiseen elämään. Nopea teknologinen kehitys, markkinoiden laajentuminen kehittyviin maihin sekä yhä lyhyempi laitteiden elinikä ovat johtaneet myös sähkö- ja elektroniikkaromun määrän valtavaan kasvuun. Esimerkiksi pelkästään Intiassa arvioitiin vuosina 2007–2011 syntyneen sähkö- ja elektroniikkaromua 2,5 miljoonaa tonnia, ja vuosikasvu pysynee 7-10 prosentissa. (Ylä-Mella et al. 2014a; Hadi et al. 2015)

Ihmiset pitävät kierrätystä usein jalomielisenä tekona ja ympäristöäsiitusta keventävänä elementtinä, mutta kierrätykseen kytkeytyy myös tärkeä ideologia materiaalien kestävästä käytöstä sekä primääriraaka-aineen korvaamisesta. Kestävä materiaalitehokkuus ei ole kuitenkaan vain yksittäisten kierrätyslaitosten harteilla, vaan siihen tarvitaan myös kuluttajatietoisuutta sekä kierrätystä tukevaa infrastruktuuria ja lainsäädäntöä. Nämä ainekset mahdollistavat sekä taloudellisen että

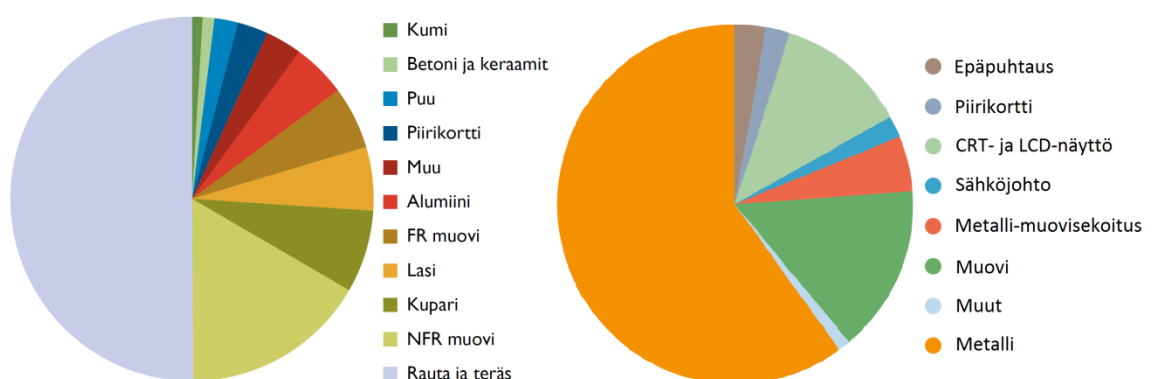
ympäristötietoisien sähkö- ja elektroniikkaromun käsittelyn. Sähkö- ja elektroniikkaromun kierrättämiseen liittyy kuitenkin lukuisia erityispiirteitä. (Ylä-Mella et al. 2014a)

Sähkö- ja elektroniikkaromujen käsittely on haastavaa heterogeenisen luonteensa vuoksi. Laitteet eroavat toisistaan niin ulkoisten dimensioiden kuin materiaalisäällön näkökulmasta. Tarkastelun ja käsittelyn selkeyttämisen vuoksi SER jaetaan WEEE-direktiivin (2012/19/EU) mukaan 10 luokkaan, jotka on esitelty taulukossa 1. Kuitenkin vuodesta 2018 lähtien jakoa tullaan pienentämään kuuteen luokkaan. Taulukosta 1 voidaan nähdä, minkälaiset laitteet kuuluvat sähkö- ja elektroniikkalaitteiden piiriin, kuinka ne lokeroitetaan ja minkälaisiin kierrätysasteisiin Suomessa on päästy vuonna 2012 ja minkälaisia kierrätystavoitteita EU asettaa vuodelle 2015–2018. Varsinaisesta WEEE-direktiivistä ja sen tavoitteista sekä haasteista kerrotaan lisää myöhemmin.

**Taulukko 1 Suomen elektroniikkaromujen hyötykäyttö ja kierrätysluvut vuonna 2012 ja tavoitteet vuodelle 2015–2018 (Eurostat 2014)**

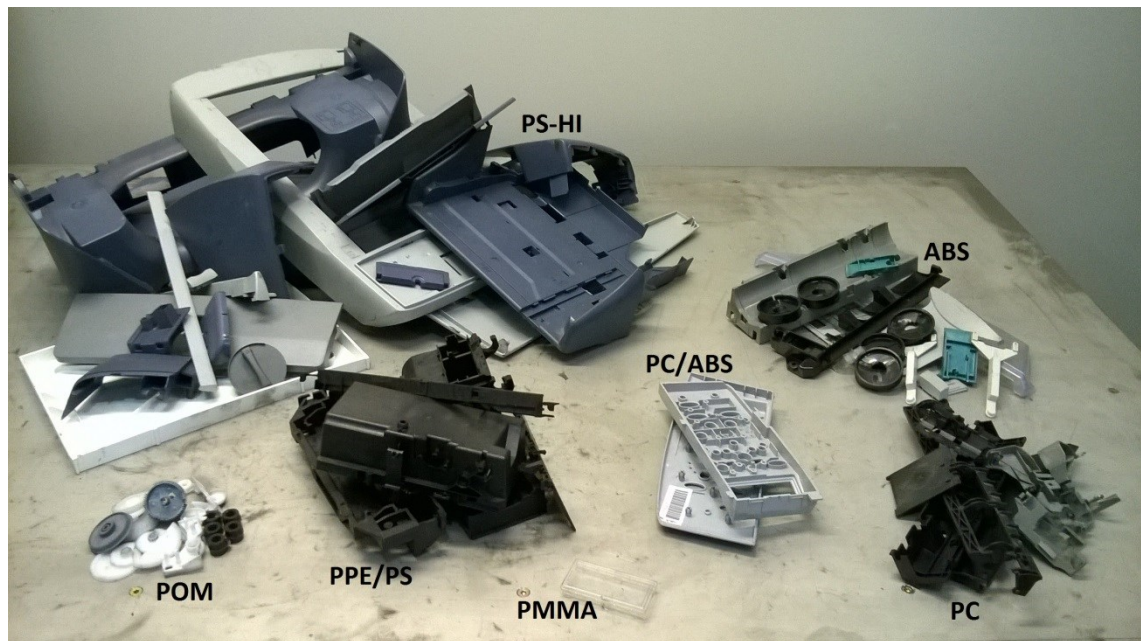
| Laitekohtainen luokkakajo            | Esimerkkejä luokan laitteista                   | Hyötykäyttö 2012 | Hyötykäyttö 2012  | Hyötykäyttötavoite 2015–2018 | Kokonaiskierrätys ja uudelleen käyttö 2012 | Kokonaiskierrätys ja uudelleen käyttö 2012 | Kierrätystavoite 2015–2018 |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------|-------------------|------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------|
|                                      |                                                 | 1000 kg          | Prosenttisuus (%) | Prosenttisuus (%)            | 1000 kg                                    | Prosentti (%)                              | Prosentti (%)              |
| Suuret kodinkoneet                   | kylmälait., pesukoneet, lämpöpäät.              | 24 492           | 92,4              | 85,0                         | 23 860                                     | 90                                         | 80                         |
| Pienet kodinkoneet                   | pölynimurit, leivänpaahtimet, kahvinkeitinimet, | 1 687            | 91,7              | 75,0                         | 1 622                                      | 88,2                                       | 55                         |
| Tieto- ja teletekniset laitteet      | tietokoneet, tulostimet, matkapuhelimet         | 6 876            | 90,9              | 80,0                         | 6 791                                      | 89,7                                       | 70                         |
| Kuluttajaelektroniikka               | televisiot, kamerat, äänentoistolait.           | 13 172           | 93,8              | 80,0                         | 12 951                                     | 92,2                                       | 70                         |
| Valaistuslait.                       | loisteputkivalaisi.                             | 239              | 95,2              | 75,0                         | 237                                        | 94,7                                       | 55                         |
| Sähkö- ja elektroniikkatyökalut      | porat, sahat                                    | 642              | 94,2              | 75,0                         | 638                                        | 93,7                                       | 55                         |
| Lelut, vapaa-ajan ja urheiluvälineet | videopelit                                      | 72               | 88,7              | 75,0                         | 71                                         | 87,3                                       | 55                         |
| Lääkinnälliset laitteet              | sädehoitolaitteet                               | 21               | 92,3              | 75,0                         | 19                                         | 86,5                                       | 55                         |
| Tarkkailu- ja valvontalait.          | paloilmaisimet, termostaat.                     | 86               | 87,2              | 75,0                         | 83                                         | 84,8                                       | 55                         |
| Automaatit                           | juoma- ja raha-automaatit,                      | 390              | 99,1              | 85,0                         | 329                                        | 83,6                                       | 80                         |

Nykyaikaiset elektroniikkalaitteet voivat pitää sisällään yli 60 erilaista alkuainetta (Hadi et al. 2015). Tyypillisin SER:n materiaalis sisältö on nähtävissä kuvasta 1, jonka mukaan yli puolet sähkö- ja elektroniikkaromun painosta koostuu metalleista, joista tärkeimmät ovat rauta ja teräs, alumiini sekä kupari. SER:sta löytyvät jalometallit edustavat hyvin pientä osaa kaikista metalleista, mutta niiden arvo voi olla hyvin merkittävä kierrätysliiketoiminnan kannalta. Esimerkiksi yhdessä tonnissa tietokoneromua on enemmän kultaa kuin 17 tonnissa malmia (Yamane et al. 2011). Sähkö- ja elektroniikkaromu voi myös sisältää pieniä määriä harvinaisia maametalleja, kuten seleeniä, telluuria, vismuttia, antimonia ja indiumia (Chancerel et al. 2009).



**Kuva 1 Sähkö- ja elektroniikkaromun heterogeeninen sisältö (Ignatius et al. 2009; Reuter et al. 2013)**

SER:n muovipitoisuus vaihtelee rajusti muutamasta prosentista yli 70 prosenttiin. Yleisimmät SER:sta löytyvät muovit ovat akrylinitriilibutadieenistyreeni (ABS), polykarbonaattimuovi (PC), edellisten seokset, iskunkestävä polystyreeni (HIPS) ja polyfenyleenioksidiseokset (PPO) (Ignatius et al. 2009). Kuusakoski on viime aikoina tutkinut paljon sähkö- ja elektroniikkaromun muoviosien taloudellisen potentiaalin valjastamista osaksi tuotantoa. Valitettavasti SER:n muoviosat ovat hankalasti hyödynnettävissä, sillä neitseellisen polymeeriraaka-aineen hinta on alhainen, polymeerien laatu ja uudelleenkäytettävyys heikkenevät ajan myötä, puhtausvaatimukset ovat korkeat ja seosaineiden toleranssirajat ovat tiukat. Kaiken lisäksi muoviosien valmistajat haluavat yleensä vain tiettyä tarkasti määritettyä polymeerityyppiä, mutta jo yhdessä laitteessa voi olla kymmeniä eri muovilaatuja, joiden erottaminen toisistaan kannattavasti on lähes mahdotonta. Kuvassa 2 on nähtävissä yksi esimerkki tulostimen muoviosien lajittelusta polymeerityyppien mukaan.



Kuva 2 Tulostimen muoviosien lajittelua polymeerityypin mukaan (Malin 2015)

Sähkö- ja elektroniikkaromujen kierrätyksen haastavuutta lisää entisestään niiden muuttuvat materiaalisällöt sekä jätevirrat, minkä vuoksi tällä hetkellä paras kierrätyksen prosessointimenetelmä voi ollakin jo 10 vuoden päästä vääränlainen. Kun esimerkiksi kuluttajat ovat siirtyneet kuvaputkitelevisioista litteisiin LCD-, plasma- ja led-televisioihin, kierrätyslaitosten on ollut pakko uusia toiminta- ja prosessimenetelmiään vastaamaan nykyhetkeä ja tulevaisuuden kierrätysaasteita. (Ignatius et al. 2009)

Meinander et al. (2012) tutkivat SER:n potentiaalista kierrätysarvoa, ja huomasivat sen oleva huomattavasti matalampi verrattuna konkreettiseen kierrätyksestä saatuun arvoon. Kyseinen ero johtui lähinnä hajautetuista jalometalleista, hankalasti erotettavista, mutta arvokkaista muoveista sekä harvinaisista maametalleista, joita ei otettu talteen. Analyysissä selvisi myös, että suurempi painoon perustuva keräysaste ei välttämättä tarkoita parempaa potentiaaliarvon hyödyntämistä. Pelkästään jalometallien talteenottoprosenttia parantamalla SER:n kierrätysliiketoiminnasta saataisiin kannattavampaa. Tämä on myös nähtävissä taulukosta 2, jossa pieni määrä jalometalleja voi kuitenkin muodostaa suuren osan elektroniikkalaitteen arvosta.



**Taulukko 2** Eräiden SER:n osien ja laitteiden tiettyjen metallien paino-osuus verrattuna niiden arvo-osuuteen (Reuter et al. 2013)

| Paino-osuus   | Fe   | Al   | Cu   | Muovit | Ag (ppm) | Au (ppm) | Pd (ppm) |
|---------------|------|------|------|--------|----------|----------|----------|
| CRT-piirilevy | 30 % | 15 % | 10 % | 28 %   | 280      | 20       | 10       |
| Emolevy       | 7 %  | 5 %  | 18 % | 23 %   | 900      | 200      | 80       |
| Matkapuhelin  | 7 %  | 3 %  | 13 % | 43 %   | 3000     | 320      | 120      |
| MP3-soitin    | 23 % | 1 %  | 21 % | 47 %   | 150      | 10       | 4        |
| DVD-soitin    | 62 % | 2 %  | 5 %  | 24 %   | 115      | 15       | 4        |
| Taskulaskin   | 4 %  | 5 %  | 3 %  | 61 %   | 260      | 50       | 5        |

| Arvo-osuus    | Fe   | Al   | Cu   | Jalom.<br>yht. | Ag   | Au   | Pd   |
|---------------|------|------|------|----------------|------|------|------|
| CRT-piirilevy | 4 %  | 14 % | 35 % | 47 %           | 7 %  | 33 % | 7 %  |
| Emolevy       | 0 %  | 1 %  | 13 % | 86 %           | 5 %  | 69 % | 12 % |
| Matkapuhelin  | 0 %  | 0 %  | 6 %  | 93 %           | 11 % | 71 % | 11 % |
| MP3-soitin    | 3 %  | 1 %  | 73 % | 21 %           | 4 %  | 16 % | 3 %  |
| DVD-soitin    | 15 % | 3 %  | 30 % | 52 %           | 5 %  | 42 % | 5 %  |
| Taskulaskin   | 1 %  | 4 %  | 10 % | 85 %           | 6 %  | 76 % | 3 %  |

Chancerel et al. ovat paneutuneet tähän ongelmaan (2009) ja tutkivat sähkö- ja elektroniikkaromun jalometallien kulkeutumista kierrätysprosessissa. Sähkö- ja elektroniikkaromun kaikesta hopeasta vain 12 painoprosenttia päätyi sellaiseen fraktioon, josta se on mahdollista ottaa talteen. Hopeasta kulkeutui muun muassa 35 painoprosenttia ferromagneettiseen fraktioon ja 29 painoprosenttia päätyi muoveihin. Kullasta ja palladiumista vain 26 % kulkeutui talteenoton mahdollistavaan jakeeseen. Sähkö- ja elektroniikkaromua prosessoivan laitoksen kannalta tilanne on turhauttava, sillä kyseiset jalometallihäviöt ovat automaattisesti pois yrityksen tuloksesta. Vuoden 2009 markkinahintojen mukaan kierrätyslaitos menettäisi näiden lukujen valossa teoreettisesti 524 \$ kullan ja 70 \$ palladiumin arvosta per tonni sähkö- ja elektroniikkaromua.

SER sisältää arvokkaiden materiaalien lisäksi myös haitallisia ja myrkyllisiä aineita, kuten raskaita metalleja, Polykloorattuja bifenyyliejä (PCB-yhdisteitä) sekä palonsuoja-aineita. Vaikka haitalliset ja myrkylliset aineet eivät todennäköisesti aiheuta ongelmia laitteiden käytön aikana, loppukäsittelyn aikana kyseisiä aineita voi kuitenkin vapautua ympäristöön (Ylä-Mella et al. 2014). Purkutoiminnassa ja murskauksessa voi vapautua

ilmaan mm. raskasmetalleja ja palonsuoja-aineita, ja erityisesti prosessin korkea paine ja hetkellinen kuumuus voivat saada aikaan eläimille ja ihmisille myrkyllisiä dioksiini-pölypartikkeleita (Meinander et al. 2012). Tunnettu esimerkki epähuoellisesta SER:n kierrätyksestä löytyy jääkaappien ja pakastimien käsittelystä, jossa puutteellisen purkutoiminnan seurauksena ympäristöön voi päästää otsonikerrosta tuhoavia aineita.

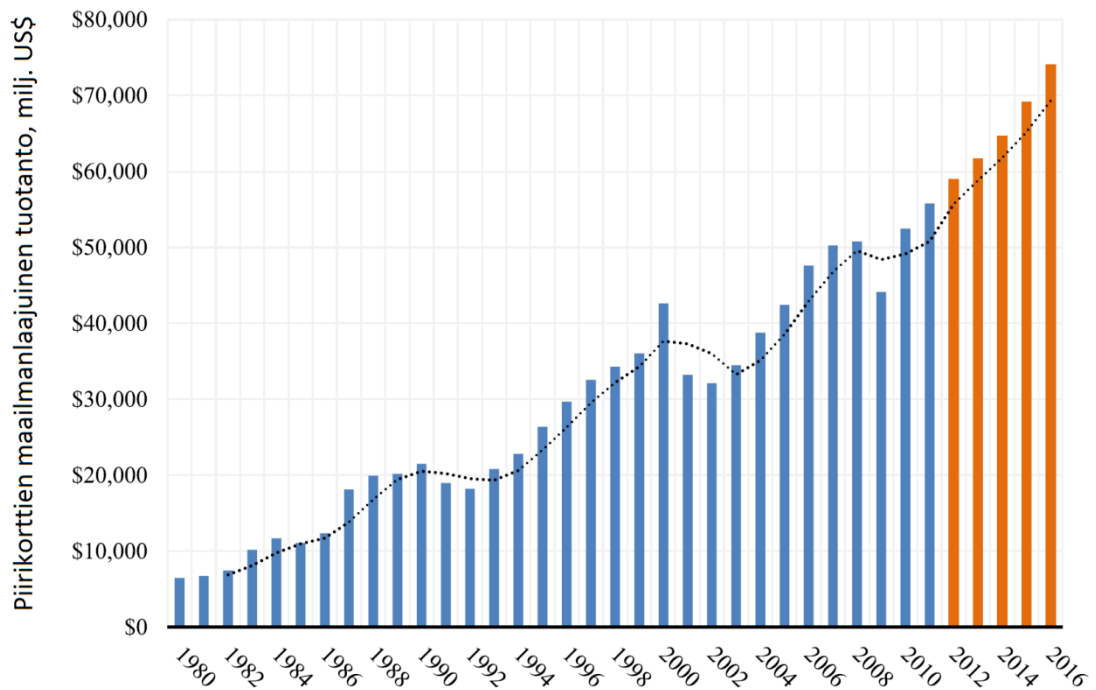
Sähkö- ja elektroniikkaromujen sisältämillä metalleilla on taipumus hapettua tai ruostua ajan saatossa. Vaikka elektroniikkatuotteiden metallit säilyisivätkin hapettumatta kierrätykseen asti, keräys- ja kierrätyslaitoksilla on harvoin kapasiteettia säilyttää kaikkia tavaroita sisätiloissa, jolloin kosteus, vaihtuva ilma ja laitteiden pitkä elinikä saavat aikaan hapetusreaktion. Lisäksi ulkona säilytettävä SER kuluu, ja auringon säteilyn vaikutuksesta esimerkiksi haitalliset ftalaatit (eng. phthalates) ja bromatut palonsuoja-aineet voivat kulkeutua ympäristöön (Meinander et al. 2012). Hapettuminen saattaa vaikuttaa negatiivisesti joihinkin erotusmenetelmiin, kuten optisiin yksikköprosesseihin, sekä mahdollisiin liuotusprosesseihin. (Sun et al. 2015)

Tulevaisuudessa yhä enemmän elektroniikkaa tullaan sijoittamaan kodinkoneiden lisäksi myös muunlaisiin sovelluksiin. Näistä autot, rakennukset ja infra-alat ovat ehkä näkyvimpiä kohderyhmiä. Harvinaisten ja kriittisten metallien tarpeen uskotaan kasvavan merkittävästi lähivuosina, sillä niiden funktionaaliset ominaisuudet ovat haluttuja mm. erilaisissa energiasovelluksissa (Meinander et al. 2012). Näin ollen resurssitehokkaan ja materiaalikeskeisen SER:n kierrätys ei ole vain nykyhetken trendikysymys, vaan kyseessä on kestävä kehitys tukeva miljardiliiketoiminta, jota täytyy tukea kauaskantoisilla innovaatioilla, teknisellä huippututkimuksella, kaupallistetuilla prosessiparannuksilla sekä poikkitieteellisillä ajatushautomoilla. Hallinnollisella tasolla pitäisi tehdä realistinen asennemuutos kierrätysliiketoimintaa jarruttavasta lainsäädännöstä kilpailukykyä vahvistavaan toimintamalliin.

Tällä hetkellä kiinnostavin tutkimuskohde sähkö- ja elektroniikkaromun piiristä on erilaiset piirikortit, joiden määrä on teknisen kehityksen myötä eksponentiaalisessa kasvussa. Piirilevyistä löytyy runsaasti arvokkaita ja helposti hyödynnettäviä perusmetalleja sekä suhteellisen korkeita jalometallipitoisuuksia, mutta myös terveydelle ja ympäristölle haitallisia aineita. Suurin ongelma piilee yksinkertaisesti siinä, että piirikorttien kierrätys on osittain puutteellista, jolloin hintavia metalleja päätyy murskaus- ja erotusprosessien kombinaation myötä väärin fraktioihin tai häviää pahimmillaan pölyihin. Jotta tässä diplomityössä voitaisiin selvittää syvällisemmin piirikorttien murskausmekanismeja, ja siten parantaa piirikorttien kierrätettävyyttä, on syytä ensin paneutua piirikorttien erityispiirteisiin yhtenä sähkö- ja elektroniikkaromun kierrätystuotteena.

## 2.2 Piirikortit kierrätystuotteena

Piirikortti on elektroniikkateollisuuden elintärkeä elementti, joka yhdistää komponentit sähköisesti toisiinsa ilman erillisiä johtimia sekä tukee systeemiä mekaanisena kiinnitysalustana. Kaikista elektroniikkalaitteista löytyy piirikortti jossakin muodossa, ja pelkästään niiden painon arvellaan muodostavan 3 % kaikkien sähkö- ja elektroniikkaromulaitteiden kokonaispainosta. Piirikortit sisältävät heterogeenisen joukon erilaisia metalleja (n. 28 painoprosenttia), muoveja (n. 23 painoprosenttia) sekä keraameja että lasimateriaaleja. Kuten kuvasta 3 voidaan havaita, piirikorttien tuotanto jatkaa oletettavasti jyrkkää kasvuaan, mikä tarkoittaa väistämättä kierrätykseen päätyvien piirikorttien lisääntymistä lähitulevaisuudessa. Tämän lisäksi piirikortit ovat mielenkiintoinen ja tutkittu kierrätystuote muun muassa sen korkeiden jalometallipitoisuuksien takia. Ne voivat helposti ylittää moninkertaisesti primääriaraaka-aineena käytettävien malmien vastaavat jalometallipitoisuudet. (Wang et al. 2015; Hadi et al. 2015)



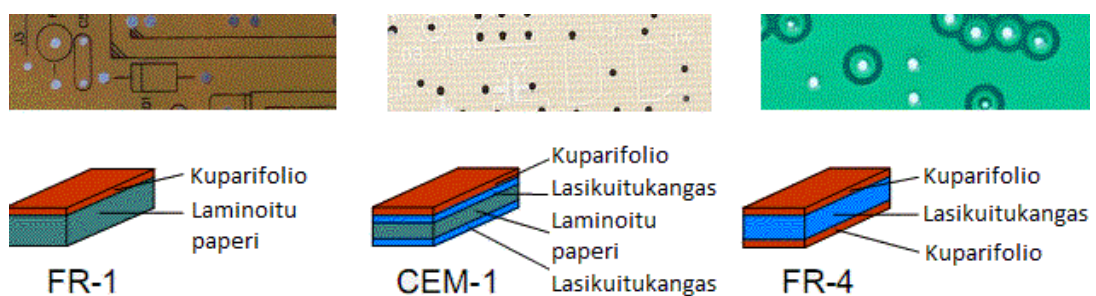
Kuva 3 Piirikorttien globaali tuotanto ja ennuste (vuosille 2012–2016) miljoonissa Yhdysvaltain dollareissa (Prismark 2012)

Kaikki piirilevyt koostuvat käytännössä kolmesta osiosta:

1. Sähköä johtamattomasta pohjalevystä tai laminaatista
2. Laminaatin pinnalle tai sisälle painetusta sähköä johtavasta alustasta
3. Pohjalevyyn kiinnitetyistä komponenteista.

Elektroniikkateollisuus käyttää piirikorttien pohjamateriaalia yhtenä piirikorttityypin laitteluperusteena. Erilaisia pohjamateriaaleja on muun muassa muovi-, paperi-, komposiitti- ja lasikuitupohjaiset ratkaisut. Yleisin piirikorttien pohjalevymateriaali on lasikuidulla vahvistettu epoksimuovi, johon virtapiirit on joko painettu tai etsattu ohuella kuparifoliolla. Pohjalevyn muovia vahvistetaan lisäksi erilaisilla kovetinaineilla, kuten disyaanidiamiinilla. Jo pelkästään piirilevyn pohjamateriaalivalinta vaikuttaa sen käyttäytymiseen kierrätyksen yksikköprosesseissa. Esimerkiksi lasikuitupohja on vahvaa, sitkeää ja jäykkää, mikä tekee kyseisen piirikorttilaadun murskaamisesta työläämpää ja energiaintensiivisempää kuin paperipohjaisten piirilevyjen. (Quan et al. 2012; Hadi et al. 2015)

Piirikortteja voi kuitenkin vielä lajitella rakenteensa perusteella yksipuoliseksi, kaksipuoliseksi sekä monikerrokseksi. FR-2-piirikorttityyppi on yleisesti hyödynnetty malli televisioiden ja kodinkoneiden ohjauspiireissä, ja se muistuttaa kuvan 4 esittämää FR-1-mallia, mutta piirilevyyn kuuluu myös kemiallinen fenolikerros. FR-4-piirikorttityyppi on taas käytetyin malli tietokoneissa ja nykyaikaisissa matkapuhelimissa, koska se mahdollistaa monimutkaisemman rakenteen pienemmässä tilassa sekä suuremman lämpöresistanssin ja minimaalisen veden absorptiokyvyn. Murugan et al. tutkimuksessa (2008) todetaan, että monikerroksisesta piirilevystä kuparin vapauttaminen on haastavampaa kuin yksikerroksisesta piirilevystä, mikä voi haitata puhtaan kuparin saantoprosenttia. Epoksimuovin lisäksi syaniittimuovi on tavallinen pohjamateriaali monikerrossovelluksissa ja fenolimuovia käytetään puolestaan perinteisesti yksikerroksisissa piirilevyissä. (Yamane et al. 2011; Hadi et al. 2015)



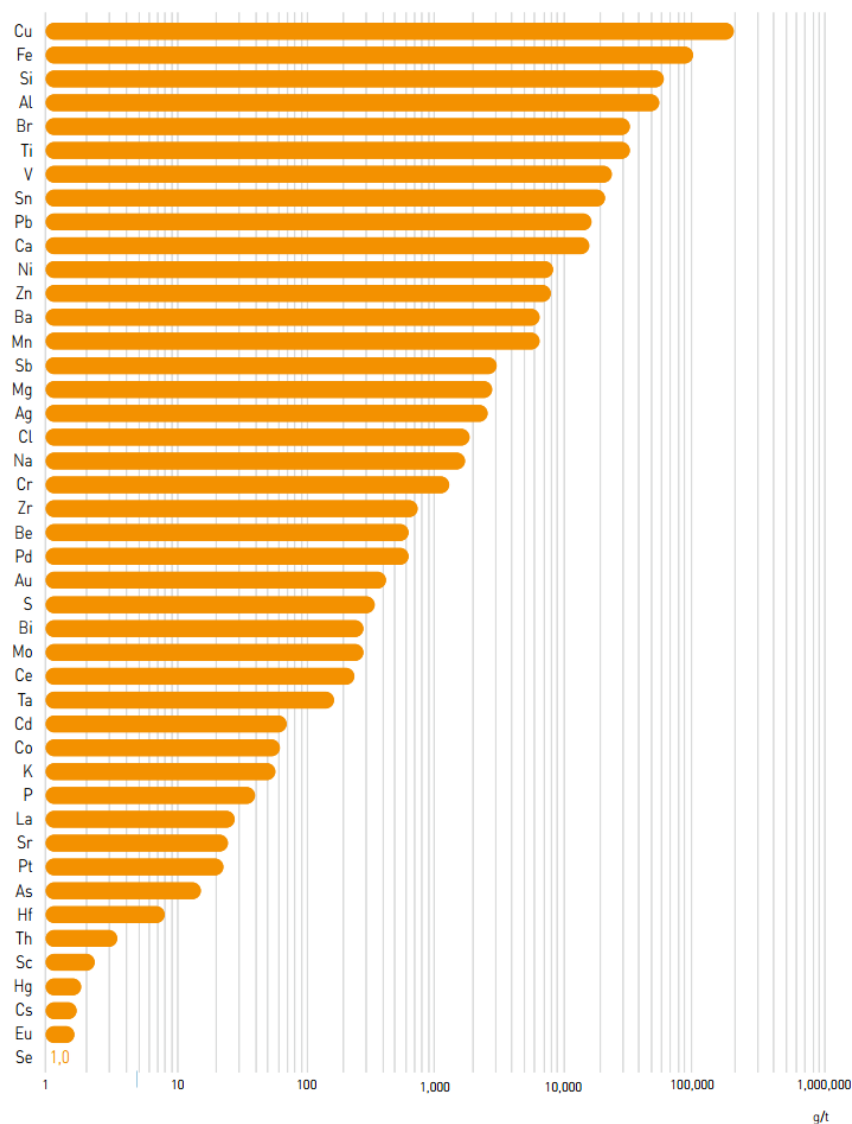
Kuva 4 Esimerkki erilaisista piirilevyjen kerrosratkaisuista ja niiden materiaalisällöstä (Dig PCB)

Kupari on yleisin piirikorteista löytyvä metalli (n. 10-20 % piirikorttien painosta), koska se toimii piirilevyn sähkönsiirtäjänä. Piirilevyissä käytetyn kupariin määrä korreloi johtimessa käytetyn sähkökapasiteetin kanssa. Tämän vuoksi eri käyttökohteissa sovellettujen piirilevyjen kuparimäärä voi vaihdella huomattavasti. Yksi tonni piirikortteja voi pitää sisällään 160–210 kilogrammaa kuparia. Verrattuna

kaivosteollisuuteen, kyseinen kuparipitoisuus on 30–40 kertaa suurempi kuin Yhdysvaltojen kuparimalmissa. Piirilevyjen sisältämä runsas kuparimäärä on ollut kauan pääsyy piirikorttien kierrättämiselle ja sitä käytetään monissa kuparisulatoissa sekundäärisenä raaka-aineena malmipohjaisen rikasteen lisäksi. Kuparin kiertämisellä piirilevyjen kautta takaisin kuparisulatoille on taloudellisen hyödyn lisäksi myös ympäristöä säästäviä vaikutuksia, kun yhä köyhempiä malmiesiintymiä valjastetaan kaivostoiminnan tarpeisiin kiihtyvän kuparitarpeen taltuttamiseksi. On kuitenkin myös huomioitava, että piirilevyjen kierrätyksessä täytyy käsitellä myös haitallisia aineita, joita ei malmeissa välttämättä esiinny yhtä paljon. (Veit et al. 2005; Hadi et al. 2015; Yamane et al. 2011)

Kuparin lisäksi tärkeitä perusmetalleja ovat hyvien sähkönjohtavuusominaisuuksien takia rauta, alumiini, tina, nikkeli ja sinkki, mutta piirilevyt pitävät sisällään myös valtavan kirjon muitakin metalleja, kuten kuvasta 5 voidaan havaita. Ohuita tina- tai hopeakerroksia sekä elohopeaseoksia käytetään etsausta kestävän ominaisuuden vuoksi suojelemaan kuparifoliota hapettumisreaktioilta. Jalometalleja käytetään monipuolisesti niin metalliyhdisteissä (liitoksissa, liittimissä, juotoksissa), keraamiyhdisteissä (monikerroskondensaattoreissa, mikropiireissä, hybridi-keraameissa) kuin muoviyhdisteissä (piirilevyn urissa, välilevyn kerroksissa ja mikropiireissä). Jalometallit esiintyvät alkuainemuodossaan kytköksissä muihin metalleihin, mikä tekee niiden vapauttamisesta monimutkaista. Erityisesti kultaa ja palladiumia käytetään kontaktimateriaalina erinomaisen sähkönjohtavuuden takia. Platinaryhmän metalleja käytetään paljon releissä, kytkimissä tai sensoreissa. (Chancerel et al. 2009; Ghosh et al. 2015; Yamane et al. 2011; Hadi et al. 2015)

Elektroniikkateollisuus käyttää vuosittain 300 tonnia kultaa, koska se on kemiallisesti hyvin stabiili alkuaine sekä loistava sähkönjohtaja. Pysyvän olomuotonsa takia se on käytetty pinnoite suojaamaan elektroniikkaliitoksia hapettumiselta. Jalometallit voivat korkean hintansa vuoksi edustaa jopa 80 % piirilevyn arvosta, vaikka niiden pitoisuus on reilusti alle 1 painoprosenttia koko piirikortista. Piirikorttien jalometallipitoisuudet houkuttelevatkin piirikorttien lähettämistä kehittyviin maihin, joissa piirikortteja kierrätetään alkeellisin menetelmin alhaisilla kustannuksilla altistaen niin ihmiset kuin ympäristö kierrätyksestä vapautuville vaarallisille aineille. (Ghosh et al. 2015; Hadi et al. 2015; Yamane et al. 2011)



**Kuva 5 Esimerkki piirikorteista löytyneistä metalleista (Reuter et al. 2013)**

Arvokkaiden metallien lisäksi piirilevyt sisältävät myös yllä mainittuja haitallisia tai myrkyllisiä aineita, kuten raskasmetalleja, joista merkittävimmät ovat Pb, Cd, Hg, As ja Cr. Koska piirikortteihin kohdistuu valmistusvaiheessa lämpörasituksia ja käyttövaiheessa sähköpulssit nostavat komponenttien ja piirilevyn lämpötilaa, piirikorteissa käytetään runsaasti palonestoaineita. Erityisesti bromatut palonestoaineet (BFRs) on todettu haitallisiksi niin ihmisille kuin ympäristölle niiden epäsuotuisten neurologisten ja hormonaalisten vaikutusten takia. Bromatut palonsuoja-aineet ovat edelleen suosittuja materiaalivalintoja piirikorttien valmistuksessa, vaikka fosfori- tai tyypipohjaisia palonestoaineita olisi tarjolla. (Hadi et al. 2015; Deng et al. 2014)

Keraamiset materiaalit piirilevyissä ovat lähinnä piitä, alumiinioksidia, Mica-kiillettä, barium titanaattia ja muita oksidiseoksia. Keraameja sekä lasia löytyy enimmäkseen siltauksista ja urista. Piirilevyjen suuren ei-metallisen fraktion käyttökohteita on myös alettu tutkimaan viime aikoina. Yhdessä ehdotuksessa ei-metallisesta jakeesta voitaisiin valmistaa muotteja, jolloin niistä saataisiin korkeampi hinta kuin täyteaineena sementti- tai asfalttisovelluksissa. Ei-metallisesta fraktiosta voitaisiin myös valmistaa adsorboivaa ainetta vedenpuhdistusoperaatioihin, jos tuotantokokeista saadaan positiivisia tuloksia. Lisäksi piiteollisuus on osoittanut kiinnostusta ei-metallisen jakeen piidioksidin talteenottovaihtoehtoa kohtaan. (Ghosh et al. 2015; Hadi et al. 2015)

Piirilevyjen juotostyypit vaihtelevat lyijytinan ja hopeatinan välillä. Ennen suosituin lyijytinajuotos on väistymässä EU:n, Yhdysvaltojen ja Japanin kiristyvien ympäristönormien vaikutuksesta. Lyijyn asteittaisesta luopumisesta johtuen myös sinkkiä on alettu käyttämään juotoksissa. Komponentteja voidaan kiinnittää pohjalevyyn juotosten lisäksi monella eri tavalla, joihin palataan yksityiskohtaisemmin Liitoskohdat-kappaleessa. (Hadi et al. 2015; Yamane et al. 2011)

Ghosh et al. kirjoittivat syväluotaavan ja perusteellisen kirjallisuuskatsauksen (2015) piirikorttien kierrätyksestä käsittelevistä artikkeleista 15 vuoden ajalta. Tutkijat kiteyttivät piirikorttien kierrätyksen haasteet ja tavoitteet seuraavaan viiteen kohtaan:

1. Piirikorttien tyypit, koot, muodot, komponentit ja niiden sisältämät materiaalit vaihtelevat huomattavasti. Teknologian kehittyessä myös piirikortit muuttuvat, ainakin edellä mainittujen ominaisuuksien valossa, mikä tekee tasalaatuisen kierrätysmateriaalin hankinnasta ja sille optimoidun kierrätysprosessin varmistamisesta haastavaa.
2. Piirikorttien metallit, muovit ja keraamit ovat kiinni toisissaan monimutkaisilla kytkennöillä, mikä hankaloittaa materiaalien irrottamista toisistaan ja tyydyttävän puhtaaksijauhatustason saavuttamisen.
3. Piirikortit sisältävät valtavan kirjon erilaisia metalleja, mikä tarkoittaa usein monimutkaista talteenottoa, johon on kytkeytynyt lukuisia yksikköprosesseja. Tämän lisäksi useiden metallien matalat pitoisuudet tekevät talteenotosta entistä vaikeampaa.
4. Piirikorttien arvo muodostuu lähinnä niiden sisältämistä metalleista, jotka muodostavat kuitenkin vain noin 30 % piirilevyjen kokonaispainosta.
5. Piirikorttien kierrättämisen päätavoite on metallien maksimaalinen talteenotto ja täten arvon tuottaminen. Vaikka jotkut yksikköprosessit eivät olisikaan varsinaisesti ympäristöystävällisiä, sekundääriset tavoitteet sisältävät usein myös eettisiä ja vihreitä arvoja.

Kuten tässä kappaleessa on todettu, piirikorttien kierrättäminen on haastavaa, sillä ne vaihtelevat tyyppin, koon ja muodon mukaan, minkä lisäksi niiden sisältämä materiaali- ja komponenttikirjo on todella laaja. Toisaalta piirikortit sisältävät runsaasti arvokkaita metalleja, mikä tekee niiden kierrättämisestä taloudellisesti kannattavaa. Taloudellinen kannustin ei ole kuitenkaan ainoa syy kierrättää sähkö- ja elektroniikkaromua, vaan kierrätystoimintaa ohjataan myös lainsäädännöllä. Jotta piirikorttien kierrätykseen liittyviä mekanismeja ja toimintatapoja voidaan ymmärtää myös laajemmalla perspektiivillä, siihen liittyviin lainsäädäntönormeihin täytyy syventyä perusteellisemmin.

### **2.3 Lainsäädäntö**

Vuonna 2003 EU:n alueella otettiin käyttöön sähkö- ja elektroniikkalaiteromuja käsittelevä direktiivin, jota kutsutaan myös lyhyemmin WEEE-direktiiviksi (2012/19/EU). Direktiivin tarkoitus on rohkaista tuottajia kiinnittämään enemmän huomiota sähkö- ja elektroniikkalaitteiden elinkaaren päätepisteen toimintoihin, mikä puolestaan ohjaisi osaltaan uusien tuotteiden suunnitteluprosesseja. Direktiivi kannustaa sähkö- ja elektroniikkaromun ennaltaehkäisyyn sekä tehokkaampaan romun hyötykäyttöön.

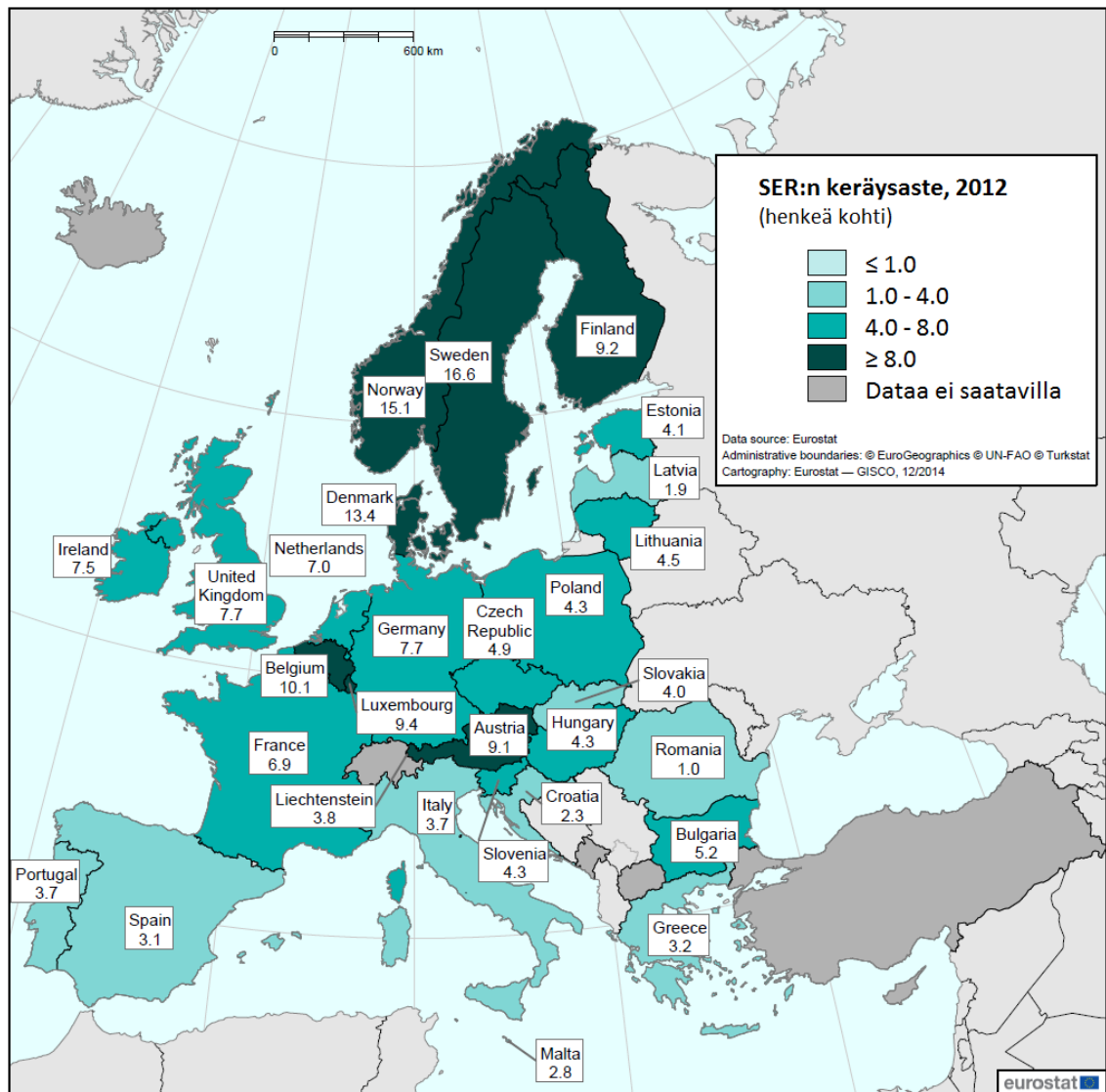
WEEE-direktiivissä (2012/19/EU) halutaan parantaa sähkö- ja elektroniikkaromujen uudelleenkäyttöä, mikä tarkoittaa kierrätykseen päätyneiden tuotteiden tai niiden komponenttien käyttöä samassa tarkoituksessa, johon ne on suunniteltu. Tällä hetkellä Suomella tai muilla EU-mailla ei ole erityisen toimivia tai laajalle levinneitä käytäntöjä seuloa kerätystä SER:sta toimivia yksilöitä uudelleenkäyttöön. Esimerkiksi Suomessa vuonna 2011 kerätystä SER:sta käytettiin uudelleen vain  $0,6 \%$  [ $147\,000 \text{ kg} / 26\,394\,000 \text{ kg} = 0,55 \%$ ]. Todellisuudessa uudelleenkäyttöaste on kuitenkin korkeampi, sillä sähkö- ja elektroniikkatuotteita annetaan sukulaisille sekä ystäville, myydään eteenpäin internetissä ja kirpputoreilla sekä säilötään varmuuden vuoksi myöhempää käyttöä varten. (Eurostat 2014; Meinander et al. 2012)

Jos sähkö- ja elektroniikkaromua ei voida käyttää uudelleen, se tulee muuten hyödyntää joko kierrättämällä tai tuottamalla energiaa. WEEE-direktiivin (2012/19/EU) mukaan mahdollisimman vähän sähkö- ja elektroniikkaromua tulisi päätyä kaatopaikalle. Tässä diplomityössä sähkö- ja elektroniikkaromun kierrätysperspektiivi on tärkeimmässä osassa, mutta myös SER:n energiahyödyntämismahdollisuus on hyvä tuntea. Energian hyödyntäminen tässä yhteydessä tarkoittaa SER:n – koskee lähinnä muoviosia – polttamista siten, että siitä vapautunut lämpö hyödynnetään. (Ignatius, 2009)

WEEE-direktiivin (2012/19/EU) käyttöönotto aiheutti vaihtelevia ongelmia EU:ssa johtuen jäsenmaiden välisistä eroista teknologian, operoinnin sekä lainsäädännön



saralla. Näitä ongelmia olivat muun muassa kasaantuneet ympäristöhaitat, määrittelyongelmat, matalat kehityspanokset SER:n keräyksessä ja käsittelyssä sekä kilpailun vääristyminen. Maiden väliset SER:n keräysasteet eroavat Euroopassa aina Romanian 1,0 kilogrammasta Ruotsin 16,6 kilogrammaan per asukas per vuosi, kuten kuvasta 6 voidaan havaita.



**Kuva 6 SER:n keräysaste EU-alueella (Eurostat 2013)**

Vuonna 2012 WEEE-direktiivi (2012/19/EU) otettiin uusintatarkasteluun, jotta päämääriä selvennettäisiin, toimintamenetelmiä harmonisoitaisiin ja vapaamatkustusta vähennettäisiin. Samalla määritettiin uudet kunnianhimoiset tavoitekierrätysarvot. WEEE-direktiivin mukaan SER:n keräysasteen on oltava Euroopassa 4,0 kilogrammaa per maan asukas vuoteen 2016 mennessä. Vuosien 2016 ja 2018 välillä SER:n keräysasteen on oltava 45 % markkinoiden sähkö- ja

elektroniikkalaitteiden painosta ja vuodesta 2019 lähtien keräysaste nostetaan Euroopassa 65 prosenttiin.

Edelleen suuri määrä sähkö- ja elektroniikkaromua kerätään ja käsitellään epävirallisesti tuottajayhteisöjen ulkopuolella. Vuonna 2010 arvioitiin, että peräti puolet sähkö- ja elektroniikkaromusta kerättiin ja käsiteltiin epävirallisten kanavien kautta (Ylä-Mella et al. 2014b). Erityisesti laittomasta sähkö- ja elektroniikkaromun kuljettamisesta Afrikkaan, Kiinaan ja Intiaan ollaan huolissaan muun muassa puutteellisten työolosuhteiden ja luontoa kuormittavien työskentelytapojen vuoksi. Uudelleentarkastetun WEEE-direktiivin (2012/19/EU) yksi tavoitteista oli vähentää laitonta SER-kauppaa mm. siirtämällä enemmän dokumentointivastuuta maastaviejille. Lisäksi hallinnollisia vastuita oli tarkoitus vähentää yksinkertaistamalla rekisteröinti- ja raportointivaatimuksia uusista markkinoille päästetyistä sähkö- ja elektroniikkalaitteista. Samalla talteenotolle, kierrätykselle sekä hyötykäytölle piti luoda yhteiset standardit.

Vaikka WEEE-direktiivin vaatimukset ovat tarkentuneet ja niitä on yhdenmukaistettu, EU:n jäsenmaat tulkitsevat ja soveltavat direktiiviä edelleen vaihtelevasti, ja erityisesti sen vaikutus- ja toiminta-alaa, tuottajan vastuuta, rahoitusmekanismeja, rekisteröintiä ja valvontaa ei ole erikseen direktiivissä määritelty. Tämän vuoksi sähkö- ja elektroniikkaromuun sovelletaan täyttää tuottajavastuuta, ja EU-alueella toimiikin yli 150 erilaista tuottajayhteisöä. Tuottajavastuu tarkoittaa tuottajien ja valmistajien velvollisuutta järjestää tuotteillaan jätehuolto, kun ne tulevat elinkaarensa loppupäähän. Suomessa tuottajavastuuta hoidetaan joko liittymällä tuottajayhteisöön tai ilmoittautumalla Pirkanmaan ELY-keskuksen tuottajatiedostoon. (Danska, 2014; Ylä-Mella et al. 2014b)

Vuonna 2018 voimaan astuu avoin soveltamisala eli ns. open scope, joka koskee kaikkia sähkö- ja elektroniikkalaitteita lukuun ottamatta direktiivissä säädettyjä poikkeuksia. Samalla kategorian luokkajako muuttuu kymmenestä kuuteen: kylmälaitteet, näytöt ja monitorit, lamput, suuret laitteet (ulkomitta yli 50 cm), pienet laitteet (ulkomitta alle 50 cm) sekä pienet tieto- ja telekommunikaatiolaitteet (alle 50 cm). Etämyyntiä harjoittavat tuottajat asetetaan myös vastuuseen, kun heidän tulee asettaa valtuutettu edustaja siihen maahan, jonka markkinoille heidän tuotteitaan tuodaan. (Danska, 2012)

WEEE-direktiivin lisäksi EU-alueella sovelletaan niin sanottua RoHS-direktiiviä (2011/65/EU), jonka tarkoitus on rajoittaa tiettyjen vaarallisten aineiden käyttöä sähkö- ja elektroniikkalaitteissa. Markkinoille saatettavat sähkö- ja elektroniikkalaitteet eivät saa sisältää lyijyä, kadmiumia, elohopeaa, kuuden arvoista kromia, polybromibifenyyliä (PBB) tai polybromidifenyylietteriä (PBDE), ja Suomessa RoHS-

lain toteutumista valvoo Tukes. ROHS-direktiivi astui voimaan vuonna 2003, ja sen avulla sähkö- ja elektroniikkalaitteiden lyijyn, elohopean, kadmiumin, kuudenarvoisen kromin ja kahden bromatun palonestoaineen pitoisuudet ovat vähentyneet merkittävästi. RoHS-direktiivistä tehtiin RoHS II -harmonisointidirektiivi vuonna 2011, jonka avulla direktiivin piiriin kuuluvien tuotteiden vaatimuksia yhdenmukaistettiin jäsenmaiden välillä. Tämä mahdollisti tuotteiden vapaamman liikkumisen EU-maiden sisämarkkinoilla. (Danska, 2014)

RoHS-direktiivin arvioidaan vaikuttavan lähitulevaisuudessa piirikorttipohjaisen elektroniikkaromun kierrättämiseen, kun rajoitettujen aineiden tilalla käytetään vaihtoehtoisia materiaaleja, jotka voivat vaihdella paljonkin tuottajasta riippuen (Dalrymple et al. 2007). On kuitenkin huomattava, että uusien säännösten mukaan valmistetut tuotteet tulevat kierrätykseen vasta vuosien kuluttua, jolloin kierrätyslaitokset joutuvat käsittelemään jo kiellettyjä aineita vielä useiden vuosien ajan. Esimerkiksi kylmälaitteiden cfc-aineet kiellettiin jo 90-luvulla, mutta edelleen merkittävä osa kierrätykseen päätyneistä kylmälaitteista sisältää kyseisiä haitallisia yhdisteitä.

Kolias et al. tutkivat (2014) RoHS-direktiivin vaikutusta kierrätykseen saapuneiden tietokoneiden haitallisten materiaalien pitoisuuksiin. Tutkijat huomasivat, että ennen vuotta 2006 valmistetuissa piirikorteissa lyijypitoisuudet ylittivät EU:n asettamat turvallisuusrajat, mutta vuoden 2006 jälkeen valmistetuissa piirikorteissa havaittiin selkeä pudotus lyijypitoisuuksissa turvallisuusrajojen alapuolelle. Elohopea- ja kadmiumpitoisuudet todettiin olevan alle RoHS-ajan valmistusvuoden 2006 molemmilla puolilla.

Ympäristöön liittyvät lainsäädännöt muuttuvat verrattain nopealla tahdilla, mikä vaatii eri aloilta, tahoilta ja organisaatioilta jatkuvaa lainsäädäntöprosessin seurantaa sekä kykyä vaikuttaa hankkeisiin. Projekteihin vaikuttaminen ja mahdollinen edunvalvonta tai niin sanottu lobbaus tulisi aloittaa mahdollisimman varhain, esimerkiksi lainsäädännön valmistelun aloitetasolla ja taustapaperin valmistelun aikana. Yritysten tulee joko fokusoida toimintansa uudelleen tai sopeutua tuleviin muutoksiin, sillä yksittäisten yritysten mahdollisuudet vaikuttaa EU-tason päätöksentekoprosesseissa ovat melko rajalliset. Tämän vuoksi EU-vaikuttamiseen on valittu erilaisia järjestöjä edustajikseen. Suomessa teknologiateollisuuden yritysten edustajana toimii Teknologiateollisuus ry. (Danska, 2014)

Vaikka Suomessa on korkeat keräys- ja hyötykäyttöasteet, kerätyssä sähkö- ja elektroniikkaromussa on havaittu pieni notkahdus muutamana viimevuotena. Ilmiölle ei ole yhtä selitystä, mutta ainakin kerääntynyttä sähkö- ja elektroniikkaromua luovutettiin aktiivisesti, kun laitteiden palautuksesta tehtiin maksutonta.

Houkuttelevat metallien hinnat ovat voineet myös kasvattaa virallisen systeemin ulkopuolella käsiteltävää SER:n määrää. Lisäksi taloudellinen epävarmuus on saattanut vähentää ihmisten halukkuutta ostaa uusia sähkö- ja elektroniikkalaitteita vanhojen – mutta edelleen toimivien – laitteiden tilalle. Samaten SE-laitteiden rakenteet ovat muuttuneet kevyemmiksi mm. suosimalla muovia metallin sijaan (Ylä-Mella et al 2014b).

Tässä kappaleessa perehdyttiin yleisesti sähkö- ja elektroniikkaromun erityisominaisuuksiin, materiaalisäilytykseen, arvон muodostumiseen sekä kierrätyksen mahdollisuuksiin ja haasteisiin. Kun geneerisestä sähkö- ja elektroniikkaromun aihepiiristä saatiin tarpeeksi laaja katsaus, tarkasteluun otettiin diplomityön varsinainen kierrätystuote – piirikortit. Piirikorttien rakennetta ja laajaan materiaalikirjon arvomahdollisuuksia sekä kierrätysongelmia käsiteltiin mahdollisimman kattavasti, jotta diplomityön kokeellisen osion teoriapohja olisi tarpeeksi tukeva. Sähkö- ja elektroniikkaromun, ja erityisesti piirikorttien, kierrätyksen kokonaisvaltaisemman perspektiivin hahmottaminen vaati lainsäädäntöön tutustumista WEEE- ja RoHS-direktiivien kautta ja näiden ohjaavien EU-tason normien vaikutuksen kierrätyslaitosten toimintaan nyt ja tulevaisuudessa. Seuraavaksi siirrytään varsinaiseen piirikorttien kierrätykseen, ja diplomityön kokeellisessa osiossa käytettyihin yksikköprosesseihin.

### 3 Piirikorttien kierrätysprosessi

Kierrätyksellä on kansainvälisesti merkittävä rooli kasvavan väestön, kehittyvien maiden teollistumisen, länsimaiden palveluyhteiskunnan, energiantuotannon ja elektroniikkateollisuuden materiaalitarpeen tyydyttämisessä. Kierrätyksen avulla saadaan arvokkaita raaka-aineita takaisin kiertoön ja käyttöön niin, että neitseellisten luonnonvarojen kuluttamista voidaan minimoida kestävän kehityksen ideologilla. Vaikka kierrätyksen alkuaajoista on kehitytty valtavasti, sen perusprosessipalaset ovat edelleen samat: materiaali täytyy murskata ja fraktiot erotella toisistaan. Vasarat, moukarit ja kirveet ovat vaihtuneet valtavan kokoisiin ja automaattisesti toimiviin murskauslaitoksiin. Manuaalinen erottelu on edelleen merkittävä erotusmenetelmä, mutta sen rinnalle on tullut niin gravitaatio-, magneettis-, kuin sensoripohjaisia erottelumenetelmiä. SER:n ja erityisesti piirikorttien kierrätys on uusimpia aluevaltauksia kierrätyksen historiassa, ja siihen sovelletaan alalta aikaisemmin hyväksi todettuja kierrätysprosesseja. (Nijkerk 1996)

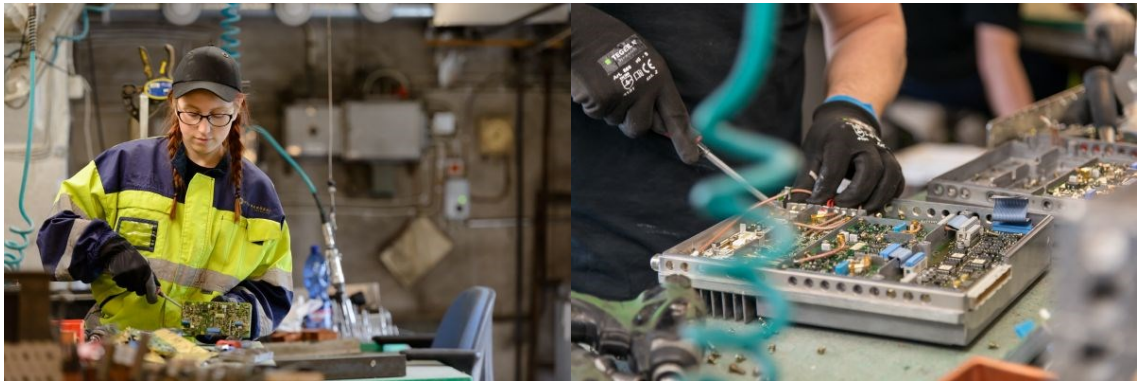
Piirilevyjen mekaaninen kierrätys tarjoaa monia etuja kemialliseen ja biologiseen prosessointiin nähden, kuten suhteellisesti matalammat investointi- ja operointikustannukset, korkeamman suorituskyvyn sekä ympäristöystävällisemmän käsittelyn (Wen et al. 2005). Toisaalta fysikaalisissa erotusprosesseissa metallihävikit voivat kasvaa jopa 10–35 prosenttiin, joten yksikköprosessien toimintaperiaatteet on ymmärrettävä ja niiden yhteisvaikutuksen optimointi on priorisoitava (Yazici et al. 2015). Täten voidaan varmistaa metallien paras mahdollinen talteenottoaste ja minimoida häviöt.

Tässä kappaleessa keskitytään piirikorttien kierrätyksen ja diplomityön kokeellisen osuuden kannalta oleellisiin mekaanisiin yksikköprosesseihin: leikkaavaan murskaukseen, magneettiseen erotteluun ja pyörrevirtaerotukseen. Ennen varsinaisia yksikköprosesseja pitää kuitenkin selvittää, miten piirikortit saadaan manuaalisella erottelulla ja purulla erilleen muusta sähkö- ja elektroniikkaromuvirrasta.

#### 3.1 Manuaalinen erottelu ja purku

Edelleen yksi käytetyimmistä ja luotettavimmista erottelumenetelmistä sähkö- ja elektroniikkaromun käsittelyssä on ihmisten suorittama manuaalinen erottelu. Sitä sovelletaan erityisesti esilajitteluna ennen murskausta. Tärkein kriteeri lajittelun onnistumisen kannalta on syötteen riittävät aisteilla havaittavat erot, joista visuaaliset tuote- ja materiaaliominaisuudet ovat avainasemassa (Reuter et al. 2013). Diplomityön kokeellisen osion korkea-arvoiset piirikortit ovat usein lähtöisin tietokoneista ja sähkökaapeista (kuva 7) ja matala-arvoiset piirikortit saadaan usein purkamalla kuvaputkitelevisioita (kuva 8). Purkaminen toteutetaan työntekijän arvion ja kiinnitysmekanismien perusteella erilaisilla työkaluilla porakoneesta vasaraan. Puretut

piirikortit kerätään omaksi kasaksi, kunnes niiden määrä on riittävä tehokkaan prosessoinnin kannalta.



**Kuva 7 Korkea-arvoiset piirikortit saadaan usein purkamalla tietokoneita tai sähkökaappeja (Kuusakoski Oy)**



**Kuva 8 Monet matala-arvoiset piirilevyt ovat peräisin kuvaputkinäytöistä (RECDEV project)**

Manuaalinen erottelu- ja purkutoiminta on yksi suurimmista kierrätyslaitosten kustannuselementeistä, mutta samalla se on myös oleellinen osa WEEE-direktiiviä. Erottelussa sähkö ja elektroniikkaromuvirrasta tulee poistaa muun muassa paristot, akut, värikasetit ja sähköjohdot, ja erityisesti piirilevyistä pitäisi irrottaa kytketyt nappiparistot, sillä ne voivat syttyä palamaan tai ne voivat vapauttaa myrkyllisiä orgaanisia kaasuja murskauksen yhteydessä (Duan et al. 2011). Kuitenkin yhtä tärkeätä on jakaa romuvirta erikseen käsiteltäviin tuoteryhmiin, kuten matala- ja korkea-arvoisiin komponentteihin, kuten kuvassa 9 tehdään. Tämä mahdollistaa jokaiselle jaetulle tuoteryhmälle optimoidun käsittelyprosessin ja parhaan metallien saantoprosentin. Manuaalinen erotteluprosessi on tasapainottelua mahdollisimman puhtaiden fraktioiden ja tehokkaan työskentelytahdin välillä. Mitä yksityiskohtaisempaa SER:n jaottelua työntekijät suorittavat, sitä vähemmän he kerkeävät käsittelemään sähkö- ja elektroniikkaromua työvuoronsa aikana, mistä kohdistuu enemmän kustannuksia kierrätyslaitokselle. (Dalrymple et al. 2007)



**Kuva 9 Niin sähkö- ja elektroniikkaromun kuin eri piirikorttilaatujen manuaalinen erottelu mahdollistaa optimoidut kierrätysprosessit (Kuusakoski Oy)**

SER:n lajitteluvaiheessa materiaalivirrasta on jokseenkin mahdollista erottaa toimivia laitteita uudelleenkäyttövaihetta varten, mikä on EU:n jätehierarkian toiveiden mukaista. Laitteita kokeillaan esimerkiksi syöttämällä siihen virtaa ja tarkistamalla, toimiiko se ongelmitta ja vaaditulla tavalla. Jos laitteessa havaitaan ongelmia, se voidaan purkaa ja joitakin sen komponentteja voidaan vielä käyttää hyödyksi, mutta niiden toimintakuntoisuuden todentaminen on jo huomattavasti haasteellisempaa. Lisäksi romuvirrasta toimivien laitteiden löytäminen on työintensiivistä sekä vie aikaa ja resursseja. (Kang et al. 2005; Ylä-Mella et al. 2014a)

Vaikka joitakin sähkö- ja elektroniikkatuotteiden osia uudelleenkäytetään jossakin määrin, piirilevyjen uudelleenkäyttö asettaa monia teknisiä haasteita. Piirilevyjen rakenne vaatii komponenttien kiinnittämisen tiukasti pohjalevyyn kiinni. Tämän vuoksi yksittäisten komponenttien purkaminen piirilevystä on työlästä ja monimutkaista, minkä lisäksi yksittäisillä komponenteilla on lähes olematon jälleenmyyntiarvo. Jos yhtälöön lisätään prosessointikustannukset, komponenttien purkamista sekä uudelleenkäyttöä ei voida perustella taloudellisilla syillä. Siispä realistisin ja yleisin toimintamalli on piirikorttien kierrättäminen ja siten tärkeiden materiaalien talteenottaminen. Arvon tuottamisen lisäksi oikeaoppinen piirikorttien kierrättäminen vähentää luonnon raaka-aineiden hyväksikäyttöä, pienentää hiilijalanjälkeä sekä estää haitallisten aineiden pääsyn luontoon. (Ghosh et al. 2015)

Manuaalisen purkamisen rinnalle on yritetty kehittää vaihtoehtoisia purkumetodeja. Piirilevyjen komponenttien Sn-Pb-juotoksia on mahdollista vapauttaa sulattamalla liitoskohdan juotos esimerkiksi kuumailmapuhaltimella, kuumilla vastuksilla tai infrapunalämmittimillä, mutta kyseisiä prosesseja ei ole juurikaan otettu yleiseen käyttöön sen hitauden ja pienten hyötyvaikutusten vuoksi. Laboratoriotasolla on lisäksi tutkittu kuuman nesteen käyttämistä juotosten sulattamiseksi, mutta ongelmaksi muodostui käytetyn kuuman nesteen kallis jatkokäsittely. Myös purkuprosessin automatisointia on ehdotettu tasaisin väliajoin. Käytännössä purkuun saapuva

piirikortti ja sen kunto pitäisi tunnistaa reaaliajassa erilaisilla kuvantamisoperaatioille, ja datapankin avulla automaattinen purkulaitteisto muokkaisi itseään vaadittavien purkuominaisuuksien mukaiseksi. Käytännössä piirikorttien heterogeenisen luonteen vuoksi edelleen paras menetelmä on ihmisen suorittama manuaalinen purku. (Duan et al. 2011; Ghosh et al. 2015).

Helpoiten SER saadaan omiksi tarkasti määritellyiksi kierrätysvirroiksi järjestämällä kuluttajille sekä yrityksille riittävät opastukset ja valmiudet romujen lajitteluun jo vastaanottopisteellä (Dalrymple, 2007). Näin kierrätyslaitoksilla voidaan minimoida lajittelusta ja purusta aiheutuvia kuluja. On kuitenkin huomioitava, että tämän diplomityön kannalta oleelliset kierrätystuotteet – erihintaiset piirikortit - saadaan harvoin sellaisenaan kierrätyslaitokselle, vaan ne täytyy itse irrottaa elektroniikkalaitteista purkamalla.

### **3.2 Leikkaava murskaus**

Murskauksen tärkein tehtävä on kaikessa yksinkertaisuudessaan kappale- tai partikkelikoon pienentäminen, jotta seuraavien prosessivaiheiden käsiteltävyys ja materiaalien erottelukyky paranisivat. Kierrätysmateriaalin murskaus eroaa luonnonmateriaalin, kuten malmin, hienonnuksesta ennen kaikkea sen heterogeenisyyden ja haastavien materiaaliliitäntöjen takia. Sähkö- ja elektroniikkatuotteiden kestävyudet vaihtelevat (kylmlaitteet verrattuna kuluttajaelektronikkaan), ja niiden sisältämä materiaalikirjo voi olla hyvinkin laaja, minkä vuoksi SER:n murskaus ei ole välttämättä yhtä yksiselitteistä kuin luonnon materiaalien. Vaikka sähkö- ja elektroniikkaromujen murskausmenetelmiä on lukuisia, tässä diplomityössä keskitytään vain pyöröleikkurin suorittamaan leikkaavaan murskaukseen, koska se on käytetyin ja tunnustetuin murskaustyyppi piirikorttien kierrätyksessä.

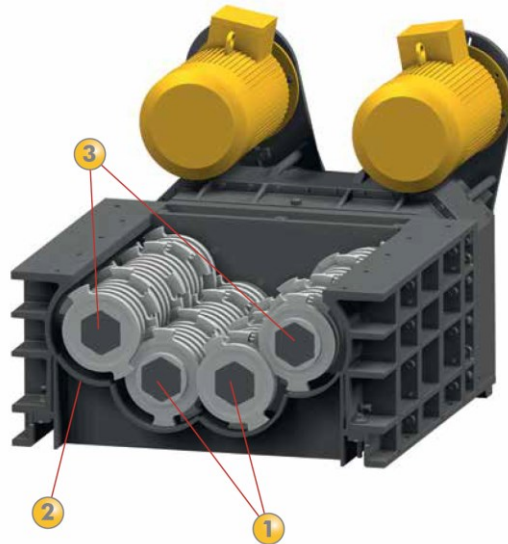
Muun muassa Wang et al. tutkivat (2005) piirikorttien murskautuvuutta vertailemalla tyypillisiä kaivos- ja mineraaliteollisuuden käyttämiä murskaintyyppejä (valssimurskain, kartiomurskain ja leukamurskain). Kirjoittajat toteavat kuitenkin, että yllä mainitut murskaintyyppit soveltuvat heikosti piirikorttien murskaamiseen ja he suosittelevatkin murskaimia, jotka käyttävät partikkelien pienentämiseen sekä leikkaavaa että iskevää voimaa. Kymmenen vuotta myöhemmin Ghosh et al. toteavat laajassa kirjallisuustutkielmassaan (2015), että piirilevyt sisältävät vahvistettua muovilevyä, lasikuitua ja kuparijohtoja, minkä vuoksi tavalliset mineraalitekniikan murskaimet eivät tuota riittävän hyvää puhtaaksijauhausastetta. Pyöröleikkurin leikkaavat voimat sitä vastoin osoittautuivat tutkimuksessa kiitettäväksi murskausmekanismiksi.

Leikkureissa ylipäänsä hienonnusmekanismi perustuu leikkaavaan voimaan, ja niitä sovelletaan kierrätyksessä laajasti esimurskaimina ennen varsinaista murskausta.



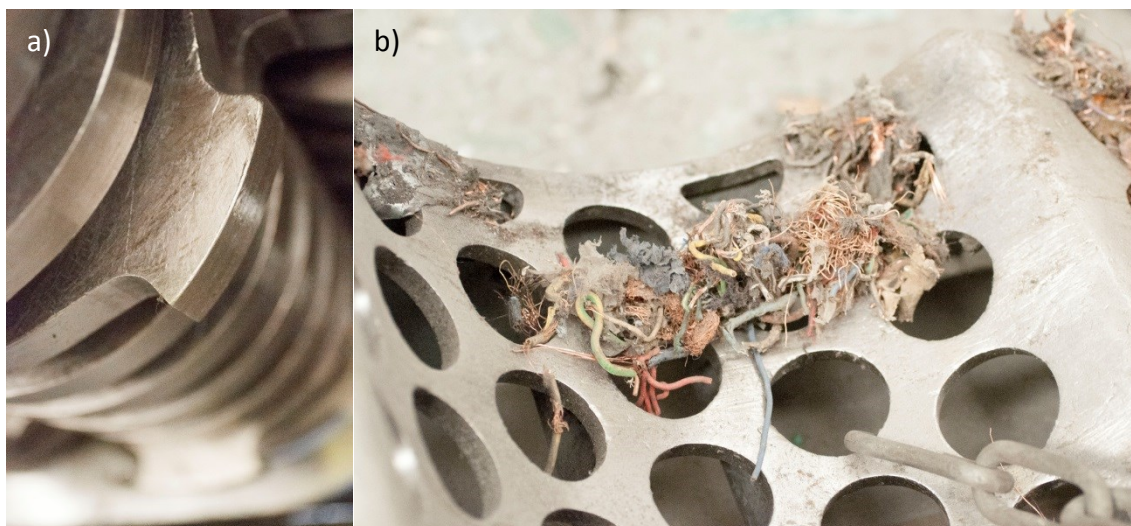
Leikkureiden päätyypit ovat alligaattorileikkurit, giljotiinileikkurit sekä diplomityön keskiössä oleva pyöröleikkuri. Pyöröleikkurin rikkoutumismekanismi ei perustu yhtä suoraviivaisesti leikkaavaan voimaan kuin alligaattori- ja giljotiinileikkureissa, koska se käyttää hyödyksi myös repimis- ja hiertämismekanismeja. Pyöröleikkureilla on myös monia muita teollisuuden ja valmistajien käyttämiä nimiä, kuten leikkaava murskain. (Nijerk 1996)

Pyöröleikkuri koostuu kahdesta tai neljästä akselistä, joihin on kiinnitetty vastakkaisiin suuntiin pyörivät teräshampailla varustetut kiekot (kuva 10). Pyöröleikkurilla voidaan hienontaa hankalasti käsiteltäviä esineitä, joilla on taipumus kiinnittyä ja tukkia muita murskaimia. Tyypillisimpiä kierrätysmateriaaleja ovat metallipurkit, autonrenkaat, muovimateriaalit ja puutavarat. Pyöröleikkurit sopivat kiitettävästi kevyempien sähkö- ja elektroniikkaromujen prosessointiin ja erinomaisesti piirikorttien hienonnuksen, minkä takia kyseinen murskaintyyppi on valittu diplomityöhön. (Nijerk 1996)



Kuva 10 Tämän diplomityön kokeellinen osuus toteutetaan Unthan RS50 pyöröleikkurilla: ① Pääleikkurit, jotka sekä esimurskaavat että uudelleenmurskaavat ② Rostia suurempien partikkeliä kulkeutuminen takaisin murskaukseen ③ Sekundaarileikkurit (Untha shredding technology)

Pyöröleikkureiden kierrosnopeudet ja kapasiteetti ovat vaatimattomammat kuin repijämurskaimilla (eng. shredder). Toisaalta tämän ansiosta pyöröleikkureiden prosessointilämpötila on alhaisempi kuin repijämurskaimilla, ja niitä suositetaan helposti syttyvien ja räjähdysherkkien tuoteryhmien hienonnuksessa (Nijerk 1996). Pyöröleikkureita suositetaan erityisesti piirilevyjen murskauksessa, koska siinä vapautuu mahdollisimman vähän murskauspölyä, joihin on sitoutuneena kallisarvoisia jalometalleja. Murskauspölyn materiaalisäällöstä on erilaisia arvioita, joihin tämä diplomityö yrittää vastata.



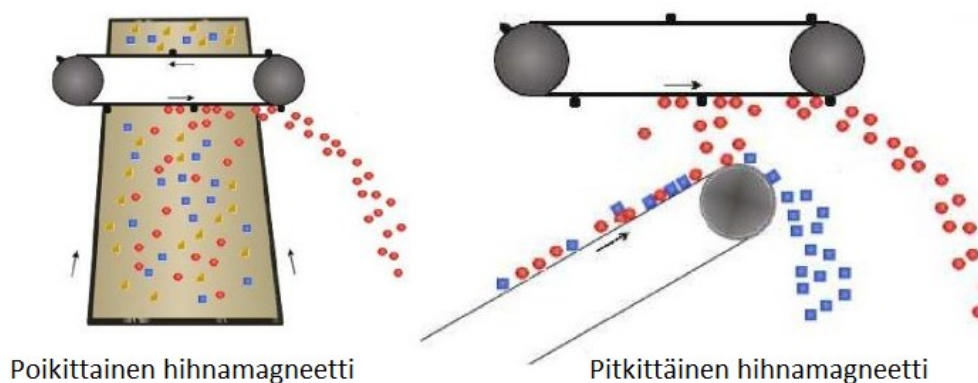
**Kuva 11** Diplomityön kokeissa käytetyn Unthan RS50 pyöröleikkurin a) terä ja b) rostiin muodostunut tukos

Pyöröleikkuri sekoitetaan joskus repijämurskaimeen (eng. shredder), mutta niiden tärkein ero löytyy murskausmekanismista: pyöröleikkurin terät on kiinnitetty akselissa pyöriviin kiekkoihin (kuva 11a), mutta repijämurskaimissa hienonnusta tehostetaan vapaasti pyörivillä vasaroilla (Nijkerk 1996). Vaikka pyöröleikkuri on tehokas murskaaja, sen rostiin kertyy ajan kuluessa kuvan 11b mukaisia tukoksia. Tukoksiin kertyy entisestään muitakin partikkeleita ja suurten voimien vuoksi niihin muodostuu tiiviitä kerroksia. Erityisesti sähköjohdot ovat herkkiä kerääntymään tukoksiksi.

Piirikorttien murskaamisessa ei vielä itsessään ole mitään hyötyä, jos pienennetyistä partikkeleista ei erotella haluttuja materiaaleja talteen. Tässä diplomityössä käytettiin sekä magneettista erotinta että pyörrevirtaerotinta, joista kerrotaan seuraavaksi enemmän.

### 3.3 Magneettinen erottelu

Magnetismiin perustuva erottelu on yksinkertaisimpia ja eniten käytetyimpiä erotusmenetelmiä kierrätystekniikassa. Vaikka magneettista erotusta suorittavia laitteistoja ja teknologioita on valtava kirjo, kaikille on yhteistä ferromagneettisen fraktion ja ei-ferromagneettinen fraktion erottaminen toisistaan. Murskevirran yläpuolelle asetettava hihnamagneetti on yleisin magneettinen erotteluprosessi, ja kyseistä mallia käytetään myös tämän diplomityön kokeellisessa osiossa. Magneettinen hihna nappaa ferromagneettiset partikkelit murskevirran yläpuolelle ja kuljettaa ne omaa hihnaa pitkin, kunnes magneettisen vuon vaikutus lakkaa ja ne putoavat keräysastiaan.



**Kuva 12 Poikittaisen ja pitkittäisen hihnamagneetin toimintaeriaatteet (Directindustry)**

Magneettisen erottelun tunnetuin ongelma on ferromagneettisten ja ei-ferromagneettisten partikkelien epätäydellinen irtautuminen murskauksessa sekä erillisten partikkelien iskostuminen tai yhteenliittyminen toisiinsa runtelevien voimien vuoksi (Hadi et al. 2015). Tämän seurauksena myös ei-ferromagneettisia partikkeleita päätyy ferromagneettiseen jakeeseen, jolloin puhtaan kierrätystuotteen laatu heikkenee. Ghosh et al. jopa kiistelevät kirjallisuuskatsauksessaan (2015) magneettisen erotuksen tarpeellisuudesta piirikorttien kierrättämisessä, sillä heidän mukaansa murskauksen yhteydessä lukuisat ei-ferromagneettiset partikkelit eivät irtaudu ollenkaan tai musertuvat entistä tiiviimmin ferromagneettiseen kappaleeseen, jolloin ne myös kulkeutuvat magneetin mukana ennen aikaisesti pois kierrätysprosessista.

Enemmistö tutkijoista pitää kuitenkin magneettisen erotusmenetelmän puolia. Veit et al. tutkimuksessa (2005) tietokoneiden emolevypiiirilevyjä murskattiin ja seulottiin kolmeen kokoluokkaan ( $F1 < 0,25$  mm,  $0,25 < F2 < 0,50$  mm ja  $0,50 < F3 < 1,00$  mm), jotka altistettiin magneettiselle erottimelle. Alkuperäisen piirikorttisyötteen rautapitoisuus osoittautui kemiallisella analyysillä melko matalaksi (0,13–0,18 %), mutta magneettisella erottimella rauta saatiin rikastettua keskimäärin 43 prosenttiin, ja nikkelin pitoisuus magneettisesta fraktiosta oli 15 %. Myös kuparia päätyi 13 % pitoisuudella magneettiseen fraktioon. Artikkelin ei paljasta lopun 29 % magneettisen jakeen materiaali jakaumasta mitään eikä ota tulosten esittelyn lisäksi pahemmin kantaa saatujen tulosten mahdollisiin korrelaatioihin.

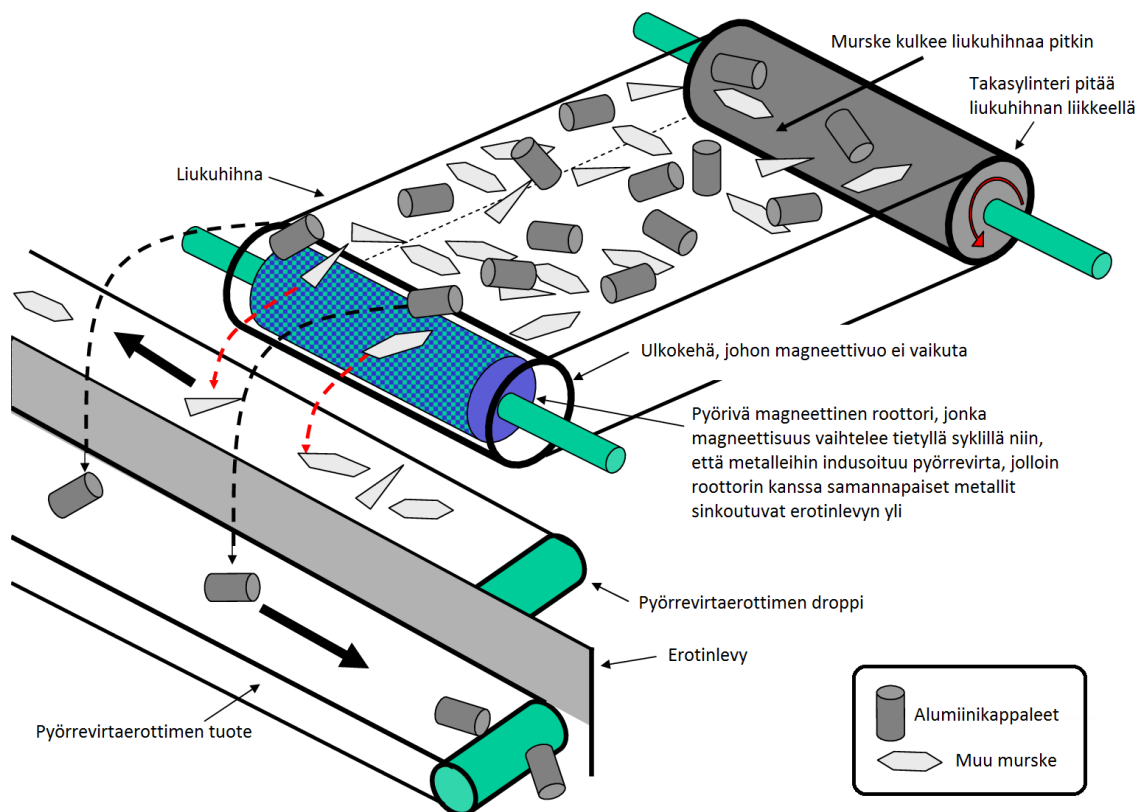
Yazicin et al. tutkimus (2015) keskittyi piirikorttimurskeen ferromagneettisen fraktion talteenottoasteeseen sekä siitä aiheutuvien ei-ferromagneettisten metallien sekä jalometallien hävikkiin. Magneettisen erottimen magneettivuota, kierrosnopeutta ja erotuskulmaa muuttamalla havaittiin, että valituista muuttujista magneettikenttä vaikuttaa huomattavasti eniten ferromagneettisten kappaleiden talteenottoon. Ferromagneettisista metalleista raudan talteenottoprosentti vaihteli 76–96 % välillä, nikkelillä puolestaan 55–93 prosentin välillä, kun taas kobolttin saanto oli yllättävän

matala, 12-76 %. Perusmetalleista 6-70 % piirikorttimurskeen kuparista päätyi magneettisen jakeen mukaan, jalometalleista vastaava hävikkiluku oli 16-79 % ja palladiumilla 5-60 %. Tutkimuksen SEM-kuvat paljastivat, että kuparin suuret hävikkiluvut johtuvat ainakin kuparin hyödyntämisestä rautaseoksissa ja jalometallien vaihtelevat luvut selittyvät puolestaan niiden käytöstä raudan ja nikkelin kanssa sekä Co-Ni-seosaineena. Tutkimuksessa ei oteta millään tavalla kantaa murskauksen aiheuttamaan partikkelien puhtaaksijauhausasteeseen eikä sen heijastamiin erotusvaikutuksiin.

### **3.4 Pyörrevirtaerotin**

Pyörrevirtaerotin on yksi erikoissovellus magnetismiin perustuvasta erotusmenetelmästä, ja sitä pidetään yhtenä kierrätysalan merkittävimpanä keksintönä viimeisten vuosikymmenien aikana. Toisin kuin perinteinen magneettinen erotin, pyörrevirtaerotin mahdollistaa ei-ferromagneettisen metallin erottamisen muusta materiaalivirrasta ferromagneettisen fraktion lisäksi. Laitteisto koostuu liukuhihnasta ja vahvavirtaisesta pyörivästä magneettisesta roottorista, jonka polaarisuus vuorottelee ei-metallisen rummun sisällä. Systeemi luo voimakkaan ja jatkuvasti muuttuvan magneettivuon, mikä indusoi metallissa pyörrevirta-ilmiön, eli materiaalin sisälle syntyy sähkövirta. Luotu pyörrevirta indusoi ei-ferromagneettiseen metalliin puolestaan oman magneettikentän, joka on samannapainen kuin roottorin magneettikenttä, mikä johtaa hylkimisvoimaan ja metallin sinkoutumiseen liukuhihnan loppupäästä. Pyörrevirtaerottimen toimintaperiaate on nähtävissä kuvasta 13. (Hester et al. 2009; Rem et al. 1997)

Ei-ferromagneettiset metallit singahtavat erilaisilla liikeradoilla riippuen niiden sähköjohtokyvystä sekä kappaleen painosta. Ferromagneettiset metallit puolestaan pysyvät liukuhihnalla niin kauan kunnes ne eivät ole enää magneettikentän vaikutuspiirissä. Muut ei-metalliset kappaleet, kuten muovit ja puutavarat eivät reagoi magnetismiin ja putoavat liukuhihnan reunalta suoraan alas. Pyörrevirtaerotin kehitettiin alun perin ei-ferromagneettisten metallien talteenottoon murskatusta autoromun syötteestä, mutta se soveltuu erinomaisesti myös murskatun piirikorttiromun erotusprosessiksi. (Hester et al. 2009; Rem et al. 1997)



**Kuva 13 Pyörrevirtaerottimen toimintaperiaate (Rumpke Recycling)**

Tutkimassani Kuusakosken Kauklahden prosessissa pyörrevirtaerotinta käytetään nimenomaan alumiinin talteenottamiseksi. Syy löytyy metallien ominaisuuksista, joista sähkönjohtavuuden ja tiheyden suhde  $\sigma/\rho$  on tärkein kriteeri, sillä suurempi sähkönjohtavuus tarkoittaa suurempaa hylkivää voimaa ja pienempi tiheys tarkoittaa kevyempiä kappaleita. Kuten taulukosta 3 voidaan nähdä, alumiinin  $\sigma/\rho$ -suhde on huomattavasti suurempi kuin muilla esimerkkimetalleilla, joten sen erottaminen pyörrevirtaerottimella on helpompaa kuin matala-arvoisimmilla metalleilla. (Kang et al. 2005)

**Taulukko 3 Pyörrevirtaerottimessa tarvittavia metallien ominaisuuksia**

| Materiaalit | Sähkönjohtavuus $\sigma$ ( $10^{-8}/\Omega\text{m}$ ) | Tiheys $\rho$ ( $10^3 \text{ kg/m}^3$ ) | Sähkönjohtavuus/tiheys $\sigma/\rho$ ( $10^3 \text{ m}^2/\Omega\text{kg}$ ) |
|-------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Alumiini    | 0,35                                                  | 2,70                                    | 13,10                                                                       |
| Sinkki      | 0,17                                                  | 7,10                                    | 2,40                                                                        |
| Hopea       | 0,63                                                  | 10,50                                   | 6,00                                                                        |
| Kupari      | 0,59                                                  | 8,90                                    | 6,60                                                                        |
| Messinki    | 0,14                                                  | 8,50                                    | 1,70                                                                        |
| Lyijy       | 0,05                                                  | 11,30                                   | 0,40                                                                        |

Myös partikkelien muoto ja koko vaikuttavat pyörrevirtaerottimen erotustehokkuuteen. Levymäiset kappaleet erottuvat paremmin kuin pallomaiset tai epäsäännölliset osat, kun taas kalvomaisia ei-ferromagneettisia kappaleita pyörrevirtaerotin ei kykene erottamaan. Jotta kappaleiden erotus tapahtuisi kiitettävällä tarkkuudella, partikkelien tulisi olla kooltaan ja muodoltaan mahdollisimman samanlaisia. Jos esimerkiksi partikkelien koko, muoto ja sähkönjohtavuus eroavat toisistaan, erotustehokkuus jää todella matalaksi. Lisäksi liian pienet partikkelit (alle 2 mm) eivät reagoi toivotulla tavalla. (Tukiainen 2015)

Tässä kappaleessa syvennyttiin kierrätyspiirikorttien tavallisimpiin hankintamenetelmiin (manuaaliseen purkuun ja erotteluun) sekä diplomityön kannalta oleellisiin yksikköprosesseihin (leikkaavaan murskaukseen, magneettiseen erottamiseen ja pyörrevirtaerottimeen). Nyt kun tiedetään, mitä piirikortit ovat ja miten niitä kierrätetään, on aika perehtyä varsinaisiin rikkoutumis- ja irtautumismekanismeihin. Seuraavan osion on tarkoitus tukea kokeellisen osion tulosten tarkastelua sekä ohjata perusteltuihin johtopäätöksiin.

## 4 Rikkoutumis- ja irtautumismekanismit

Taloudellisen kannattavuuden ja mahdollisimman mutkattoman metallurgisen jatkokäsittelyn kannalta on välttämätöntä saada edellisessä kappaleessa mainittujen murskaus- ja erottelumekanismien lopputuotteena mahdollisimman puhtaita fraktioita (Quan et al. 2012). Kuitenkin kierrätyksen haastavan luonteen vuoksi täysin puhtaita jakeita ja 100 % materiaalisaantia on mahdotonta saavuttaa. Tyypillisesti murskausvaiheessa eri materiaaleista koostuvan komponentin osat eivät irtoa perusteellisesti toisistaan ja kulkeutuvat erotteluvaiheessa hallitsevimman materiaalin mukana. Esimerkiksi kuparikämin sisältävän teräksisen sähkömoottorin epätäydellisessä murskauksessa kupariosat kulkeutuvat magneettisen erottelun mukana teräsfraktioon, mikä johtaa kuparin menettämiseen teräksen metallurgisen prosessiluonteen vuoksi.

Teoriassa huolellisemman ja optimoidumman murskaus- ja erotusprosessin avulla komponentin materiaalit saadaan irtautumaan toisistaan ja kerättyä omiksi fraktioiksi, jolloin materiaalihävikki pienenee ja ulostulojakeesta saa paremman myyntikatteen. Todellisuudessa komponenttien materiaalit voivat olla todella tiukasti kiinni toisissaan vaihtelevilla kiinnitysmekanismeilla, mikä vaikeuttaa tehokasta hienonnuksen ja murskausprosessia. Tässä kappaleessa esitellään diplomityön kannalta oleellinen termi, irtautumisaste (eng. degree of disconnection), joka tarkoittaa murskauksen jälkeen puhtaiden partikkelien määrää suhteessa ei-vapautuneisiin partikkeleihin. Puhdas partikkeli viittaa komponenttiin, jossa ei ole kiinni muusta materiaalista koostuvia kappaleita. Epäpuhtaassa partikkelissa on vastaavalla logiikalla edelleen kiinni jokin muu materiaali. Irtautumisaste muistuttaa todella paljon puhtaaksijauhausastetta (eng. degree of liberation), mutta se käsittää laajemmin myös erilaiset piirikorttien elementit, komponentit ja ainesosat.

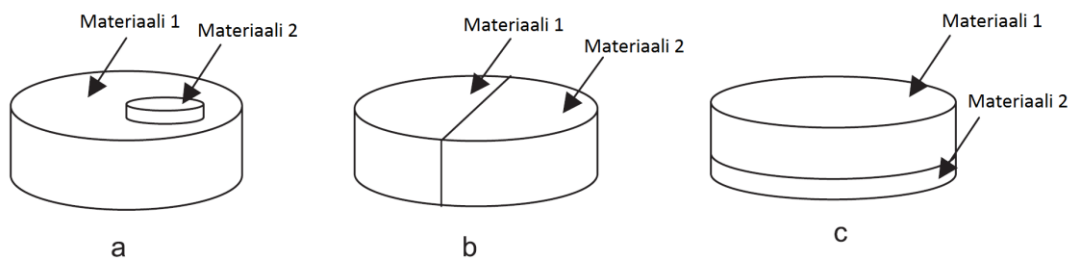
Piirikortti rikkoutuu partikkeleiksi suhteellisen helposti leikkaavan murskauksen rasituksessa, joissa iskevä, leikkaava, repivä, puristava ja hiertävä voima näyttelevät suurinta roolia. Leikkaavan murskaimen monet erilaiset rasitustyyppit ovat ideaalisia kompleksisen ja erilaisista materiaaleista koostuvat piirikortin hajottamiseen. (Ogunniyi et al. 2009). Seuraavaksi on tarkoitus selvittää, minkälaisista elementeistä piirikortin murskautuvuus ja partikkelien eroteltavuus sitten koostuu, ja mitä se tarkoittaa piirikorttien mekaanisen kierrätettävyyden kannalta. Tässä kappaleessa käsitellään elektroniikkaromun tyypillisimpiä kiinnitysmekanismeja, toteutettuja piirikorttien murskaukokeiden tuloksia sekä murskauksessa vapautuvia pölyjä.

## 4.1 Liitoskohdat

Mineraaliprosessoinnin puolella puhtaaksijauhatuksen teoriaa ja simulointia on tutkittu vuosikymmenien ajan, ja kehittyvän teknologian tuella puhtaaksijauhatuksen mekanismeja ymmärretään yhä paremmin. Silti monista kiviaineksista koostuvan mineraalin puhtaaksijauhatuksen mallintamisessa on lukuisia haasteita, vaikka sen rakenne on suhteellisen yksinkertainen verrattuna heterogeeniseen ja kompleksiseen sähkö- ja elektroniikkaromuun. Richard et al. (2005) vertasivat malmien ja kuluttajaelektroniikan rikkoutumis- ja irtautumismekanismeja, ja huomasivat niissä ratkaisevia eroja. Erityisesti luonnollisten kiviainesten kiinnittyminen toisiinsa malmissa oli lähtökohtaisesti jo erilainen asetelma kuin ihmisen tuottamissa monimutkaisissa komponenttiliitoksissa. Heidän mielestään uskottavan sähkö- ja elektroniikkaromun irtautumismekanismin ymmärtäminen vaatii monimutkaisen luonteensa vuoksi toisenlaista lähestymistapaa kuin klassinen mineraalitekniikka.

Castro et al. selvityksessä (2005) hahmoteltiin ja yksinkertaistettiin 3 mahdollista materiaaliliitääntä, jotka vaikuttavat komponenttien irtautumisasteeseen murskauksessa. Kuva 14 konkretisoi näitä liitääntätyppejä eri luokkajaan mukaan:

- a) Kärkiliitos: Tämä luokka käsittää lähinnä mekaanisia liitääntöjä, kuten niittejä ja pultteja. Liittävä elementti on kuvassa 14 Materiaali 2, ja se on kiinnitetty usein suurempaan komponenttiin, Materiaali 1:een.
- b) Rajaliitos: Kaksi materiaalia on kiinnitetty toisiinsa yhteisellä rajalla, kuten liimauksella tai hitsauksella. Kiinnittävän elementin määrä riippuu Materiaalien 1 ja 2 suhteellisista paksuuksista.
- c) Pintaliitos: Tässä luokassa Materiaali 2:n koko pintaan on liitetty Materiaali 1:stä, kuten pinnoituksissa tai laminaattikomposiiteissa.



**Kuva 14 Geometrinen malli yksinkertaistaa materiaaliliitääntöjä: (a) Kärkiliitos, (b) Rajaliitos, (c) Pintaliitos (Castro et al. 2005)**

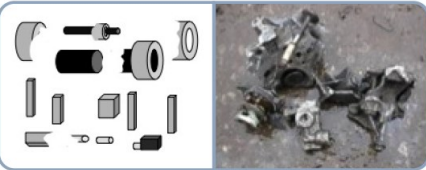
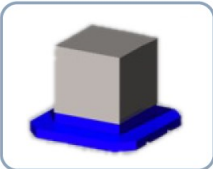
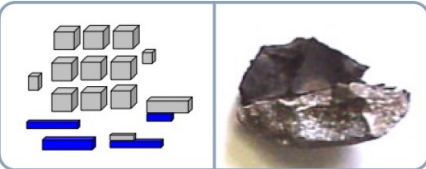
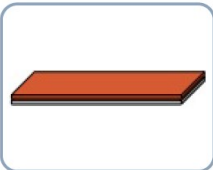
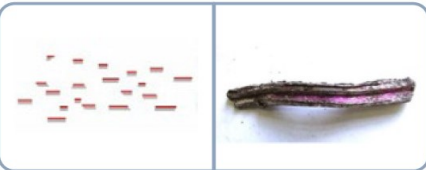
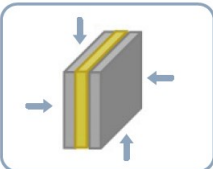
Yllä mainitun geometrisen mallin avulla pystyttiin arvioimaan kierrätettävän tuotteen liitääntöjen määrää ja laatuja sekä niiden vaikutusta irtautumisasteeseen murskauksessa. Castro et al. tutkimuksessa (2005) esimerkiksi havaittiin, että autojen kierrätyksessä kärkiliitokset olivat ylipäänsä dominoivin liitosluokka. Tutkimuksessa



huomattiin myös, että irtautumisasteen kannalta kärkiliitokset ovat selvästi parempia kuin raja- ja pintaliitokset. Lisäksi parempiin irtautumistuloksiin päästiin, kun kärkiliitännät olivat isompia ja lukumäärällisesti niitä oli vähän. Kyseisiä tuloksia voitaisiin soveltaa pitkälti myös piirikorttien murskauksessa.

Castro et al. tutkimuksessa (2005) huomattiin lisäksi, että auton murskauksessa kemialliset liitokset olivat merkittävämpiä, kun kappaleiden koot pienenivät ja vastaavasti suuremmilla kappaleilla fyysisten liitosten merkittävyys korostui. Tämä tarkoitti sitä, että fysikaalisia liitännöitä pystyttiin rikkomaan enemmän ja irtautumisastetta kyettiin kasvattamaan, kunhan kappaleita vain hienonnettiin pienempään kokoon. Kemialliset liitännät eivät käyttäytyneet vastaavasti. Vaikka partikkelit hienonnettaisiin todella pieniksi, kemiallisten liitännöjen atomien ja molekyylien väliset etäisyydet olisivat silti liian pienet, jotta komponentit irtautuisivat toisistaan täydellisesti.

Samanhenkiseen lopputulokseen päädyttiin myös Reuter et al. tutkimuksessa (2013). Piirikortit koostuvat lukemattomista osista, komponenteista ja kappaleista, jotka ovat tavalla tai toisella kiinni toisissaan. Osat voidaan esimerkiksi hitsata, juottaa, ruuvata, pultata, niitata, liimata ja kiinnittää kemiallisesti tai vaahtomuovilla toisiinsa. Reuter et al. (2013) arvioivat ja luokittelivat erilaisia liitostyyppisiä ja niiden irtautumiskykyä toisistaan murskauksen jälkeen, minkä lopputulos on tiivistetty kuvaan 15. Heidän mukaansa pulttaus- ja niittausliitokset on melko helppo murtaa, mikä johtaa korkeaan irtautumisasteeseen. Liimauksen, juotoksen ja vaahtomuoviliitoksen rikkominen on kohtalaisen mutkatonta, mutta pinnoitettuja tai maalattuja kappaleita on todella haastavaa irrottaa toisistaan.

| Liitostyyppi          | Ennen hienonnusta                                                                  | Hienonnuksen jälkeen                                                                | Irtautumiskäyttäytyminen     |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Pulttaus/niittaus     |   |   | Suuri irtautumisaste         |
| Liimaus/juotos        |   |   | Keskitasoinen irtautumisaste |
| Pinnoutus/maalaus     |   |   | Matala irtautumisaste        |
| Vaahtomuovi-kiinnitys |  |  | Keskitasoinen irtautumisaste |

Kuva 15 Irtautumiskäyttäytymisen jaottelua liitostyyppin mukaan (Reuter et al. 2013)

Reuterin ja van Schaikin (2013) mukaan liitoskohtien onnistunut murtaminen ja materiaalien irtautuminen toisistaan murskauksessa riippuvat ennen kaikkea:

- Liitettyjen materiaalien mekaanisista ominaisuuksista, kuten hauraudesta, sitkeydestä, kovuudesta tai murtolujuudesta
- Materiaalien välisestä liitostyypistä, kuten ruuvauksesta vs. liimauksesta
- Liitoksen ominaisuuksista, kuten ruuvien koosta komponenttiin nähden tai juotoksen laadusta
- Komponentin tai tuotteen monimutkaisuudesta ja heterogeenisyydestä, kuten liitosten tai kiinnitettyjen materiaalien määrästä
- Metalliosien termodynaamisesta yhteensopivuudesta

Monimutkaista irtautumismekanismia murskauksessa on kuvattu myös tuotteiden suunnittelun näkökulmasta, joka riippuu ennen kaikkea tuotteen sisältämästä materiaalikirjosta sekä komponenttien välisistä liitoksista. Jo pelkästään piirikortit, puhumattakaan muista sähkö- ja elektroniikkaromuvirroista, sisältävät sekalaisen joukon erilaisia materiaaleja metalleista muoveihin, joten lähestymistavan on oltava murskautumisen mallintamisessa paljon heuristisempi kuin mineraaliprosessoinnissa (Goodship et al. 2012). Van Schaik ja Reuter (2010) ovat tutkineet tuotteiden

suunniteluominaisuuksien vaikutusta murskautumis- ja irtautumismekanismeihin, ja pystyvät jossakin määrin ennustamaan tiettyjen suunnitteluratkaisujen vaikutuksen murskauksen jälkeiseen partikkelien koostumukseen. Heidän kokeidensa perusteella esimerkiksi piirikortin eri materiaaleista koostuvien komponenttien irtautumisaste on verrattain matala.

Sun et al. tutkimuksessa (2015) havaittiin tietotekniikkaromun murskauksessa eri metalleille erilaisia irtautumisasteita. Kuparin ja raudan irtautumisaste oli korkea, kun taas nikkelillä, neodyymillä, hopealla ja kullalla vastaava vapautumista kuvaava aste oli matala. Keskitasoinen irtautumisaste havaittiin puolestaan alumiinille, tinalle, lyijylle ja sinkille. On kuitenkin muistettava, että pelkästään huolellinen murskaaminen ja korkea irtautumisaste eivät takaa kiitettävää erottelutehokkuutta. Partikkelien erotteluasteeseen vaikuttaa myös kappaleen sisältävien materiaalien fysikaalisiin erottelumekanismeihin pohjautuvat ominaisuudet - kuten tiheys, magneettisuus, sähkön johtavuus ja väri – sekä näiden eri materiaalien osuudet toisiinsa nähden. Näin ollen korkea irtautumisaste tarjoaa lähinnä hyvät lähtökohdat onnistuneelle erotusprosessille.

Erilaisten materiaalien liitokset toisiinsa ja irtautumisaste murskaamisen jälkeen määrittää käytännössä piirikorttien kierrätettävyyden. Murskattujen materiaalien fysikaaliset ja kemialliset koostumukset sekä niiden väliset liitokset määrittävät, kuinka tehokkaasti materiaalit saadaan metallurgisissa ja muissa jatkoprosesseissa talteen. Irtautumismekanismien ymmärtäminen on kriittistä ulostulovirtojen ennustamisen ja simuloinnin sekä maksimaalisen talteenoton varmistamiseksi. Erityisesti arvokkaiden materiaalien, kuten kullan, sekä myrkyllisten aineiden irtautuminen ulostulojakeiden suhteen kiinnostaa kierrätyslaitoksia optimaalisen murskaus- ja erotteluprosessien suunnittelun kannalta. (Goodship et al. 2012)

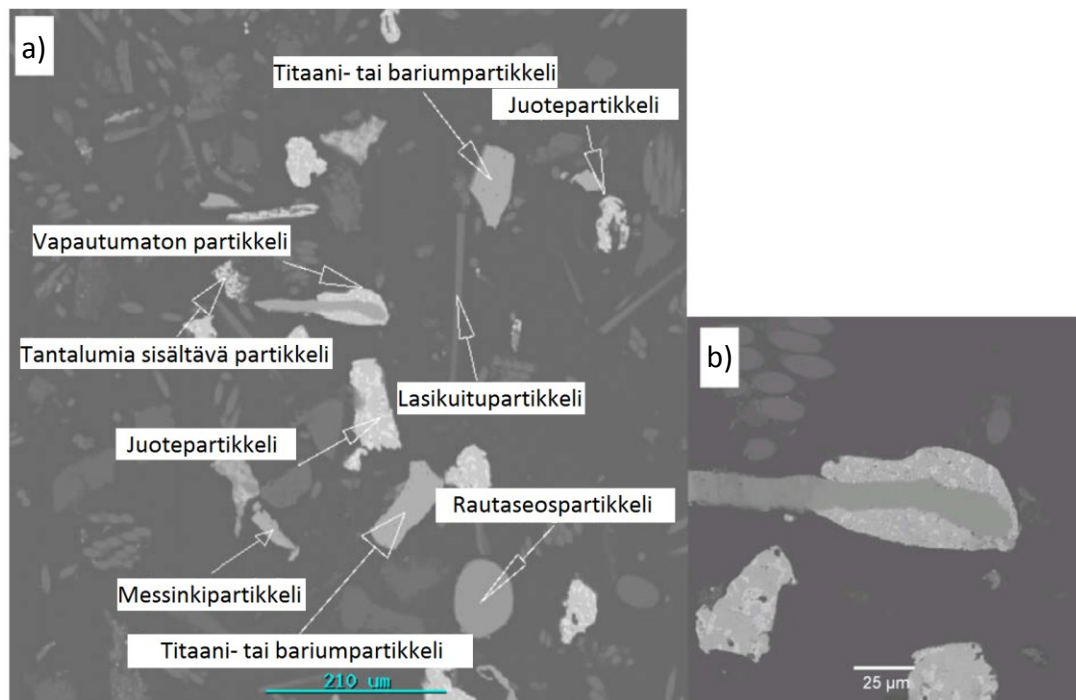
## **4.2 Piirikorttien murskautuvuus**

Kirjallisuuteen tutustuessa tulee nopeasti selväksi, että sähkö- ja elektroniikkaromutuotteiden puhtaaksijauhatuksen tutkiminen on haastavampaa kuin mineraaliteknologiassa. Ensinnäkin murskattujen partikkelien dimensiot ovat hyvin vaihtelevia ja lukuisat tuotteen sisältävät materiaalit eivät ole jakautuneet isotrooppisesti, mikä hankaloittaa kuva-analyysiin perustuvaa tutkimusta. Kuten edellisessä kappaleessa tuli ilmi, murskauksessa kaikkia materiaalien välisiä liitoksia ei ole mahdollista rikkoa, minkä vuoksi monista elementeistä koostuvat partikkelit vievät erotusprosessissa mukanaan myös epäedullisia materiaaleja. Näin ollen epätäydellisen irtautumisen johdosta metallurgiseen prosessiin päätyy haitallisia materiaaleja, joita pitää kompensoida lisäämällä primääriraaka-ainetta. Tämä puolestaan tarkoittaa matalampaa resurssitehokkuutta, kohonneita prosessikustannuksia sekä mahdollisia laatuongelmia. Kaksi tunnettua esimerkkiä ovat kuparin negatiivinen vaikutus teräksen

kierrätyksessä ja raudan vahingollinen vaikutus alumiinin kierrätyksessä. (Castro et al. 2005)

Piirikorttien murskauksen yhteydessä on yleisesti havaittu korkeaa irtautumisastetta. Guo et al. tutkimuksessa (2011) haluttiin erityisesti varmistaa mahdollisimman korkea irtautumisaste piirikorttimurskeelle, joten heidän koeajoissaan sovellettiin leikkaavaa ja iskevää voimaa kahdella peräkkäisellä murskaimella. Kokeissa huomattiin, että metalliset sekä ei-metalliset osat irtautuivat murskausten avulla toisistaan lähes täydellisesti alle 0,6 mm partikkelikoossa. Tutkijat kokivat, että juuri kaksivaiheinen murskausprosessi oli avaintekijä korkean irtautumisasteen saavuttamisessa.

Hallitsevimmille metalliseoksille on myös vasaramurskaimella todettu 600 µm:n partikkelikoossa jopa 100 % puhtaaksijauhatusastetta (Wen et al. 2005). Ogunniyi et al. tutkimuksessa (2009) otettiin SEM-kuvia piirikorttimurskeesta, jonka perusteella laskettujen epäpuhtaiden komponenttien suhde oli peräti 1:194, eli puhtaaksijauhatusaste oli 99,48 %. Kuten tutkimuksessa esitetyssä kuvasta (kuva 16) voidaan havaita, melkein kaikki -75+38 µm kokoluokan partikkeleista oli irtautunut toisistaan, poislukien yksi juotokseen kiinnittynyt kuparikappale.



Kuva 16 a) SEM-kuva -75 +38 µm murskatuista piirikorteista ja b) lähikuva vapautumattomasta partikkelista (Ogunniyi et al. 2009)

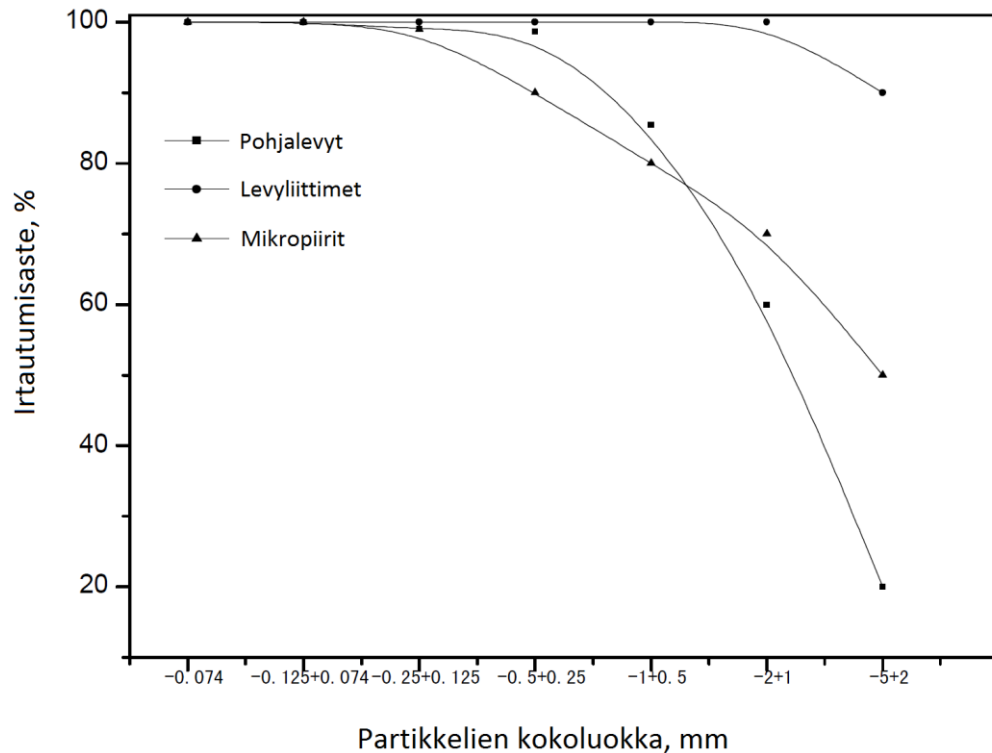
Edellä mainitut positiivissävytteiset tutkimustulokset eivät ole kuitenkaan koko totuus piirikorttien murskauskokeista. Esimerkiksi Menadin et al. selvityksessä (2013) SER-näytteen murskeesta saatiin käsin laskemalla ristiriitaiset tulokset. Toisaalta alumiinille saatiin irtautumisasteeksi 100 % ja muoville 94 %, mutta toisaalta ferromagneettisella fraktiolla vastaava luku oli vain 67 % ja kuparilla 53 %. Cui ja Forssbergin kokeissa (2007) puolestaan huomattiin, että piirikorttien murskauksen jälkeen kuparin irtautumisaste oli vaatimatonta, koska kupari ei irronnut muovisista ja keraamisista materiaaleista.

Tyypillisesti parempaan puhtaaksijauhatusasteeseen pääsee niin mineraalitekologiassa kuin kierrätyksessä perusteellisemmalla murskaamisella. Murugan et al. tutkimuksessa (2008) murskattiin piirikortteja vasara- ja iskumurskaimella, ja visuaalinen tarkastelu paljasti, että suurimmilla partikkelikooilla (2,5 mm, 2,0 mm ja 1,25 mm) metallit eivät olleet täysin irtautuneet muovi- ja keraamiosista. Pienemmässä partikkelikoossa irtautumisaste oli jo paljon parempi. Quan et al. toteuttivat tutkimuksen (2012) piirikorttien kaksivaiheisesta murskaamisesta rengasmurskaimella ja jauhinmyllyllä. Tutkimuksen piirikorttipohjat koostuivat epoksihartsilevyistä, joihin oli kiinnitetty kuparifolio ja sitä oli vahvistettu lasikuidulla. Aivan kuten Reuter et al. tutkimuksessa (2013) todettiin, pinnoitettujen levyjen irtautumisaste murskauksessa on varsin huono. Kuitenkin tarpeeksi pienessä partikkelikoossa (alle 0,59 mm) kuparilevyt kuoriutuivat pohjalevystä irti, sillä pohjalevy on huomattavasti hauraampi materiaali kuin kupari.

Zhang et al. tutkivat (1999) piirilevyn murskattujen osien koon ja muodon vaikutusta irtautumisasteeseen. Tutkimuksessa huomattiin, että alle 6 mm partikkelikoossa ferromagneettiset ja kuparipartikkelit olivat täysin irtautuneita omiksi elementeikseen. Alumiinin havaittiin saavuttavan täyden irtautumisasteen jo karkeammassa kokoluokassa. Vidyadhar et al. puolestaan kirjoittivat raportissaan (2012), että alle 150 µm partikkelikoossa piirikorttien murskeessa kaikki metallien ja ei-metallisten osien liitokset oli saatu rikottua. Sun et al. kokeissa (2015) tietokoneromun murskaamisen ja seulonnan tuloksena havaittiin, että jalometallien pitoisuus kasvaa partikkelikoon pienentyessä. Esimerkiksi hopean pitoisuus kaksinkertaistui 1 mm fraktion pienentyessä alle 0,2 mm:iin. Koska piirikorteista löytyy yli kymmenkunta erilaista metallia, luotettava kemiallinen analyysi vaatii riittävän pientä partikkelikokoa sekä kiitettävää puhtaaksijauhatusastetta (Ogunniyi et al. 2009).

Wen et al. tutkimuksessa (2005) tietokoneista lähtöisin olevat emolevypiirikortin osat (pohjalevy, levyliittimet ja mikropiirit) murskattiin materiaalien irtautumisasteen selvittämiseksi kahdessa vaiheessa valssi- ja vasaramurskaimella. Kuten kuvasta 17 voidaan todeta, metallien irtautumisaste kasvaa partikkelikoon pienentyessä. Partikkelikoosta 0,5 mm lähtien monimutkaisesti ja tiukasti kootuilla pohjalevyillä sekä

mikropiireillä saavutetaan kuitenkin 100 % irtautumisaste. Levyliittimen metalliset kappaleet irtautuvat puolestaan melko helposti muoviosista jo kevyellä murskausvoimalla, ja 100 % irtautumisaste saavutetaan jo 2 mm kokoluokassa. Tutkijat uskovat, että ennen kaikkea vasaramurskaimen iskevä voima mahdollisti kyseiset irtautumistasetulokset.



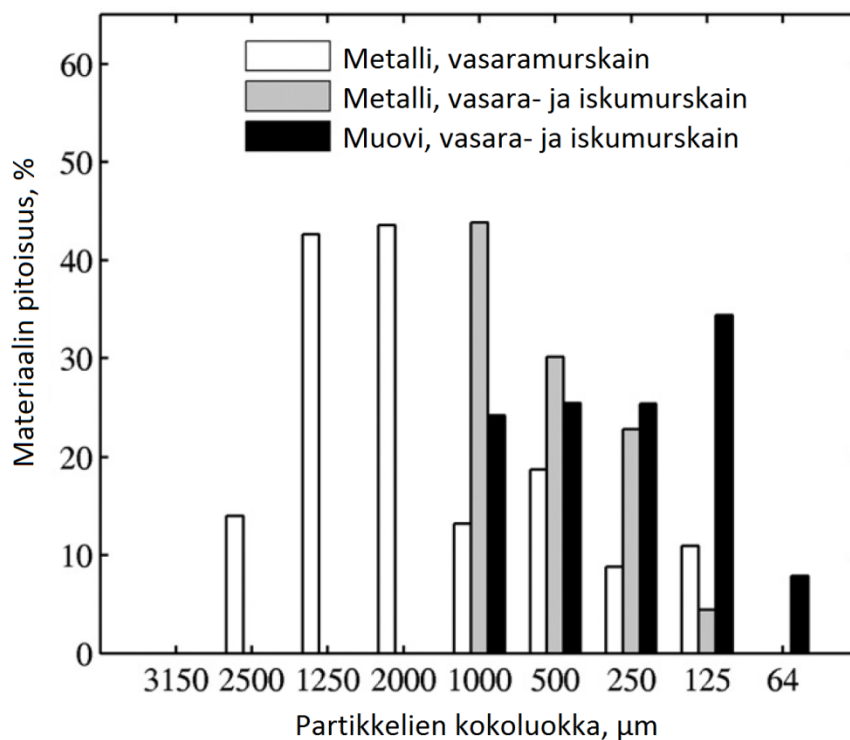
Kuva 17 Piirikortin eri osien metallien irtautumisasteet partikkelikoon funktiona ei-metallisiin osiin nähden kaksivaiheisen murskaamisen jälkeen (Wen et al. 2015)

On kuitenkin huomattava, että perinpohjainen kierrätysvirtojen hienontaminen nostaa tuotanto-, energia- ja työkustannuksia, eikä se silti takaa kaikkien materiaaliosien irtautumista toisistaan (Murugan et al. 2008). Samaan tulokseen päätyi myös Hou et al. tutkimus (2013). Siinä piirikorttien murskaus iskupalkkimurskaimella paljasti, että murskaustehokkuus laskee piirikorttipartikkelien pienentyessä. Tämä tarkoittaa sitä, että pienempien partikkelien murskaaminen on yksinkertaisesti vaikeampaa, mikä voi johtaa myös energaintensiivisempiin prosessointiratkaisuihin. Lisäksi perusteellisempi murskaaminen edistää partikkelien plastista muodonmuutosta, mikä voi johtaa jo irtautuneiden materiaalien uudelleentakertumiseen toisiinsa kompleksisiksi komponenteiksi. Pienempi kappalekoko lisää myös partikkelien ominaispinta-alaa, joka kytkeytyy reaktiivisten metallien, kuten alumiinin ja magnesiumin, ylimääräisiin hapettumisesta johtuviin häviöihin. (Castro et al. 2005)

Quan et al. tutkimuksessa (2012) huomattiin, että murskausten jälkeen alle 0,59 mm partikkelit muodostivat 82,53 % kokonaispainosta ja pienikokoisimmat partikkelit,

<0,15 mm, muodostivat suurimman yksittäisen painofraktion 37,15 %:lla kokonaispainosta. Alle 0,15 mm partikkelit olivat niin hienojakeisia, että ne muodostivat helposti kasautuman, jota oli hankala erotella. Tutkimuksessa suositeltiin murskaamaan piirikortit 0,15–0,59 mm partikkelikokoon, jotta metallien ja ei-metallisten partikkelin irtautumisaste ja erotusprosessit olisivat mahdollisen tehokkaita. Näin ollen optimaalinen murskauskoko ja murskausmekanismi on välttämätöntä tuntea, jotta epätäydellisestä irtautumisesta johtuvat materiaalihäviöt voidaan minimoida ja resurssitehokkuus maksimoida (Castro et al. 2005).

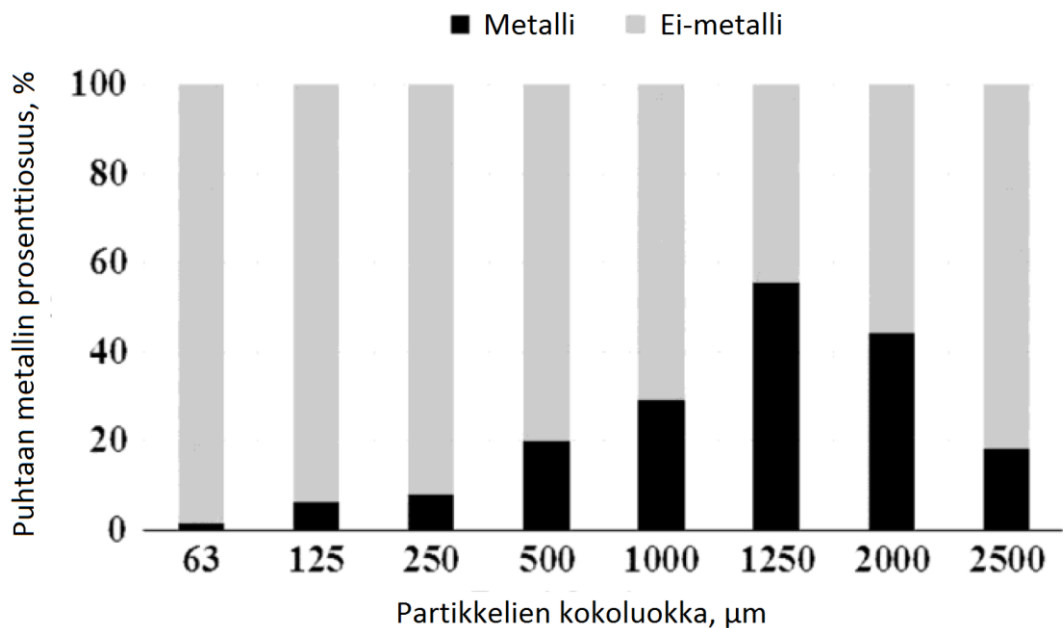
Kirjallisuudessa toistui piirikorttien murskauskokeissa yksi elementti ylitse muiden: Metalliset partikkelit säilyivät isommassa partikkelikoossa paremmin kuin ei-metalliset kappaleet todennäköisesti sitkeämmän ja kestävämmän koostumuksensa vuoksi. Tämä voidaan todeta muun muassa kuvasta 18, jonka mukaan muoviosat murskaantuvat pienempään kokoon kuin metallipartikkelit. Pienemmässä kokoluokassa (<64 µm) ei havaita yhtään metalleja ja vähän muovia, jolloin kyseinen kokoluokka sisältää enimmäkseen piirilevyistä lähtöisin olevaa abrasiivista lasikuitua (Murugan et al. 2008).



**Kuva 18 Murskattujen piirikorttien metallin ja muovin osuus partikkelien kokoluokkaan nähden (Murugan et al. 2008)**

Sun et al. koeajojoissa (2015) useat metallit havaittiin tietokoneromun murskauksen ja seulonnan tuloksena suosivan suurempaa kappalekokoa. Vastaavasti piitä löytyi enemmän pienikokoisempien partikkeleiden joukosta, koska lasi ja keraamit murskautuvat hauraan rakenteensa takia suhteellisen helposti. Myös Wen et al.

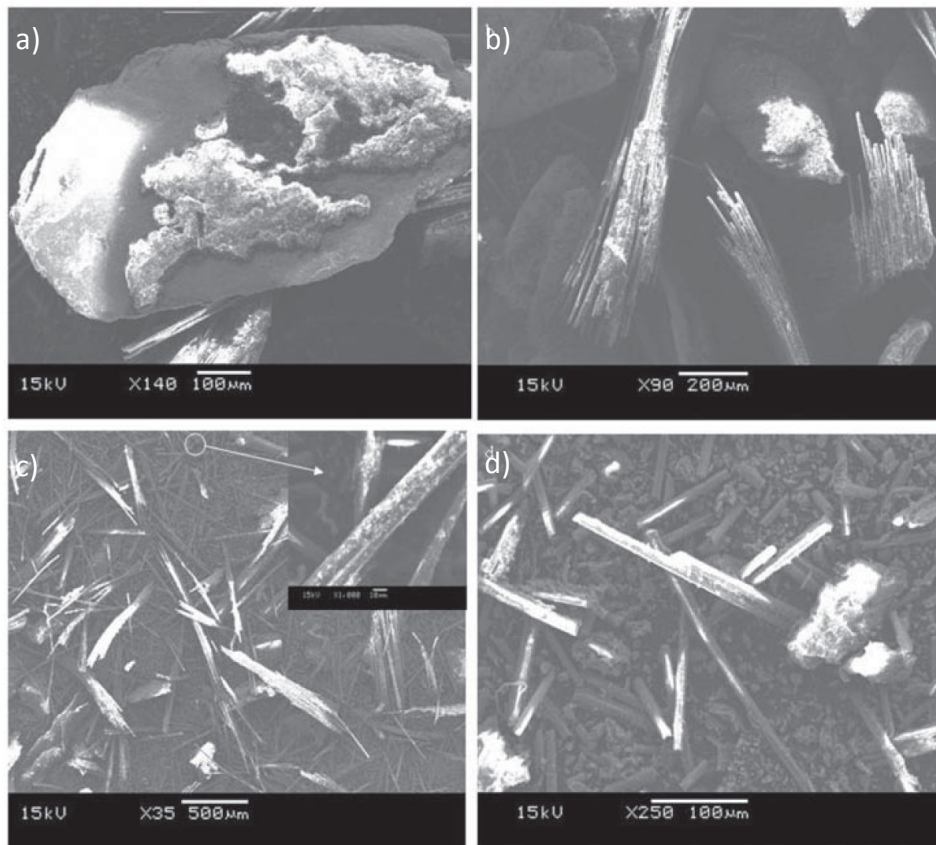
piirikorttien murskauskokeissa (2005) huomattiin, että sitkeät metallikappaleet rikastuvat enemmän karkeampaan kokoluokkaan ja hauraammat muovi- ja keraamiosat hienompaan kokoluokkaan. Eswaraiahin et al. tutkivat (2015) emolevypiiirikorttien kaksivaiheista murskausta, jonka tulosten pohjalta tuotetun kuvan 19 mukaan huomattava osa metallipartikkeleista havaitaan 500–2000 µm kokoluokassa. Kaikkein pienimmät hiukkaset koostuivat enimmäkseen ei-metallisista partikkeleista, kuten lasikuidusta ja keraameista. Koska metallit ovat tyypillisesti sitkeitä, ne eivät murru yhtä helposti pienen pieniksi partikkeleiksi.



Kuva 19 Puhtaan metallin osuus suhteessa ei-metallisiin partikkeleihin kaksivaiheisen murskaamisen jälkeen (Eswaraiahin et al. 2015)

Muun ohella itse piirilevyn pohjan käyttäytyminen murskauksessa täytyy myös tiedostaa. Diplomityön kokeellisessa osiossa sovelletun piirikorttityypin epoksihartsi ja lasikuitu pysyvät melko tukevasti kiinni murskauksen aikana tiettyyn partikkelikokoon asti (Quan et al 2012). Murskauksen jälkeen suurimmat pohjalevyn partikkelit koostuvat lähinnä epäsäännöllisen muotoisista kappaleista, joissa suurin osa lasikuidun pinnasta on kapseloitu epoksihartsilla (kuva 20a). Epoksihartsin irtautuminen lasikuidun pinnalta saa aikaan suuria ja löyhästi sotkeutuneita lasikuitunippuja (kuva 20b). Kun epoksihartsi irtautuu myös lasikuidun sisältä, muodostuneet lasikuituniput muotoutuvat yhdeksi kuiduksi (kuva 20c). Kyseiset kuidut ovat hauraita, joten lisämurskaus hajottaa ne edelleen pienemmiksi ja sekoittaa hartsirakeisiin (kuva 20d). Piirikorttien kierrätyksessä mielenkiinto on kuitenkin yleensä metallien talteenotossa, joten piirilevyjen murskauskäyttäytyminen jää pienemmälle huomiolle. (Quan et al. 2012)





Kuva 20 SEM-kuvat piirikorttien kaksivaiheisen murskauksen jälkeen erikokoisista partikkeleista: a) 0,42-0,25 mm b) 0,25-0,18 mm c) 0,18-0,15 mm d) <0,15 mm (Quan et al. 2012)

Piirikorttien materiaalitekniisten ominaisuuksien lisäksi myös prosessiparametrit vaikuttavat piirikorttien murskautuvuuteen. Liian nopea tuotteen syöttäminen vähentää piirikorttikappaleiden prosessointiaikaa murskausrummussa, minkä johdosta partikkeleihin kohdistuu automaattisesti vähemmän murskausvoimia ja piirikorttien murskautuvuus ja irtautumisaste kärsii. Toisaalta liian alhainen syöttönopeus laskee myös murskeen irtautumisastetta, koska kevyet piirikortit tarvitsivat myös työntäviä ja puristavia kuormituksia, joita saadaan riittävästä syöttövoimasta. (Eswaraiahin et al. 2015).

Tehokkaan murskausprosessin lisäksi sähkö- ja elektroniikkaromun tuotesuunnittelu vaikuttaa partikkelien irtautumisasteeseen. Suunnitteluvaiheen materiaali-, liitos-, massa- ja komponenttiratkaisuilla on dramaattinen vaikutus siihen, kuinka täydellisesti partikkelit irtautuvat toisistaan murskauksessa. Tätä varten van Schaik ja Reuter (2010) ovat kehittäneet erilaisia simulointi- ja ennustamismalleja SER:n irtautumisasteen ja syntyneiden partikkelien koostumuksen määrittämiseen. Kehitettyjen mallien tärkein ominaisuus on suunnitteluratkaisujen linkittäminen murskauksen puhtaaksijauhausasteeseen. Duan et al. tutkivat (2010) piirikorttien murskautuvuutta piirikorttipartikkelin reunojen itesesimilaarisuuden ja fraktaalio-minaisuuden

näkökulmasta. Partikkelin kuvantamisen ja niiden sovittamisen MATLABin Box-counting menetelmään paljasti, että partikkelireunat tosiaan noudattavat fraktaalista ominaispiirrettä, jota voidaan käyttää tulevaisuudessa partikkelien reunojen monimutkaisuuden sekä karkeuden kartoittamiseen, ja sitä myötä piirikorttien murskautuvuuden mallintamiseen. Tämän diplomityön puitteissa ei ole kuitenkaan mahdollista paneutua aiheeseen sen syvällisemmin.

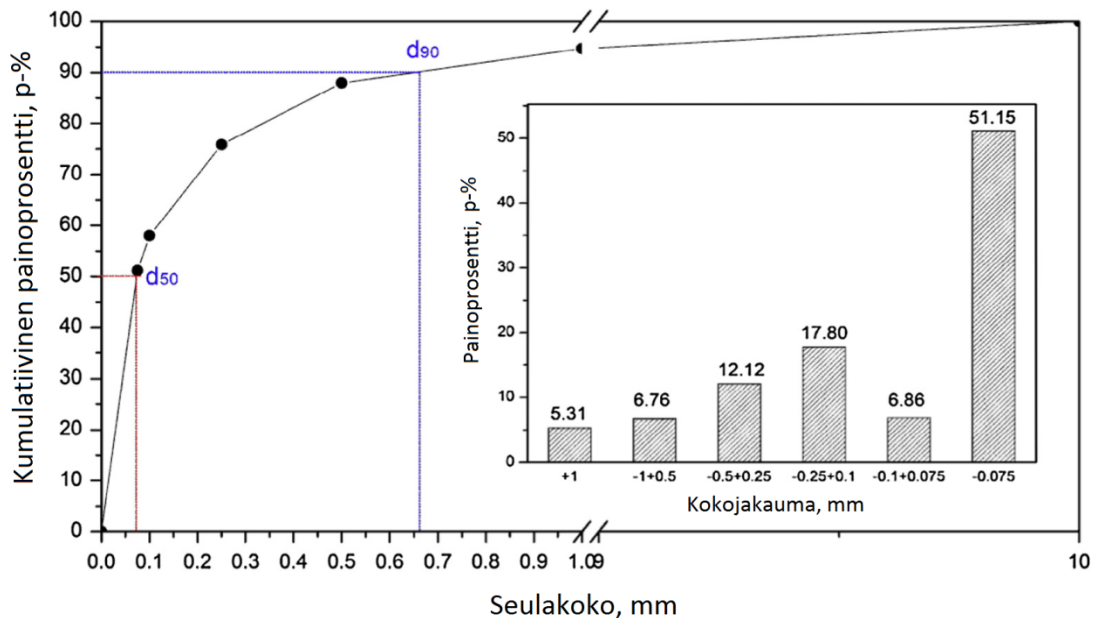
Haasteet tarkan murskausmekanismin hahmottamiseksi alkavat kuitenkin jo pyöröleikkurin suojatusta kotelosta, joka estää suoran näkyvyyden syötteen hienonnuksen. Monet päätelmät joudutaan tekemään murskeen visuaalisesta tarkastelusta. Kuten aikaisemminkin on mainittu, sähkö- ja elektroniikkaromujen ominaisuudet eroavat valtavasti mineraaleista: isot partikkelikoot, materiaalien sitkeys sekä variaatiot koossa, muodossa sekä materiaalisäilytyksessä. SER:n sitkeämpi rakenne ja sen myötä suurempi plastinen muodonmuutos murskauksessa absorboi hienonnusenergiaa tehokkaasti, kun taas mineralogian malleissa syöte murskautuu hauraiden murtumien mukaan lähes olemattomalla plastisella rasituksella. (Castro et al. 2005)

Tässä kappaleessa on päästy hieman syvällisemmin käsiksi piirikorttien murskautuvuuteen vaikuttaviin seikkoihin, joista kirjallisuus tarjosi melko ristiriitaisia tutkimustuloksia. Toisaalta monissa selvityksissä piirikorttien irtautumisaste todettiin murskauksen jälkeen verrattain korkeaksi, mutta toisaalta useissa koeajoissa irtautumisasteesta jäi parantamisen varaa. Samanlainen problematiikka oli havaittavissa myös partikkelien murskauskoossa. Huolellisempi murskaaminen tarkoitti lähes aina parempaa irtautumisastetta ja metallien talteenottoa, mutta samalla se merkitsi kasvavia tuotanto-, energia- ja työ kustannuksia, suurempaa partikkelien reaktiivista ominaispinta-alaa sekä todennäköisempää partikkelien plastista muodonmuutosta. Yksi lainalaisuus oli kuitenkin melko yksimielinen: Sitkeät metallit jäävät murskauksessa suurempaan partikkelikokoon kuin hauraat muovi- ja keraamiosat.

Optimoitu piirikorttien murskaus tiettyyn kokoluokkaan tarjoaa todennäköisesti parhaat mahdollisuudet resurssitehokkaaseen operointiin ja kiitettävään metallien talteenottoa. Mitään selkeätä partikkelikokoluokkaa ei ole ehdotettu, mutta käsittelemässäni artikkeleissa liikuttiin pikemminkin mikro- ja millimetreissä kuin senttimetreissä. Joitakin tahoja huolestuttaa piirilevyjen murskauksen yhteydessä pölyihin kadotetut arvokkaat materiaalit sekä työntekijöiden ilmanlaadun myrkyttäminen. Tämän vuoksi joissakin yhteyksissä piirikortit syötetään sellaisenaan polttoprosessiin, mutta silloin ongelmaksi muodostuu haitalliset ja myrkylliset poistokaasut furaaneista dioksiineihin (Ogunniyi et al. 2009). Näin ollen seuraavaksi selvitetäänkin, onko syytä huolestua murskauspölyihin rikastuvista materiaaleista.

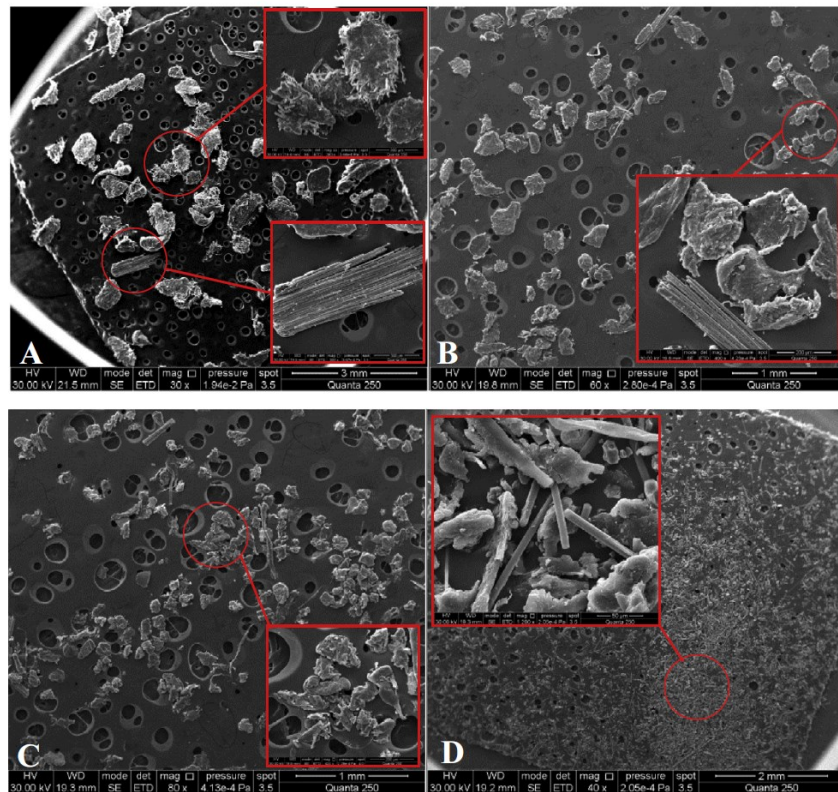
### 4.3 Murskauksessa vapautuva pöly

Wang et al. ovat tutkineet (2015) piirikorttien mekaanisen kierrätyksen, kuten murskauksen ja seulonnan, yhteydessä vapautuneita pölyjä. Piirikortit koostuvat monista erilaisista materiaaleista, jotka käyttäytyvät vaihtelevasti iskevän, leikkaavaan sekä hiertävän voiman vaikutuksessa. Tutkimuksen 20 kg pölynäytteen seulonta paljasti jotakin pölyyn päätyneiden partikkelien muodoista ja koosta. Suurimpaan seulakokoon (+1 mm) jäi ennen kaikkea levymäiset muoviosat ja ohutkalvot. Kuitumaiset partikkelit jäivät enimmäkseen -1 + 0.5, -0.5 + 0.25 ja -0.25 + 0.1 mm seuloilla ja pienimpään -0.1 + 0.075 ja -0.07 mm kokoluokkiin seuloutui epäsymmetriset ja pikkuruiset hiukkaset. Kuten kuvasta 21 voidaan havaita, pölyjen massa painottuu 51,15 painoprosentilla pienikokoisimpaan fraktioon.



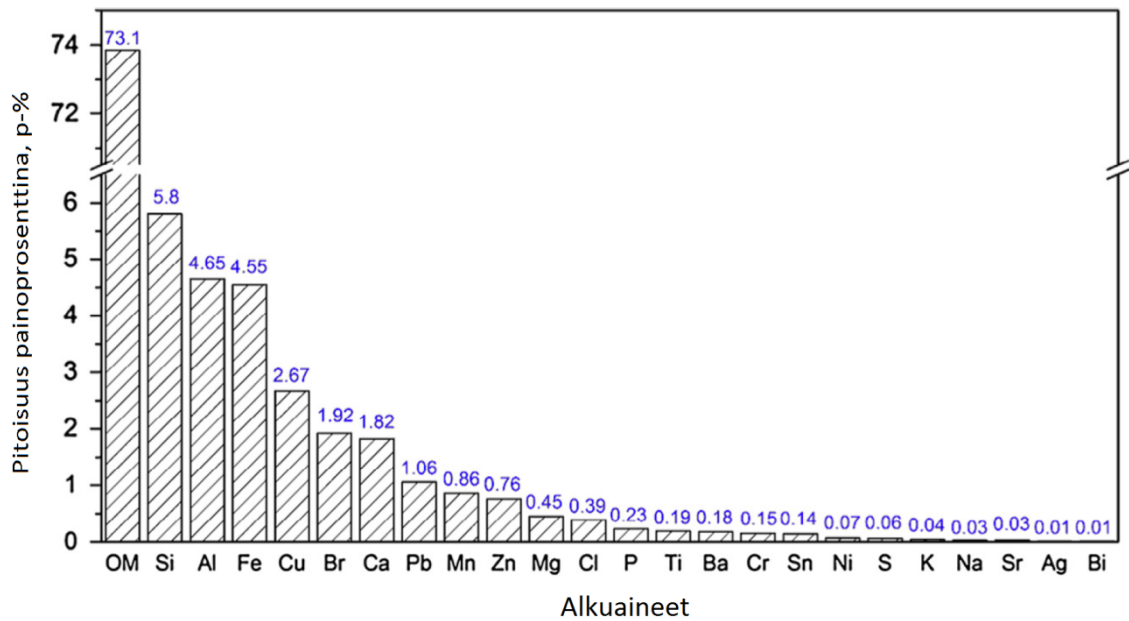
Kuva 21 Piirikorttien murskauspölyn kokojakauma ja kumulatiivinen kokojakauma (Wang et al. 2015)

Pölyistä otetuilla SEM-kuvilla saatiin yksityiskohtaisempaa tietoa seuloille jääneiden partikkelien muodoista. Kuten kuva 16a havainnollistaa, -0.5 + 0.25 mm kokoluokka koostuu lähinnä piirikortin pohjamateriaalin epäsäännöllisen muotoisista partikkeleista sekä säännöllisesti järjestäytyneistä nuijamaisista säikeistä. Pienemmissä seulako'oissa (kuvat 16b ja 16c) on nähtävissä vain vähän muutoksia, mutta pienikokoisimmissa partikkeleissa (kuva 16d) oli enemmän yksittäisiä nuijamaisia säikeitä. Kyseiset säikeet tunnistettiin röntgenspektrometrillä alumiiniksi, piiksi ja kalsiumiksi. Piirikortin pohjamateriaali puolestaan osoittautui lähinnä hiilen ja hapen yhdisteiksi sekä jossain määrin alumiiniksi, kupariksi ja raudaksi. Lisäksi analyyseissä havaittiin metallien määrän lisääntyvän partikkelien koon pienentyessä. (Wang et al. 2015)



**Kuva 22 SEM-kuvat piirikorttien murskauspölyistä: a)  $-0.5 + 0.25$  mm b)  $-0.25 + 0.1$  mm c)  $-0.1 + 0.075$  mm d)  $-0.075$  mm (Wang et al. 2015)**

Analysointi paljasti materiaalisäällön koostuvan ennen kaikkea orgaanisista yhdisteistä, mutta myös metalleista ja epäorgaanisista materiaaleista. Kirjoittajat huomauttavat, että vaikka suurin osa metalleista oli alkuainemuodossaan, monia metalleja havaittiin myös yhdisteinä, kuten Cu-Cl ja Ti-Mg-S, minkä vuoksi kemiallista liuotusta pidetään parhaimpana talteenottomenetelmänä. Pölynäytteestä peräti 73,1 painoprosenttia oli orgaanisia yhdisteitä, ja arvokkaimmista metalleista yleisimmät olivat Al, Fe, Cu, Pb, Mn ja Zn, kuten kuvasta 23 voidaan havaita. Kaikista arvokkaimmista jalometalleista, kullasta, hopeasta, platinasta ja palladiumista, vain kultaa havaittiin 0,01 painoprosentin verran. Metallien talteenoton kannalta oleellisin vaihe on metallien erottaminen orgaanisista yhdisteistä, ja tutkijat suosittelevat sähköstaattista erotinta yhtenä mahdollisena talteenottovaihtoehtona. (Wang et al. 2015)



Kuva 23 Pölynäytteen alkuainejakauma [OM = orgaanien materiaali] (Wang et al. 2015)

Yamane et al. tutkimuksessa (2011) vertailtiin emolevypiirikorttien ja matkapuhelinten piirikorttien murskaus- ja kierrätysominaisuuksia. Kummankin tuotteen piirilevyt murskattiin vasaramurskaimella, jonka yhteydessä havaittiin jopa 25 painoprosentin materiaalihävikki emolevypiirikorteille ja 29 painoprosentin materiaalihävikki matkapuhelinten piirikorteille. Tutkijat arvelevat murskauksen yhteydessä pienten partikkeleiden pölyävän ja siten aiheuttavan materiaalihävikkiä. Tutkijat arvelivat pölyn sisältävän pitkälti haurasta lasikuitua (abrasiivisena materiaalina siitä irtoaa helposti pieniä partikkeleita hankaavan voiman vaikutuksesta), mutta he eivät valitettavasti kyenneet saamaan pölyistä näytettä, eivätkä täten pystyneet varmistamaan hypoteesia analyysillä.

Chancerel et al. tutkimuksessa (2009) selvitettiin jalometallivirtoja kierrätysprosessissa. Tutkimuksessa havaittiin muun muassa, että jopa 5 painoprosenttia koko sähkö- ja elektroniikkaromun palladiumista oli rikastunut murskauspölyihin. Palladiumia käytetään jonkun verran piirikorttien keraamiosissa, jolloin murskauksen yhteydessä myös palladiumpartikkelit hajoavat pölyiksi keraamin mukana. Kuten taulukosta 4 voidaan päätellä, Chancerel et al. koeajoissa (2009) jalometallipitoisuudet laskevat, kun piirikortteihin kohdistetaan murskaavia voimia. Esimurskauksen vaikutus ei ole vielä niin dramaattinen kuin varsinaisella murskauksella, jolloin yhteenlaskettu jalometallipitoisuus on laskenut peräti 62 % alkuperäisestä syöttestä. Esimurskauksen jälkeen tapahtuu hieman ilmeisten isojen kappaleiden manuaalista erottelua, mutta sekään ei pysty selittämään noin isoa pitoisuuseroa. Tutkijat päättelivätkin, että murskauksessa pölyihin on rikastuttava näitä kriittisiä jalometalleja. Näin ollen tutkimuksessa neuvottiin, että kunnollisella purku- ja erottelutyöllä voidaan saada

jalometallirikkaat osat talteen ennen murskausvaihetta ja minimoida epätoivottua jalometallihäviötä.

**Taulukko 4 Jalometallien pitoisuus piirikorteissa ennen ja jälkeen murskauksen (Chancerel et al. 2009)**

| Metallipitoisuus                 | Kulta [g/t] | Hopea [g/t] | Palladium [g/t] |
|----------------------------------|-------------|-------------|-----------------|
| Murskaamattomat piirikortit      | 135         | 669         | 50              |
| Esimurskatut piirikortit (<8 mm) | 126         | 562         | 48              |
| Murskatut piirikortit (<2,5 mm)  | 48          | 481         | 18              |

Koska pölyihin vapautuneet partikkelit kulkeutuvat helposti luontoon ja ihmisten keuhkoihin, piirikorttien purku- ja murskauspölyjä on tutkittu myös ympäristö- ja henkilöhaittojen näkökulmasta. Song et al. tutkimus (2015) keskittyi kuvaputkinäyttöjen ja piirikorttien kierrätykseen ympäristökuormituksen, meluhaittojen ja tämän diplomityön kannalta kiinnostavien raskasmetallipölyjen näkökulmasta. Kolmesta tutkitusta raskasmetallista (Cu, Cd ja Pb) lyijypöly oli haitallisin metalli  $2,3 \mu\text{m}/\text{m}^3$  ja  $10,53 \text{ mg/g}$  pitoisuuksilla työskentelytiloissa, minkä perusteella haitalliset terveysvaikutukset työntekijöille ovat mahdollisia. Toisaalta sekä kadmiumin karsinogeeninen raja että kuparin haitallinen raja-arvo alitettiin suhteellisen selvästi.

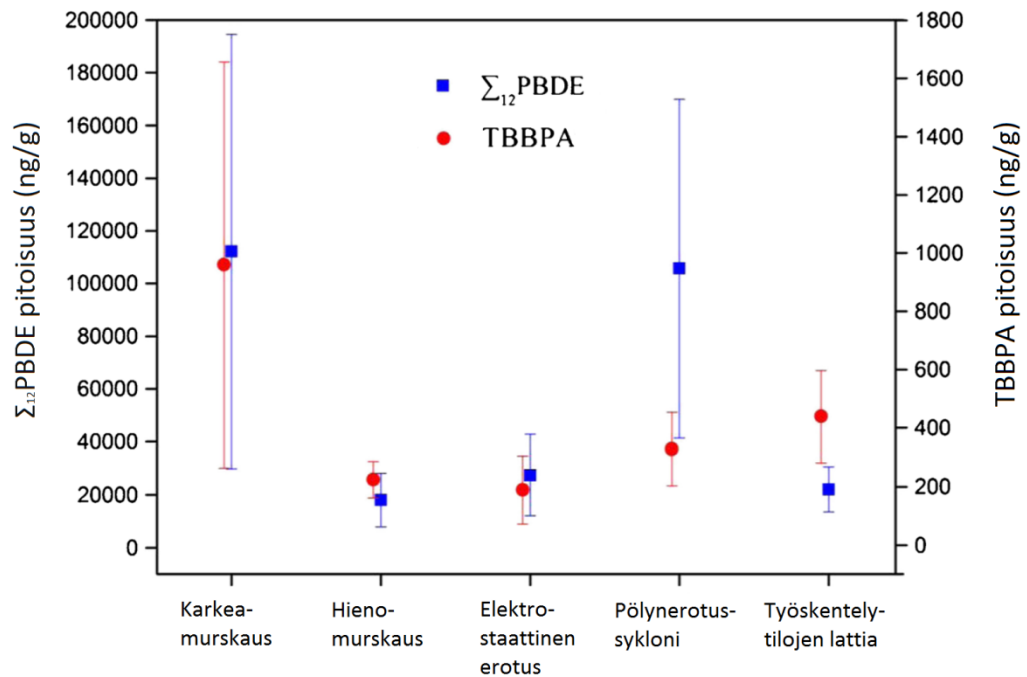
Myös Deng et al. tutkimus (2014) keskittyi vastaavanlaisiin terveydelle haitallisiin partikkeleihin televisioiden ja niiden sisältämien piirikorttien kierrätyslaitoksella. Kuvaputkitelevisioiden kierrätyksestä vapautuneet pölyt otettiin kokeissa talteen pölynimurilla seuraavista työvaiheista: purku ja lajittelu, karkea- ja hienomurskaus, pölynerotussykloni ja elektrostaattinen erotus. Talteenotetuista pölyistä analysoitiin raskasmetalleja (Cu, Pb, Cd, Cr ja Ni), bromattuja palonestoaineita (BFR), polybromidifenyyliettereitä (PBDE) ja tetrabromibisfenoli-A:ta (TBBPA).

Raskasmetalleista suurimmat pitoisuudet löydettiin kuparille (10 300–42 700 mg/kg prosessointivaiheesta riippuen) ja elohopealle (2 310–13 900 mg/kg prosessointivaiheesta riippuen), mikä johtui yksinkertaisesti runsaasta kuparin määrästä kuvaputkitelevisioiden piirikorteissa sekä elohopean esiintymisestä vanhoissa polykromaatti-televisioissa. Kuparin ja elohopean pitoisuudet ylittivät selvästi Kiinan ohjeistamat turvallisten työskentelyolosuhteiden raja-arvot (Cu 400 mg/kg ja Pb 500 mg/kg). Pölyjen raskasmetallien pitoisuuksien havaittiin jopa ylittävän alkuperäisen kuvaputkitelevisioiden piirikorttisyötteen pitoisuuden, mitä tutkijat selittivät metallien takertumisella helpommin irtoaviin ja pölyntyviin partikkeleihin eri prosessointivaiheissa ja erityisesti murskauksen aikana. (Deng et al. 2014)

Alla olevaan kuvaan 18 on kerätty 12 erilaatuisen polybromidifenyylietterin ( $\Sigma_{12}\text{PBDE}$ ) ja tetrabromibisfenoli-A:n (TBBPA) pitoisuudet eri prosessointivaiheiden pölyistä.



Kuten kuvasta 24 voidaan havaita, karkeassa murskauksessa vapautuu selkeästi ja oletetusti eniten tutkittuja partikkeleita verrattuna muihin työvaiheisiin. Tutkimuksessa ei kuitenkaan selitetty pölynerotussyklonissa talteenotettujen pölyjen 12 polybromidifenyylieetterin korkeaa pitoisuutta, mutta asia liittyy kyseisen erotusprosessin funktioon pölyjen erottamisen suhteen. (Deng et al. 2014)



**Kuva 24 Polybromidifenyylieetterin ( $\Sigma_{12}\text{PBDE}$ ) ja tetrabromibisfenoli-A:n (TBBPA) pitoisuudet eri prosessivaiheissa talteenotetuista pölyistä (Deng et al. 2014)**

Kirjallisuudesta löytyi yllättävän vähän tutkimustuloksia murskauksessa pölyfraktioon rikastuvista materiaaleista. Kuitenkin ne tahot, jotka ovat asiaa tutkineet tarkemmin, ovat tukeneet ajatusta metallien ja jalometallien rikastumisesta pölyfraktioon. Myös terveydelle haitallisten partikkelien tutkimusprojektit vahvistavat diplomityön ajatusta piirikorttien murskauksen yhteydessä vapautuneista arvokkaista partikkeleista.

Tähän mennessä diplomityössä on perehdytty sähkö- ja elektroniikkaromun erityispiirteisiin ja erityisesti tutkittu piirikorttien rakennetta sekä lainsäädännön vaikutusta kierrätysprosessiin. Tämän lisäksi diplomityössä tutustuttiin koeajojen kannalta tärkeisiin yksikköprosesseihin: leikkaavaan murskaukseen, magneettiseen erotukseen ja pyörrevirtaerottimeen. Lopuksi syvennyttiin piirikorttien rikkoutumis- ja irtautumismekanismeihin liitoskohtien, murskautuvuuden ja pölyfraktioiden muodossa.

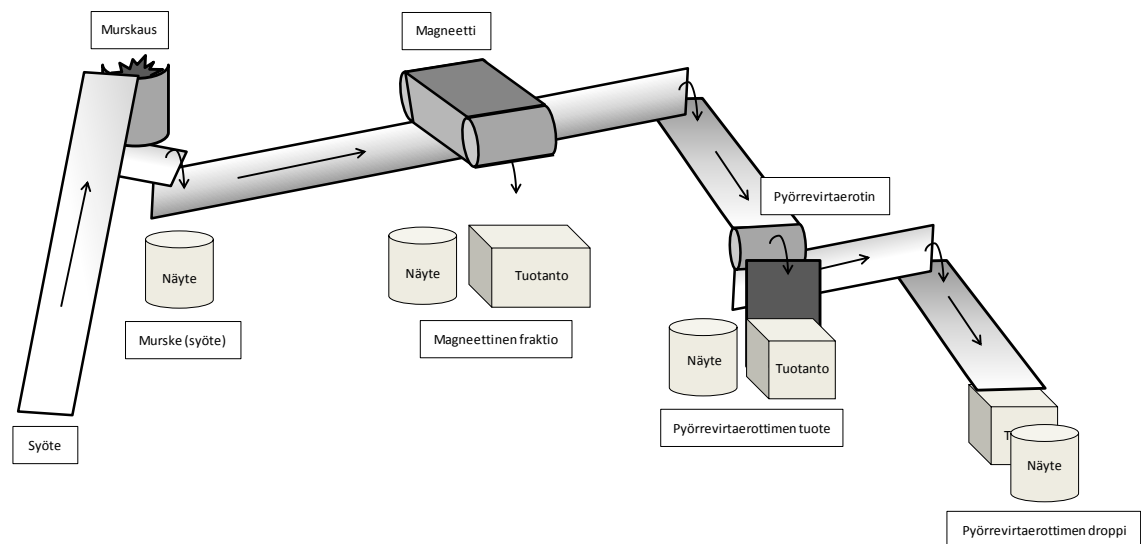
## 5 Koejärjestelyt

Seuraavaksi päästään itse diplomityön kokeelliseen osioon, jossa on tarkoitus selvittää, minkälaisia tuloksia empiiristen piirikorttien murskaus- ja erotuskokeissa saadaan, mitä ne kertovat käytetyistä piirikorttilaaduista ja itse kierrätysprosessista häviöineen ja voiko tulosten pohjalta tehdä prosessiparannuksia.

Diplomityön koeajot suoritettiin Kuusakosken toimipisteellä Espoossa ja näytteet analysoitiin Kuusakosken Lahden tutkimus- ja kehityskeskuksessa. Koeajoissa ajettiin kahta piirikorttilaata, matala-arvoista kuvaputkinäytön piirikorttia (eng. cathode ray tube display, CRT) ja korkea-arvoista emolevypiirikorttia (eng. motherboard). Espoon koeajoissa käytettiin tyypillistä ja yksinkertaista sähkö- ja elektroniikkaromun prosessointilinjaa, joka koostuu pyöröleikkurista, magneettisesta erottimesta sekä pyörrevirtaerottimesta. Kokeissa käytetyistä yksikköprosesseista voi lukea tarkemmin kappaleesta 3.

### 5.1 Prosessointilinan esittely

Diplomityön koeajot ja näytteenotto suoritettiin kuvan 25 prosessilinan mukaisesti, jossa tuotanto-kuvakkeet symboloivat normaalia tuotannon yksikköprosesseista syntyvää jätettä ja näyte-kuvakkeet erikseen kerättyä näyte-erää. Ensin syöte kulkee hihnaa pitkin pyöröleikkurille, joka murskaa tuotteen pienempään partikkelikokoon. Seuraavaksi murske kulkee hihnaa pitkin magneettiselle erottimelle, joka erottaa ferromagneettiset kappaleet omaan fraktioon. Lopuksi pyörrevirtaerotin jakaa murskeen alumiinipitoiseksi tuotteeksi sekä kuparipitoiseksi dropiksi.

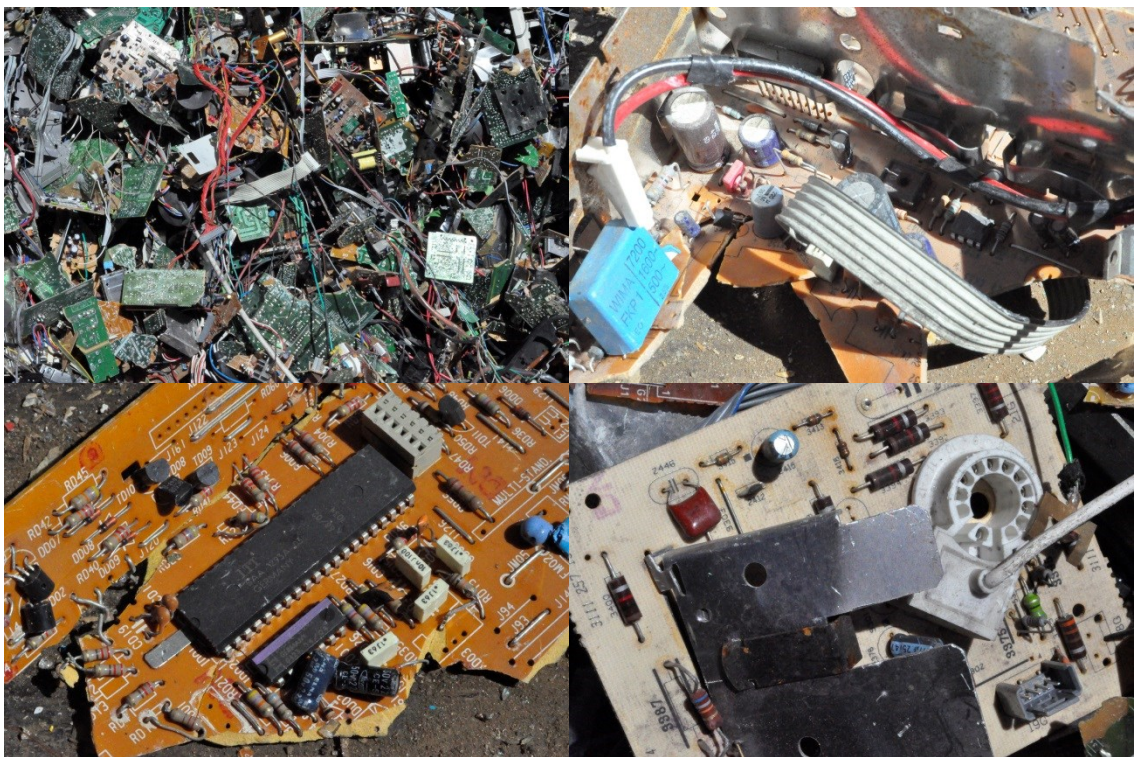


Kuva 25 Kauklahden koeajojen ja näytteenoton havainnekuva



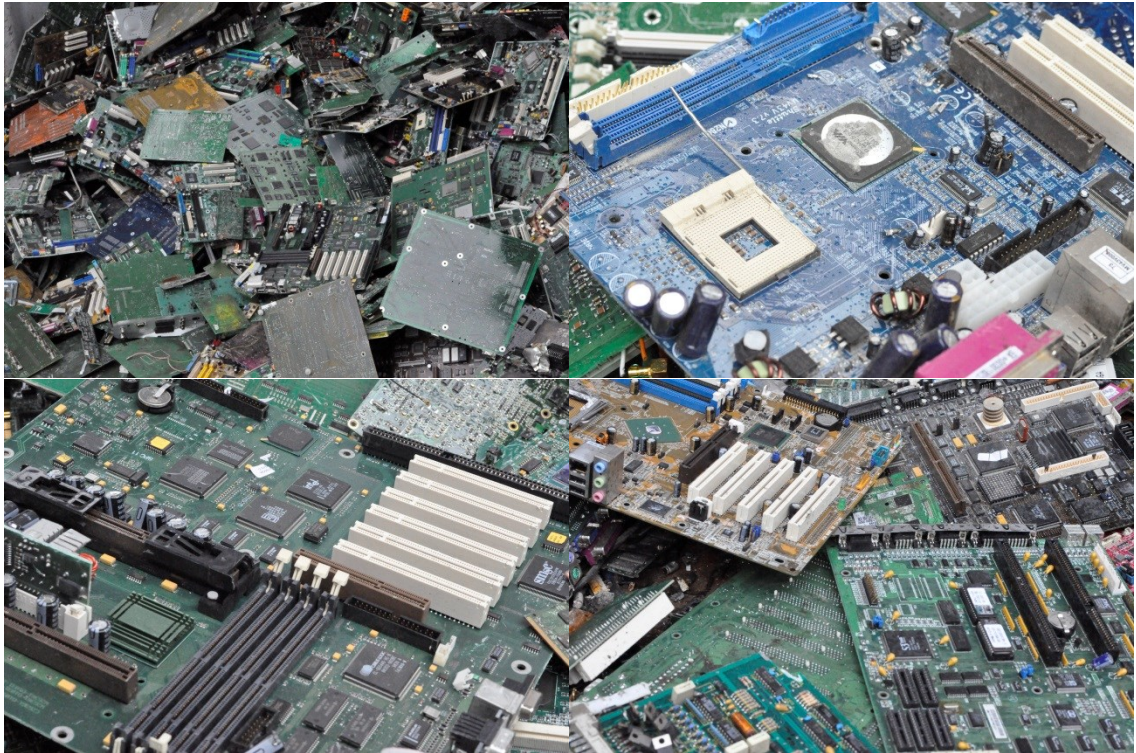
## 5.2 Koemateriaalin esittely

Perinteiset kuvaputkitelevisiot ovat olleet jo vuosikymmenet kiinnostuksen kohteena kierrätyksen näkökulmasta. Ne sisältävät niin harvinaisia maametalleja fosforijauheessa, jalo- ja platinaryhmän metalleja piirikortissa kuin volframia katodisädeputkessa (Reuter et al. 2013). Vaikka kuvaputkitelevisioita on vaihdettu jo vuosikaudet moderneihin taulutelevisioihin, niiden määrä piirikortteineen on pysynyt kierrätyslaitoksilla yllättävän tasaisena tähän päivään asti. Yhdeksi diplomityön kierrätystuotteeksi valittiinkin suurten käsittelymäärien vuoksi matala-arvoiset kuvaputkinäytön piirikortit. Yksinkertaisuuden, loogisuuden ja johdonmukaisuuden vuoksi tässä työssä viitataan vastedes matala-arvoiseen kuvaputkinäytön piirikorttiin termillä *LOW-kortti* (kuva 26).



**Kuva 26 LOW-kortti, eli matala-arvoinen kuvaputkinäytön piirikortti**

Kuitenkin yksi nopeimmin tuotantomäärissä kasvava sähkö- ja elektroniikkalaite on tietokone, ja arvioiden mukaan 17 miljoonaa tietokonetta päätyy kierrätykseen joka vuosi (Kolias et al. 2014). Tietokoneista kierrätyksen arvon tuottamisen kannalta kiinnostavin ja tärkein elementti on tietokoneen emolevy. Emolevyt sisältävät paljon arvokkaita metalleja, mutta myös ympäristölle ja ihmisille haitallisia metalleja ja niiden seoksia. Arvokkaan rakenteensa vuoksi toiseksi kierrätystuotteeksi valikoituivat korkea-arvoiset emolevypiirikortit, joihin viitataan vastedes termillä *HIGH-kortti* (kuva 27).



Kuva 27 HIGH-kortti, eli korkea-arvoinen emolevypiirikortti

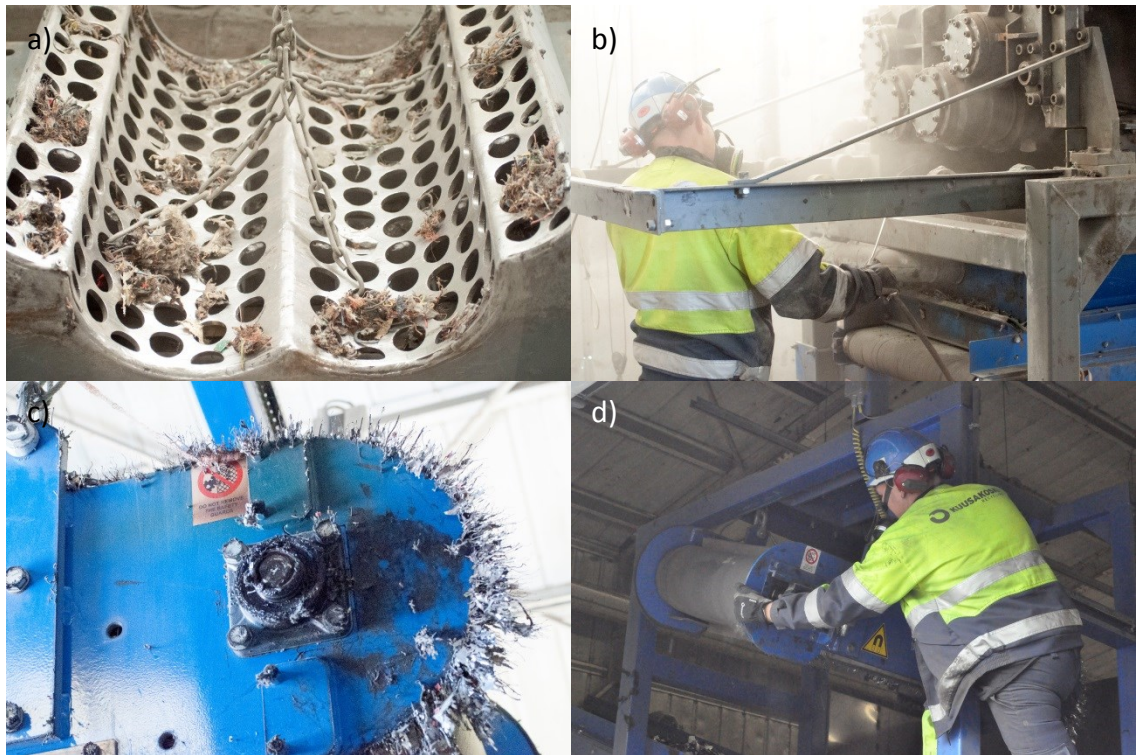
### 5.3 Koeajot ja näytteenotto

Koko tuotantohalli putsattiin yksikköprosessineen huolellisesti (kuva 28), koska koeajoissa haluttiin saada luotettavia tuloksia minimoidulla kontaminaatiolla. Normaalin tuotantopäivän päätteeksi kaikki laitteet ja niiden pinnat, kolot ja liitokset puhdistettiin käyttäen paineilmaa. Monien kuukausien aikana kertynyt pölykerros ja runsas paineilman käyttö saavat hallin pölyämään siivouksen aikana todella paljon. Tämän takia pölyn annettiin laskeutua yön aikana, jolloin seuraavana päivänä lattiat saatiin putsattua huolellisesti. Lisäksi pyöröleikkurin rosti irrotettiin ja murskauksessa syntyneet tukokset poistettiin sekä hihnamagneetti putsattiin siihen kertyneistä ferromagneettisista partikkeleista ja epäpuhtauksista, kuten kuvasta 29 voidaan havaita.





Kuva 28 Tuotantohalli siivottiin huolellisesti pölyistä ja roskista ennen koeajoja



Kuva 29 a) Pyöröleikkurin rostin tukokset, b) murskaimen terien ja rostin putsaus, c) hihnamagneettiin kertyneet epäpuhtaudet ja d) hihnamagneetin puhdistus

Ensimmäiset koeajot tehtiin kummallakin piirikorttilaadulla uusilla ja terävillä pyöröleikkurin terillä, ja myöhemmin suoritettiin yksi koeajo matala-arvoisen kuvaputkinäytön piirikorteilla käyttäen tylsiä teriä. Koska diplomityön tarkoituksena oli tutkia leikkaavaa murskausta ja murskausmekanismeja, koeajot samalla materiaalilla sekä terävillä että tylsillä terillä tarjoavat mielenkiintoisen näkökulman murskauksen laatuun, joka heijastuu erotusmenetelmien tehokkuuteen.



Arvokkaamman sähkö- ja elektroniikkaromun murskauksessa käytetään yleensä pyöröleikkuria, koska sen epäillään vapauttavan vähemmän pölyä kuin esimerkiksi rengasmurskain, joka on myös yleisesti käytössä kierrätyslaitoksissa. Samalla pelätään, että näihin murskauspölyihin hukataan arvokkaita jalometalleja, jotka ovat pois lopputuotteen arvosta. Tämän vuoksi pyöröleikkurin poistoilmaputken tilalle asennettiin teollisuusimuri (kuva 30), joka imi koeajon ajan pölypussiin murskauksessa vapautuvia pölyjä. Pölynimurin toimivuus testattiin viikkoa ennen koeajoja, ja hitsattu liitos teippeineen pölynimurin ja murskaimen välillä oli tukeva sekä tiivis. Pölypussiin kertyi päivän ajon aikana kiitettävä määrä hienoa murskauspölyä. Lisäksi pyöröleikkurin pohjalle kertyi koeajojen aikana hienoa pulveria (kuva 31), joka kerättiin talteen analyysijä varten.



Kuva 30 a) Asennettu teollisuusimuri pölyjen talteenottoa varten b) imurin liitoskohta ja c) lähikuva käytetystä Kärcher-teollisuusimurista





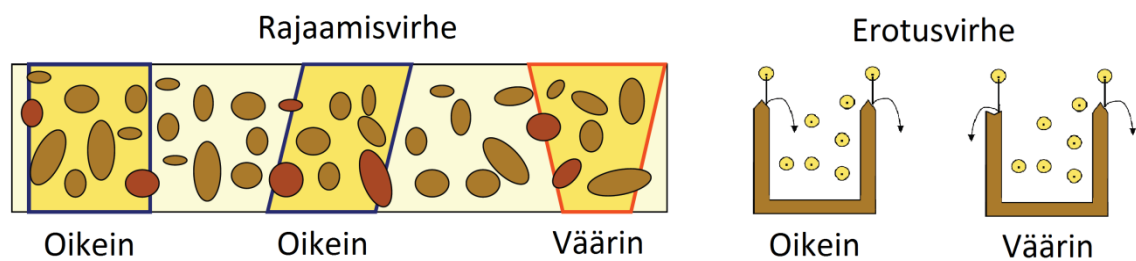
Kuva 31 Pyöröleikkurin pohjalle kertyvä pulverimainen kasa

Näytteet kerättiin kummankin piirikorttilaadun kohdalla koko päivän ajan muutama kilo kerralla 10–15 minuutin välein niin, että kaikki näytteenottopisteet kierrettiin samalla kerralla. Näytteenottoastiaan kertynyt näyte tyhjennettiin kyseisen yksikköprosessin kohdalle hankittuun isoon säkkiin, jota kutsutaan alalla yleisesti big bagiksi (kuva 32).



Kuva 32 a) Syötteen näytteenottopiste, b) magneettisen fraktion näytteenottopiste c) Pyörrevirtaerottimen tuotteen näytteenottopiste ja d) pyörrevirtaerottimen dropin näytteenottopiste

Lukuisilla osanäytteillä saadaan minimoitua ryhmittelystä ja segregoinnista johtuvat näytteenottovirheet. Jokaisen fraktion näytettä kerättiin yhteensä suhteellisen iso määrä (n. 200 kg), jotta näytteenoton perusvirhettä saataisiin minimoitua. Koska myös pienempi partikkelikoko vähentää perusvirhettä, syötteen näyte otettiin vasta murskauksen jälkeen. Rajaamisvirheen mukaan näytettä otettaessa kaikilla partikkeleilla ei ole yhtä suurta todennäköisyyttä joutua kyseiseen näyte-erään, kuten kuva 33 havainnollistaa. Erotusvirhe puolestaan syntyy virheellisestä näytteen erottamisesta. Sekä rajaamis- että erotusvirhe on huomioitu oikeaoppisilla ja kuljettimen levyisillä näytteenottovälineillä, mutta siitä huolimatta kyseisiä virhettä ei voida täysin eliminoida. (Oja 2013)



**Kuva 33 Rajaamisvirheen ja erotusvirheen havainnepiirrokset (Oja 2013)**

Kuten kuva 34 havainnollistaa, kokeissa käytetty syötemateriaali on sijoitettu piha-alueen säilytyskatokseen, josta syöte lastattiin pyörökuormaajalla syöttöhihnalle. Syöte etenee yläviistoon pyöröleikkuriin. Piirikortit murskautuvat pyöröleikkurissa, josta murske putoaa 50 mm rostin läpi murskaimen alapuolella liikkuvalla hihnalle. Yli 50 mm kappaleet kulkeutuvat joko takaisin murskaaville terille tai puristuvat väkivaltaisesti rostin läpi.





**Kuva 34 a) Syöte säilytyskatoksessa, b) syötteen lastaaminen, c) syöttö kuljetushihnalle ja d) syötteen murskautuminen**

Liukuhihnalla on pieni pudotus, jossa toteutetaan ensimmäinen näytteenotto kuvan 36a mukaisesti. Näytteenotto suoritettiin hihnan levyisellä muovilaatikolla niin, että se asetettiin pienen pudotuksen alle noin viideksi sekunniksi, jolloin muuttolaatikkoon saatiin kerättyä muutaman kilon näyte. Muoviastian kerätty näyte tyhjennettiin hihnan viereen sijoitetulle big bagille, johon kaikki päivän koeajon näytteet kerättiin.

Murskauksen jälkeen liukuhihna kuljettaa murskeen ensimmäiseen erotusprosessiin (kuva 35b ja 35c), eli hihnan yli liikkuvalla magneetilla. Hihnamagneetti erottaa syöttestä ferromagneettisen fraktion hihnan alapuolelle asetetulle lavalle. Lavan sisälle on sijoitettu muovinen näytteenottolaatikko, joka kerää päivän mittaan ferromagneettisia partikkeleita. Muuttolaatikkoon kertynyt näyte tyhjennetään pitkin päivää lavan viereen sijoitetulle big bagille (kuva 36b). Muuttolaatikon paikkaa muutetaan jatkuvasti päivän aikana lavan sisällä, jotta kerätty näyte edustaisi kokonaisuudessaan erotettua magneettista fraktiota mahdollisimman hyvin.



Kuva 35 a) Syöte murskauksen jälkeen b) murske kulkee kuljetushihnaa pitkin c) magneettinen erotus d) ei-ferromagneettinen fraktio jatkaa eteenpäin e) pyörrevirtaerotin ja f) pyörrevirtaerottimen droppi



Ei-ferromagneettiset partikkelit jatkavat hihnaa pitkin pyörrevirtaerottimeen (kuva 35d ja 35e), joka erottaa ei-ferromagneettiset metallit (pyörrevirtaerottimen tuote) muusta murskevirrasta (pyörrevirtaerottimen droppi). Pyörrevirtaerottimen tuotteen näyte-erän kerääminen oli haastavaa, sillä manuaalinen näytteen kerääminen ei ollut mahdollista hankalan sijaintinsa takia. Näytteen keräämistä varten tuotteen kohdalla vaihdeltiin aktiivisesti kahta lavaa, joista toisen sisälle oli sijoitettu big bag näytteitä varten ja toinen lava kuului normaaliin tuotantoon (kuva 32c). Lavoja vaihdeltiin päivän aikana useaan otteeseen pyörökuormaajalla operaattorin toimesta, joten koeajon aikana kerätyn näyte-erä edustaa kiitettävästi pyörrevirtaerottimen tuotetta.

Pyörrevirtaerottimen droppi kuljetetaan hihnaa pitkin tuotteen ohi, niin että se lasketaan putkea pitkin omalle lavalle, kuten kuvasta 35f voidaan todeta. Pyörrevirtaerottimen dropista saatiin edustava näyte, koska laskevan putken liikkuva materiaalivirta saadaan kokonaisuudessaan talteen isolla ämpärillä (kuva 36c). Ämpärin näytteet kerättiin tuotannon lavan viereen sijoitettuun big bagiin (kuva 32d).



Kuva 36 a) Näytteenotto syöttestä, b) näytteenotto magneettisesta fraktiosta ja c) näytteenotto pyörrevirtaerottimen dropista

Syötteen sekä kaikki näytteet ja tuotannon fraktiot punnittiin, ja saadut massataseet ovat nähtävissä taulukossa 5. Syöte punnittiin rekkojen ja kuorma-autojen vaa'alla, jonka virhe on työntekijöiden mukaan  $\pm 20$  kg. Muut fraktiot punnittiin tarkemmalla tuotannon vaa'alla, jonka virhe on n.  $\pm 2$  kg. HIGH-kortin prosessoinnissa hävikin määräksi saatiin 160 kg, LOW-kortin koeajoissa on kadonnut terävillä terillä prosessin aikana 342 kg ja tylsillä terillä vastaavasti hävikkiä havaittiin 115 kg:lla.

**Taulukko 5 Koeajojen massataseet**

|                                          | Syöte<br>[kg] | Murske<br>(syöte)<br>[kg] | Magneettinen<br>fraktio [kg] |              | Pyörrevirtaerotti<br>men tuote [kg] |          | Pyörrevirtaerotti<br>men droppi [kg] |          | Kokonais<br>hävikki<br>[kg] |
|------------------------------------------|---------------|---------------------------|------------------------------|--------------|-------------------------------------|----------|--------------------------------------|----------|-----------------------------|
|                                          | Tuota<br>nto  | Näyte                     | Näyte                        | Tuota<br>nto | Näyte                               | Tuotanto | Näyte                                | Tuotanto |                             |
| HIGH-<br>kortti<br>(emolevy)             | 7400          | 201                       | 137                          | 235          | 268                                 | 267      | 213                                  | 6120     | 160                         |
| LOW-kortti<br>(CRT)                      | 10820         | 210                       | 255                          | 1100         | 275                                 | 467      | 181                                  | 8200     | 342                         |
| LOW-kortti<br>(CRT)<br>[tylsät<br>terät] | 8640          | 154                       | 154                          | 820          | 151                                 | 6600     | 440                                  | 360      | 115                         |

Häviöitä syntyy monessa vaiheessa, joista tärkeimmät ovat syötteen purku säilytyskatokseen, syötteen lastaus syöttöhihnalle, murskeen putoilu kuljetushihnalta, partikkelien kertyminen eri prosessivaiheisiin, partikkelien putoaminen tuotantolavojen ulkopuolelle, partikkelien kimpoaminen lattioille täysinäisiltä lavoilta sekä punnitusvirheiden vuoksi. Lisäksi partikkelit muodostavat runsaasti pölyjä hiertymällä ja rikkoutuessaan läpi prosessin, mutta niiden massa oletetaan tässä yhteydessä olemattomaksi. Kuvassa 37 on muutama esimerkkikuva prosessin aikana syntyneistä hävikeistä.



**Kuva 37 Esimerkkikuvia prosessissa syntyvistä hävikeistä**

Big bageihin kerätyt näytteet suljettiin tiiviisti ja niitä säilytettiin sisätiloissa, jotta mahdollinen kosteus ja kontaminaatio voitaisiin minimoida. Kaikki näytteet toimitettiin Kuusakosken omaan tutkimus- ja kehityskeskukseen analysoitavaksi, josta kerrotaan tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

## 5.4 Näytteiden käsittely ja analysointi

Laboratoriossa näytteet seulotaan ja saadut näytteet jaetaan jakolaitteella, jotta sulatukseen päätyvä jae edustaisi koko näytettä mahdollisimman hyvin. Pyriittisulatuksessa näytteen materiaalisällön pitäisi sekoittua ja jakaantua mahdollisimman tasaisesti ja lisäksi orgaanisten yhdisteiden pitäisi palaa korkeassa lämpötilassa. Jäähtynyt näyte murskataan sekä jaetaan muutamia kertoja, jotta lopullinen näyte liukenisi happoihin mahdollisimman helposti ja ICP-analyysistä saatu tulos olisi mahdollisimman edustava.

Näytteet seulottiin yksinkertaisella manuaalisella seulonnalla, joka on nähtävissä kuvasta 38. Kaksi isoa muovista ja tiivistä säiliötä imuroitiin ja putsattiin huolellisesti kuvan 38a mukaisesti. Toisen muovisäiliön päälle asetettiin 15 mm seula ja toiseen uusi tyhjä big bag. Näytettä sisältävä big bag nostettiin nosturilla seulan yläpuolelle ja sen pohjaan tehtiin puukolla sopivan kokoinen reikä, jotta näytteen valuttaminen seulalle olisi mahdollisimman hallittua (kuva 38b). Seulalle levitettyä näytemateriaalia liikuteltiin ja tärisyteltiin pitkin verkkoa, jotta alle 15 mm partikkelit putoaisivat siitä läpi (kuva 38c). Ylite kallistettiin toiseen muoviseen säiliöön. Yhden seulonnan jälkeen alitteeseen muodostui big bagin näytteestä noin 10 painoprosenttia (kuva 38d).



Kuva 38 a) Muovisäiliöiden puhdistaminen b) big bagien virittäminen nostimella seulaverkon yläpuolelle c) ylite seulonnan jälkeen d) lopputulos yhden näyte-erän seulomisen jälkeen



Seulonnan jälkeen alite jaettiin kahteen rinnakkaisnäytteeseen pienellä 25 mm:n kahtiointilaitteella (kuva 39). Kahtiointilaitteen avulla saatiin luotettavasti melko identtiset rinnakkaisnäytteet. Toinen näyte menee sellaisenaan pyriittisulatukseen ja toinen säästetään siltä varalta, jos sulatus epäonnistuu, näytteen analyysituloksella on arveluttava tai Kuusakoski haluaa myöhemmin tarkistaa tai tarkistuttaa sulatuksen lopputuloksen.



**Kuva 39 Alitteen jakaminen kahteen rinnakkaisnäytteeseen jakolaitteella**

Seulonnan ylitettä oli sen verran paljon, että vastaavanlainen manuaalinen jakaminen olisi ollut turhan aikaa vievää ja työlästä. Sen vuoksi ylite murskattiin ja jaettiin sulatusnäytteeksi Bomatic-murskaimella kuvan 34 mukaisesti. Murskainta ei ole mahdollista laittaa pois päältä, joten sen kierrosnopeutta säädettiin mahdollisimman alhaiseksi ja pölysuodattimen imunopeus pidettiin matalana, jotta pölyihin hukattaisiin mahdollisimman vähän kevyitä partikkeleita. Jakolaitteen käyttäminen pölyytti imuputkesta huolimatta kuitenkin melko paljon, mutta sen vaikutus jäänee melko pieneksi analyysituloksen kannalta. Jakolaitte jakoi syötteen kahdeksaan osaan, joista valitaan kaksi rinnakkaisnäytettä. Aivan kuten alitteen kanssa, toinen menee pyriittisulatukseen ja toinen varastoidaan varatoimenpiteenä. Ylijäämä palautettiin takaisin tuotantoon.



Kuva 40 a) Big bagin asettaminen nosturilla jakolaitteen syöttö-tasolle b) big bagin pohjaan puhkaistaan reikä ja syöte ohjataan kuljetinhihnalle c) jakolaitteen syöttökouru pyörii ympyrää jakolaitteastian yläpuolella d) ylite on jaettu kahdeksaan osaan, joista otetaan kaksi rinnakkaisnäytettä

Pyriittisulatus suoritettiin isommalla 95 litran sulatusuunilla. Sulatusuunin lämpötila nostettiin 1000–1200 °C:een, jolloin panostus voidaan suorittaa (kuva 41a). Panostuksessa pyriitistä lisätään aluksi upokkaan pohjalle noin puolet. Pyriitin päälle lisätään näyte ja näytteen päälle loput pyriitistä. Lopuksi lisätään apuaineet sooda (natriumkarbonaatti,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ja Borax (disodium tetraborate,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ). Panostetun uunin lämpötila nostetaan 1300–1320 °C:een, ja sulatus kestää 2-4 tuntia näytteestä riippuen.

Ennen näytteen kaatamista uunista tulee varmistaa, että näyte on täysin sulanut. Tarkistus tapahtuu puukepillä sekoittamalla, jolloin puusta mahdollisesti liukenevat orgaaniset yhdisteet palavat välittömästi (kuva 41b). Sulanut näyte kaadettiin uunista esilämmitettyyn ja pinnoitettuun kokilliin (kuva 41c). Upokkaan sisäpinnat kolataan puhtaaksi uunikolalla välittömästi alaslaskun jälkeen, ennen pintojen jäähtymistä (kuva 42d). Kaadettu kuuma sulaseos – nähtävissä kuvasta 42e - jätetään kokillille jäähtymään yön yli.





Kuva 41 a) Näyte syötetään kuumennettuun upokkaaseen b) Pyriittiseosta hämmennetään ja näytteen sulamisen tarkastelu c) Sulan pyriittiseoksen valu d) Upokkaan sisäpinnat kolataan puhtaaksi uunikolalla välittömästi alaslaskun jälkeen e) Sulaseos jätetään kokillille jäähtymään yön yli



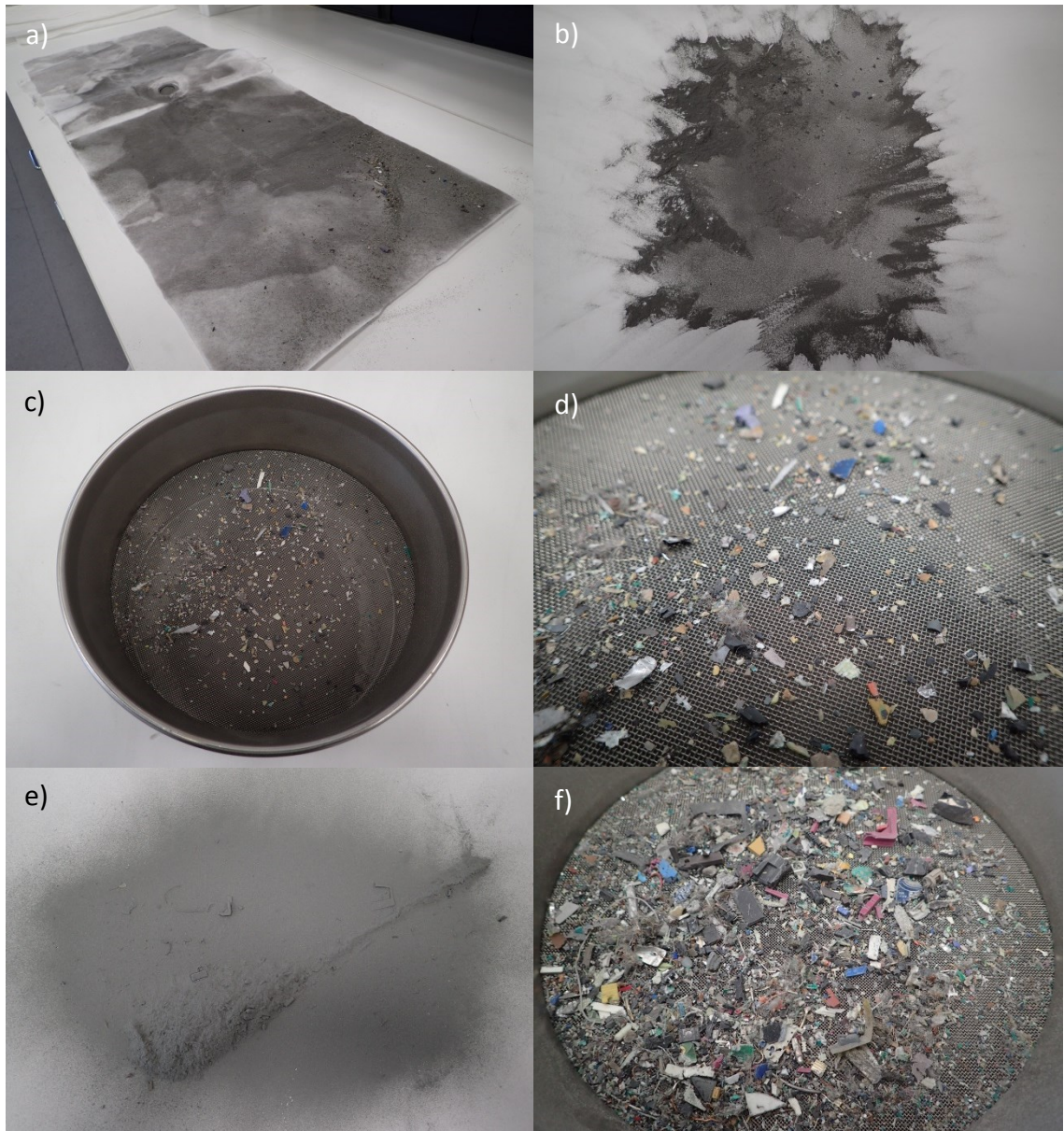
Jäähtynyt näyte jauhetaan leukamurskaimella (kuva 42a ja 42b), ja jauhettu näyte jaetaan kahtiointilaitteella, siten että saadaan noin kilon verran näytettä jatkoanalyysijä varten (kuva 42c ja 42d). Kyseinen näyte jauhetaan täryttävällä levymyllyllä niin, että pulverimainen lopputulos läpäisee 0,5 mm seulaverkon (kuva 42e). Saadusta alitteesta jaetaan uudestaan kaksi rinnakkaista noin yhden gramman näytettä, jotka ovat valmiita happoliuotukseen (kuva 42f).



Kuva 42 a) Leukamurskain b) jauhettu näyte leukamurskaimen jälkeen c) kahtiointilaitteen syöttöastia ja -kuljetin d) Jaettu noin kilon näyte e) levymyllyllä jauhetaan kaikki partikkelit, jotka eivät läpäise 0,5 mm seula f) kasijakolaitteella jaetaan kaksi rinnakkaista noin yhden gramman näytettä



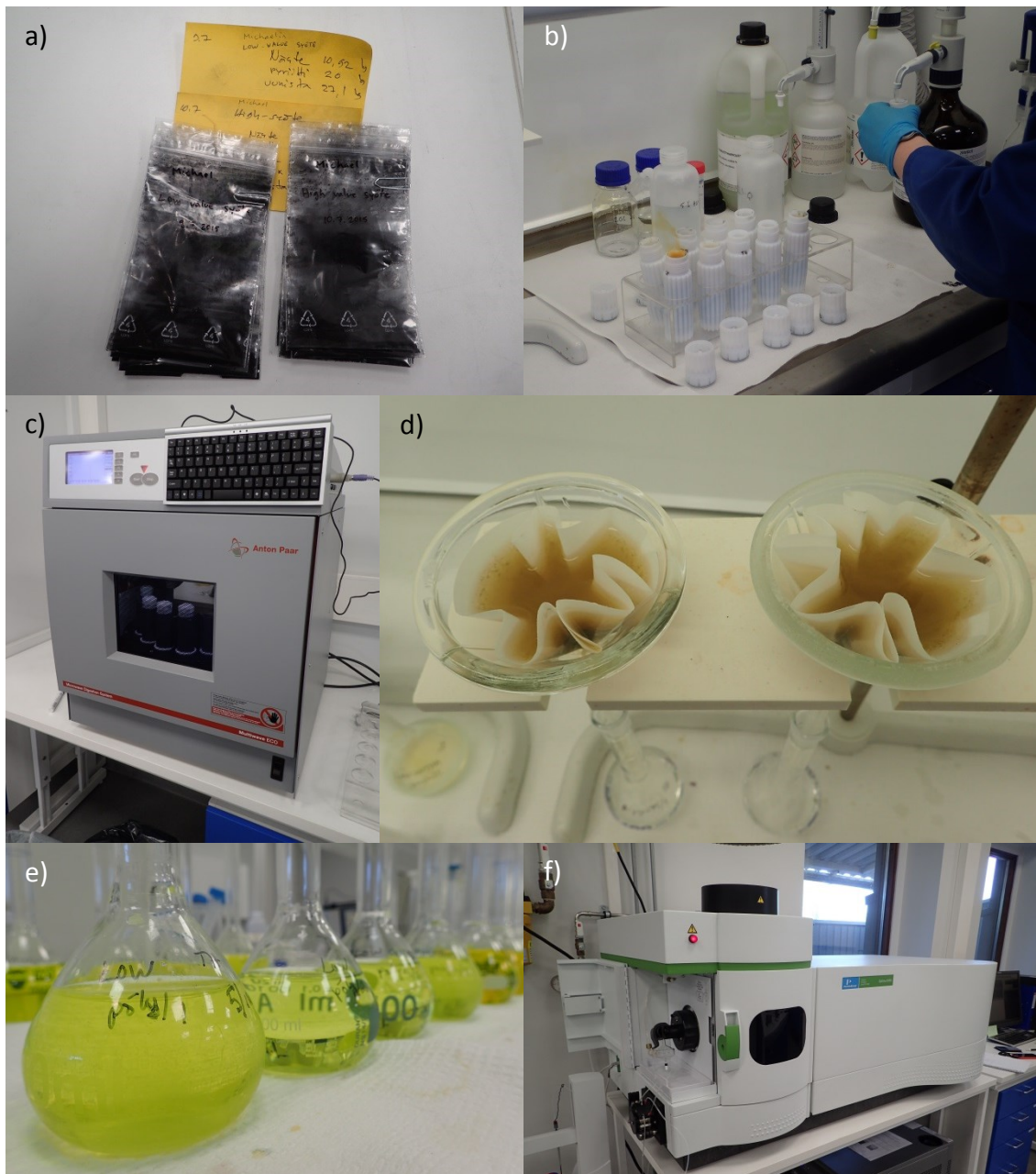
Murskauksessa talteenotetut pölyt pölypusseista ja pyöröleikkurin pohjalta olivat riittävän hienojakoisia happoliuotukseen sellaisenaan. Pölypusseja avattiin mahdollisimman varovaisesti ja niiden sisältö kerättiin talteen huolellisesti minimoiden mahdollinen pölyäminen (kuva 43). Pölyt seulottiin samalla 0,5 mm seulalla ja ylitte jauhettiin kuulamyllyllä pienemmäksi. Kun sekä pyriittisulatuksen että pölyjen partikkelikoko oli tarpeeksi pieni, niille suoritettiin happoliuotus.



**Kuva 43 a) Avattu pölypussi b) Low-value pölyt pöydällä c) pölyjen seulominen 0,5 mm seulalla d) lähikuva Low-value pölyjen ylitteestä e) High-value pölyt f) High-value pölyjen ylitte**

Näytteisiin lisätään 10 ml milli-Q-vettä ja 10 ml typpihappoa (65 %), ja ne käytetään mikroaaltohajotuksessa (kuva 44a, kuva 44b ja kuva 44c). Hajotuksen jälkeen liuos suodatetaan Whatman 589/3 suodatinpaperilla 200 ml mittapulloon, johon on lisätty

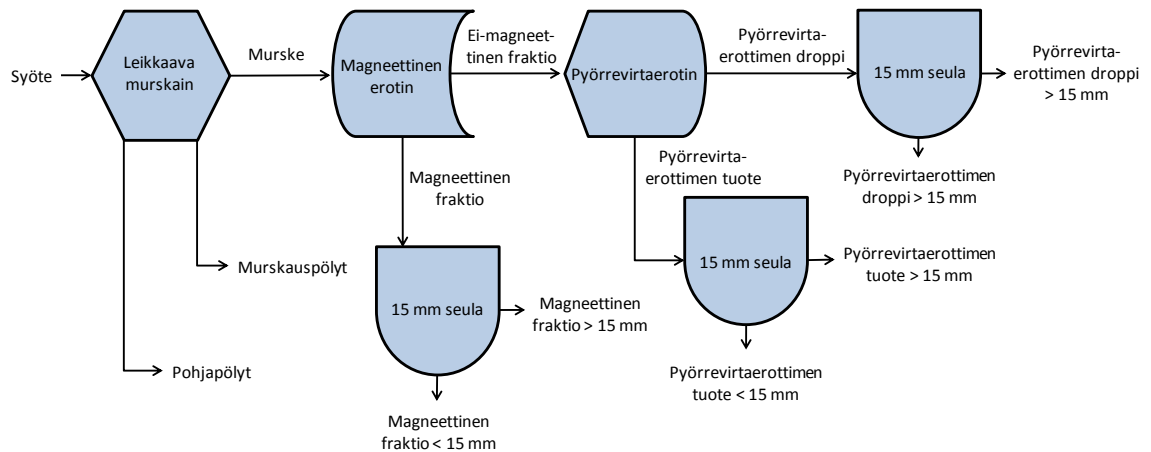
5/100 ml typpihappoa (kuva 44d). Liuotusastiaa ja suodatinpaperia huuhdellaan milli-Q-vedellä, kunnes suodos on kirkasta. Typpihappoon liukenemattomia metalleja varten näytteen analysointia jatketaan kuningasvesiliuotuksella, joka tarkoittaa 5 ml milli-Q-vettä, 5 ml typpihappoa ja 15 ml suolahappoa (37 %). Mikroaaltohajotus toistetaan, jonka jälkeen liuos suodatetaan kuten typpihappoliuotuksessa, mutta mittapulloihin lisätään 5/100 ml suolahappoa (kuva 44e). Mittaus suoritetaan Perkin Elmer Optima 8500 ICP OES -laitteella laiteohjeen mukaisesti (kuva 44f).



Kuva 44 a) Näytteet valmiina happoliuotukseen b) typpihapon lisääminen c) mikroaaltohajotus d) suodatus e) suodatettu näyte f) ICP-analysaattori

## 6 Tulokset ja tulosten tarkastelu

Tässä kappaleessa esitetään keskeisimmät analyysi- ja tutkimustulokset. Ensiksi perehdytään seulontakokeiden tuloksiin, jossa yritetään suhdelukujen avulla selvittää, rikastuvatko metallit hienoon vai karkeaan kokoluokkaan. Tämän jälkeen paneudutaan murskauksen yhteydessä talteenotettuihin pölynäytteisiin, joiden metallipitoisuudet – erityisesti jalometallipitoisuudet - murskeeseen nähden ovat suurimmassa keskiössä. Seuraavaksi saadut pitoisuustulokset suhteutetaan massoihin, ja tarkastellaan metallien kulkeutumista ja erottumista prosessissa. Lopuksi kiinnitetään vielä huomiota magneettisen fraktion puhtaiden ferromagneettien osuutta epäpuhtaisiin ferromagneettisiin kappaleisiin. Kuva 45 havainnollistaa toteutettuja analyysejä ja niissä käytettyjä termejä. Tuotannollisten seikkojen ja aikatauluhaasteiden vuoksi pyriittisulatukset toteutettiin taulukon 6 mukaisesti, eli LOW-korttien magneettisia fraktioita ei analysoitu.



Kuva 45 Virtausikaavio toteutetulla koeajolla ja seuloilla

Taulukko 6 Suoritetut pyriittisulatukset (merkitty vaalealla sinisellä)

|                              | Murske | Magneettinen fraktio |        | Pyörrevirtaerotimen tuote |        | Pyörrevirtaerotimen droppi |        |
|------------------------------|--------|----------------------|--------|---------------------------|--------|----------------------------|--------|
|                              | Σ      | Hieno                | Karkea | Hieno                     | Karkea | Hieno                      | Karkea |
| HIGH-kortti                  |        |                      |        |                           |        |                            |        |
| LOW-kortti                   |        |                      |        |                           |        |                            |        |
| LOW-kortti<br>[tylsät terät] |        |                      |        |                           |        |                            |        |
| MID-kortti<br>[tylsät terät] |        |                      |        |                           |        |                            |        |



## 6.1 Erotettujen jakeiden hienon ja karkean partikkelikoon analyysitulokset

Ensimmäiseksi paneudutaan seulonnalla jaettuihin hienojen ja karkeiden fraktioiden pitoisuuksiin. Taulukoissa 7-9 esitellään alkuaineiden pitoisuuksia, joiden avulla on laskettu karkeamman kokoluokan suhdeluku hienoon fraktioon. Tarkoituksena on tarkastella ennen kaikkea alkuaineen rikastumiselementtiä jompaankumpaan kokoluokkaan. Tässä yhteydessä suhdeluku 1 lasketaan yhtälön 1 mukaan, jossa  $\rho_{>15\text{ mm}}$  tarkoittaa karkeamman fraktion pitoisuutta ja  $\rho_{<15\text{ mm}}$  hienomman fraktion pitoisuutta.

$$\text{Suhdeluku}_1 = \frac{\rho_{>15\text{ mm}}}{\rho_{<15\text{ mm}}} \quad (1)$$

Taulukoissa rikastumista, eli suhdelukua, on pyritty havainnoimaan punaisen sävyillä siten, että kirkkaampi punainen merkitsee suurempaa suhdelukua ja alkuaineen rikastumista karkeampaan kokoluokkaan. Työssä käsitellään vasta myöhemmin analyysituloksia massafraktioiden suhteen.

Taulukon 7 mukaan magneettisessa fraktiossa kultaa ja hopeaa on rikastunut hienompaan kokoluokkaan, kuten myös terästeollisuuden suosimaa nikkeliä ja mangaania. Magneettisesta fraktiosta ainoastaan kromi on selkeästi rikastunut karkeampaan kokoluokkaan. Pyörrevirtaerottimen tuotteessa kullan pitoisuus on karkeammassa koossa yli kaksinkertainen verrattuna hienoon fraktioon. Muista metalleista vain kupari on selkeästi rikkaampana pitoisuutena karkeammassa kokoluokassa pyörrevirtaerottimen tuotteessa. Hopeaa on vain niukasti suuremmalla pitoisuudella hienommassa fraktiossa. Pääosin alumiinia varten toteutetussa erotusprosessissa alumiinin pitoisuus on korkeampi hienommassa fraktiossa, mutta silti kokonaispitoisuus on selkeästi matalampi kuin sen pitäisi olla. Pyörrevirtaerottimen dropissa metallit ovat rikastuneet enemmän hienompaan fraktioon, mistä selkeimmät esimerkit löytyvät kullan, palladiumin, hopean, alumiinin ja mangaanin pitoisuuksista.

Kun tarkastellaan HIGH-kortin koeajon pitoisuustuloksia kokonaisuutena, suurempaan kokoluokkaan rikastuu 47 % tutkittavista metalleista. Vain kupari, lyijy ja tina ovat jokaisessa jakeessa rikastuneet karkeampaan kokoluokkaan. Jalometalleista vain yhdessä fraktiossa karkeamman kokoluokan pitoisuus oli korkeampi kuin hienossa fraktiossa. Mangaani ei sellaisenaan ole ferromagneettista, mutta muodostaa useiden muiden metallien kanssa ferromagneettisia seoksia, mikä voi selittää mangaanin korkean pitoisuuden magneettisessa fraktiossa (Veit et al. 2005).



Taulukko 7 HIGH-kortin jakeiden alkuainepitoisuudet kokoluokan mukaan

| HIGH murske |       |      | HIGH<br>Magneettinen<br>fraktio |            | Suhd<br>eluk<br>u | HIGH<br>Pyörrevirtaerot<br>timen tuote |            | Suhd<br>eluk<br>u | HIGH<br>Pyörrevirtaerot<br>timen droppi |            | Suhd<br>eluk<br>u |
|-------------|-------|------|---------------------------------|------------|-------------------|----------------------------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------|------------|-------------------|
|             |       |      | < 15<br>mm                      | > 15<br>mm |                   | < 15<br>mm                             | > 15<br>mm |                   | < 15<br>mm                              | > 15<br>mm |                   |
| Au          | 92,3  | g/tn | 42                              | < 15       | 0,36              | 46                                     | 98         | 2,16              | 168                                     | 65         | 0,39              |
| Pd          | 34,5  | g/tn | < 15                            | < 15       | 1,00              | <15                                    | <15        | 1,00              | 68                                      | < 15       | 0,22              |
| Ag          | 580   | g/tn | 302                             | 133        | 0,44              | 489                                    | 439        | 0,90              | 1240                                    | 557        | 0,45              |
| Cu          | 15,1  | %    | 4,17                            | 5,20       | 1,25              | 9,70                                   | 28,3       | 2,91              | 17,9                                    | 22,5       | 1,26              |
| Al          | 4,01  | %    | 1,85                            | 2,44       | 1,32              | 17,6                                   | 10,97      | 0,62              | 5,5                                     | 3,81       | 0,69              |
| Cr          | 0,147 | %    | 0,101                           | 0,337      | 3,34              | 0,068                                  | 0,093      | 1,38              | 0,205                                   | 0,164      | 0,80              |
| Mg          | 0,196 | %    | 0,174                           | 0,163      | 0,94              | 0,290                                  | 0,314      | 1,08              | 0,249                                   | 0,248      | 1,00              |
| Mn          | 0,221 | %    | 1,40                            | 0,394      | 0,28              | 0,139                                  | 0,080      | 0,58              | 0,355                                   | 0,149      | 0,42              |
| Ni          | 0,346 | %    | 0,842                           | 0,567      | 0,67              | 0,177                                  | 0,191      | 1,08              | 0,578                                   | 0,413      | 0,71              |
| Pb          | 0,43  | %    | 0,22                            | 0,255      | 1,15              | 0,287                                  | 0,376      | 1,31              | 0,725                                   | 0,895      | 1,23              |
| Sn          | 1,06  | %    | 0,698                           | 1,00       | 1,43              | 0,816                                  | 1,02       | 1,25              | 2,01                                    | 2,55       | 1,27              |
| Zn          | 1,46  | %    | 2,19                            | 1,70       | 0,78              | 1,00                                   | 0,967      | 0,97              | 3,45                                    | 2,78       | 0,81              |

LOW-kortille toteutettiin vastaava pitoisuusanalyysi, mutta ajan ja resurssien puutteen vuoksi magneettista fraktiota ei analysoitu. Pitoisuustulokset on esitetty taulukossa 7. Pyörrevirtaerottimen tuotteessa voidaan havaita suurimmat rikastumissuhteet karkeampaan kokoluokkaan alumiinilla, kromilla ja nikkelillä. Myös hopean ja kuparin pitoisuudet ovat vaatimattomasti korkeammat karkeassa fraktiossa. Pyörrevirtaerottimen dropissa reilusti suurin osa metalleista on rikastunut pienikokoisempaan fraktioon. Kaiken kaikkiaan vain 35 % tutkituista metalleista oli rikastunut karkeampaan kokoluokkaan, ja vain kupari edusti kyseistä rikastumista kummassakin jakeessa.

Taulukko 8 LOW-kortin fraktioiden alkuainepitoisuudet kokoluokan mukaan

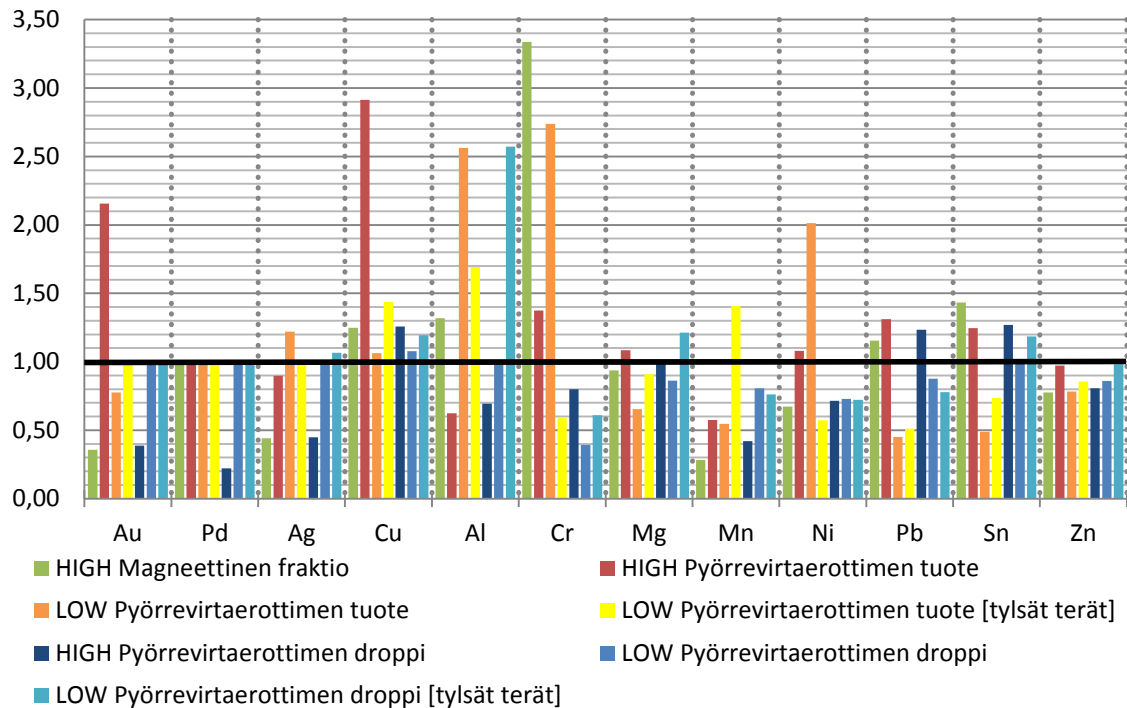
| LOW murske |       |      | LOW<br>Pyörrevirtaerottimen<br>tuote |       |         |      | Suhdeluku<br>>15/<15 | LOW<br>Pyörrevirtaerottimen<br>droppi |       |         |      | Suhdeluku<br>>15/<15 |
|------------|-------|------|--------------------------------------|-------|---------|------|----------------------|---------------------------------------|-------|---------|------|----------------------|
|            |       |      | < 15 mm                              |       | > 15 mm |      |                      | < 15 mm                               |       | > 15 mm |      |                      |
| Au         | < 15  | g/tn | Au                                   | 21,09 | 16,35   | g/tn | 0,78                 | Au                                    | <15   | <15     | g/tn | 1,00                 |
| Pd         | 31    | g/tn | Pd                                   | < 15  | < 15    | g/tn | 1,00                 | Pd                                    | <15   | <15     | g/tn | 1,00                 |
| Ag         | 302   | g/tn | Ag                                   | 256,1 | 312,3   | g/tn | 1,22                 | Ag                                    | 314,8 | 315,1   | g/tn | 1,00                 |
| Cu         | 13,5  | %    | Cu                                   | 9,788 | 10,42   | %    | 1,06                 | Cu                                    | 14,49 | 15,6    | %    | 1,08                 |
| Al         | 6,46  | %    | Al                                   | 21,81 | 55,91   | %    | 2,56                 | Al                                    | 4,685 | 4,627   | %    | 0,99                 |
| Cr         | 0,15  | %    | Cr                                   | 0,11  | 0,301   | %    | 2,74                 | Cr                                    | 0,142 | 0,056   | %    | 0,39                 |
| Mg         | 0,231 | %    | Mg                                   | 0,446 | 0,292   | %    | 0,65                 | Mg                                    | 0,293 | 0,252   | %    | 0,86                 |
| Mn         | 2,19  | %    | Mn                                   | 0,246 | 0,134   | %    | 0,55                 | Mn                                    | 2,393 | 1,932   | %    | 0,81                 |
| Ni         | 0,185 | %    | Ni                                   | 0,074 | 0,148   | %    | 2,01                 | Ni                                    | 0,265 | 0,193   | %    | 0,73                 |
| Pb         | 0,595 | %    | Pb                                   | 0,297 | 0,134   | %    | 0,45                 | Pb                                    | 1,033 | 0,906   | %    | 0,88                 |
| Sn         | 1,16  | %    | Sn                                   | 0,486 | 0,237   | %    | 0,49                 | Sn                                    | 1,467 | 1,467   | %    | 1,00                 |
| Zn         | 1,6   | %    | Zn                                   | 0,43  | 0,337   | %    | 0,78                 | Zn                                    | 2,062 | 1,775   | %    | 0,86                 |

LOW-kortille toteutettiin taulukon 9 mukaisesti uudestaan sama koeajo, mutta tällä kertaa murskaus toteutettiin pyöröleikkurin tylsillä terillä. Pyörrevirtaerottimen tuotteessa vain kuparilla, alumiinilla ja mangaanilla havaitaan kevyttä rikastumista karkeaan kokoluokkaan. Dropissa puolestaan selkeä rikastuminen karkeaan fraktioon on huomattavissa vain alumiinilla, vaikka myös hopea, kupari, magnesium ja tina ovat juuri ja juuri rikastuneet. Kummatkin pyörrevirtaerottimen jakeet huomioiden 40 % tutkituista metalleista on rikastunut suurempaan kokoluokkaan. Kaikista metalleista vain alumiini ja kupari ovat kummassakin pyörrevirtaerottimen jakeessa rikastuneet karkeampaan fraktioon. Verrattuna terävien terien koeajoon, tylsillä terillä havaitaan hieman enemmän rikastumista karkeaan fraktioon, mutta ero on melko minimaalinen.

**Taulukko 9 LOW-kortin fraktioiden alkuainepitoisuudet kokoluokan mukaan tylsien terien koeajoissa**

| LOW murske<br>[tylsät terät] |      |      | LOW<br>Pyörrevirtaerottimen<br>tuote [tylsät terät] |       |         |      | Suhdeluku<br>>15/<15 | LOW<br>Pyörrevirtaerottimen<br>droppi [tylsät terät] |       |         |      | Suhdeluku<br>>15/<15 |
|------------------------------|------|------|-----------------------------------------------------|-------|---------|------|----------------------|------------------------------------------------------|-------|---------|------|----------------------|
|                              |      |      | < 15 mm                                             |       | > 15 mm |      |                      | < 15 mm                                              |       | > 15 mm |      |                      |
| Au                           | 20   | g/tn | Au                                                  | < 15  | < 15    | g/tn | 1,00                 | Au                                                   | < 15  | < 15    | g/tn | 1,00                 |
| Pd                           | < 15 | g/tn | Pd                                                  | < 15  | < 15    | g/tn | 1,00                 | Pd                                                   | < 15  | < 15    | g/tn | 1,00                 |
| Ag                           | 307  | g/tn | Ag                                                  | 141   | 138     | g/tn | 0,98                 | Ag                                                   | 367   | 391     | g/tn | 1,07                 |
| Cu                           | 14,8 | %    | Cu                                                  | 7,65  | 11      | %    | 1,44                 | Cu                                                   | 14,9  | 17,8    | %    | 1,19                 |
| Al                           | 4,03 | %    | Al                                                  | 24    | 40,6    | %    | 1,69                 | Al                                                   | 4,86  | 12,5    | %    | 2,57                 |
| Cr                           | 0,1  | %    | Cr                                                  | 0,168 | 0,099   | %    | 0,59                 | Cr                                                   | 0,123 | 0,075   | %    | 0,61                 |
| Mg                           | 0,25 | %    | Mg                                                  | 0,305 | 0,277   | %    | 0,91                 | Mg                                                   | 0,301 | 0,365   | %    | 1,21                 |
| Mn                           | 1,61 | %    | Mn                                                  | 0,152 | 0,214   | %    | 1,41                 | Mn                                                   | 2,31  | 1,76    | %    | 0,76                 |
| Ni                           | 0,22 | %    | Ni                                                  | 0,098 | 0,056   | %    | 0,57                 | Ni                                                   | 0,296 | 0,214   | %    | 0,72                 |
| Pb                           | 0,9  | %    | Pb                                                  | 0,252 | 0,129   | %    | 0,51                 | Pb                                                   | 1,3   | 1,01    | %    | 0,78                 |
| Sn                           | 1,3  | %    | Sn                                                  | 0,394 | 0,29    | %    | 0,74                 | Sn                                                   | 1,51  | 1,79    | %    | 1,19                 |
| Zn                           | 1,65 | %    | Zn                                                  | 0,557 | 0,476   | %    | 0,85                 | Zn                                                   | 2,07  | 2,03    | %    | 0,98                 |

Kuvaan 46 on yhdistetty kaikki pitoisuustulokset, jolloin mahdollisten trenditekijöiden havaitseminen olisi edellistä selkeämpää. Yleisilmeeltä metallien rikastuminen pienempään kokoluokkaan on yleisempää kuin karkeaan kokoluokkaan. Analyytinen tarkastus paljastaa, että 42 % kaikkien koeajojen alkuainepitoisuuksista on korkeampi karkeammassa kokoluokassa. Havaitsemattomia pitoisuuksia (alle 15 g/t) ei otettu laskennassa huomioon. Kaikista metalleista ainoastaan kuparissa havaitaan rikastumista karkeampaan kokoluokkaan jokaisessa jakeessa. Lisäksi alumiini, kromi, lyijy ja tina rikastuivat kohtalaisesti karkeaan kokoluokkaan. Jalometallit suosivat selkeästi hienompaa fraktiokokoa. Tylsien terien koeajossa ei huomattu mitään merkittävää trendieroja terävien terien koeajoon verrattuna.



Kuva 46 Karkeamman kokoluokan suhde hienompaan kokoluokkaan

Toisin kuin kirjallisuudessa on havaittu (Sun et al. 2015; Eswaraiahin et al. 2015; Murugan et al. 2008; Wen et al. 2005), metallien pitoisuudet olivat korkeammat hienommassa fraktiossa kuin karkeammassa. Ero ei ole kuitenkaan dramaattinen, minkä lisäksi analyysituloksiin liittyy monia virhelähteitä näytteenotosta pyriittisulatuksen onnistumiseen eikä jakeiden ei-metallisia partikkeleita tai niiden pitoisuuksia ollut mahdollista tutkia. On vielä huomattava, että 15 mm seula päästi lävitseen ainoastaan noin 10 % fraktioiden kokonaispainosta, joten vaikka alite olisikin metallien suhteen rikkaampaa, ylitteeseen päätyy kuitenkin huomattavasti suurempi määrä kyseistä metallia. Nyt kun suoritetuista koeajoista on saatu selville eri jakeiden metallipitoisuudet, on syytä selvittää murskauksessa vapautuneiden pölyjen pitoisuudet, jotta voimme myöhemmin tarkastella massaan suhteutettuja taseita ja jalometallihäviöitä.

## 6.2 Murskauksessa vapautuneiden pölyjen analyysitulokset

Kuten kappaleessa 5 on kuvailtu, pyöröleikkurin murskaussäiliön yhteyteen liitettiin teollisuusimuri pölypusseilla, joihin imettiin murskauksen aikana vapautuneita kevyitä partikkeleita. Imuri pidettiin päällä koeajojen ajan, ja pölypusseihin kertyneeseen pölyyn viitataan tässä yhteydessä ”murskauspölynä”. Lisäksi pyöröleikkurin pohjalle kertyi hienojakoista pulveria, joka kerättiin talteen analyysijä varten. Pohjalle muodostuneeseen pölyyn viitataan termillä ”pohjapöly”. Pölynäytteet kerättiin yhteensä neljästä koeajosta, joista kaksi toteutettiin terävillä leikkurin terillä ja kaksi kuluneilla terillä.

Pölyjen analysoinnilla yritetään selvittää, mitä metalleja pölyihin rikastuu murskauksen aikana. Rikastumisastetta varten sovelletaan edellisestä kappaleesta tuttua suhdelukua, mutta tässä kappaleessa verrataan pölyjen metallipitoisuutta syötteen pitoisuuteen yhtälön 2 mukaisesti, jossa  $\rho_{pölyt}$  tarkoittaa kyseisen metallin pölynäytteen pitoisuutta ja  $\rho_{murske}$  puolestaan tarkoittaa saman metallin murskeen pitoisuutta.

$$Suhdeluku_2 = \frac{\rho_{pölyt}}{\rho_{murske}} \quad (2)$$

Kuten edellisessäkin kappaleessa, tummempi punainen väri merkitsee korkeampaa rikastumisastetta. Ensiksi on huomattava, että toisin kuin muista jakeista, pölyistä oli mahdollista analysoida raudan pitoisuus, sillä hienojakoisen rakenteensa vuoksi se ei tarvinnut pyriittisulatusta. Pyriittisulatuksen luonteen vuoksi siitä ei ole mahdollista analysoida näytteiden rautapitoisuutta. Tästä johtuen raudan pitoisuutta voidaan kuitenkin verrata syötteeseen, eikä siitä ole mahdollista muodostaa suhdelukua.

Taulukossa 10 on nähtävillä HIGH-kortin koeajoissa talteenotettujen pölyfraktioiden analyysitulokset. Tärkein havainto on jalometallien (Au, Pd ja Ag) runsas rikastumisaste niin murskauspölyissä kuin pohjapölyissä. Sitä vastoin kuparin, alumiinin ja kromin pitoisuudet ovat pölyissä huomattavasti matalammat kuin syötteessä. Yllättävästi myös mangaani, nikkeli, lyijy ja tina rikastuvat kiitettävästi kumpaankin pölyfraktioon. Myös raudan suuri pitoisuus on syytä huomioida. Lukumäärällisesti HIGH-kortin koeajoista 63 % tutkituista metalleista rikastui pölyihin.

**Taulukko 10 HIGH-kortin murskauksessa vapautuneet pölyfraktiot**

| HIGH murske |       |      | HIGH murskauspöly |      | Suhdeluku<br>pölyt/murske | HIGH pohjapöly |      | Suhdeluku<br>pölyt/murske |
|-------------|-------|------|-------------------|------|---------------------------|----------------|------|---------------------------|
| Au          | 92,3  | g/tn | 255               | g/tn | 2,76                      | 287            | g/tn | 3,11                      |
| Pd          | 34,5  | g/tn | 52                | g/tn | 1,51                      | 172            | g/tn | 4,99                      |
| Ag          | 580   | g/tn | 1740              | g/tn | 3,00                      | 2020           | g/tn | 3,48                      |
| Cu          | 15,1  | %    | 5,74              | %    | 0,38                      | 3,39           | %    | 0,22                      |
| Al          | 4,01  | %    | 2,55              | %    | 0,64                      | 1,44           | %    | 0,36                      |
| Cr          | 0,147 | %    | 0,042             | %    | 0,29                      | 0,042          | %    | 0,29                      |
| Mg          | 0,196 | %    | 0,207             | %    | 1,06                      | 0,167          | %    | 0,85                      |
| Mn          | 0,221 | %    | 0,424             | %    | 1,92                      | 0,875          | %    | 3,96                      |
| Ni          | 0,346 | %    | 0,637             | %    | 1,84                      | 1,16           | %    | 3,35                      |
| Pb          | 0,43  | %    | 1,42              | %    | 3,30                      | 2,27           | %    | 5,28                      |
| Sn          | 1,06  | %    | 2,65              | %    | 2,50                      | 2,4            | %    | 2,26                      |
| Zn          | 1,46  | %    | 1,15              | %    | 0,79                      | 1,38           | %    | 0,95                      |
| Fe          |       |      | 10,2              | %    |                           | 21,7           | %    |                           |



Taulukkoon 11 on kerätty LOW-kortin koeajoista saadut pölyanalyysit. Tulokset muistuttavat yleisilmeeltään kovasti vastaavia HIGH-kortin tuloksia. Vaikka murskeen kultapitoisuus on alle havainnointirajan (alle 15 g/tn), murskauspölyissä oli peräti 78 g/tn kultaa. Myös muut jalometallit ovat rikastuneet yli kahdenkertaisella suhdeluvulla. Aivan kuten edellisessä taulukossa, kuparin, alumiinin ja kromin pitoisuudet ovat selkeästi heikommät pölyissä kuin murskeessa. Mangaanin, nikkelin, lyijyn ja tinan rikastumistrendi on myös yksiselitteinen. Jos lasketaan rikastuneiden metallien lukumäärä suhteessa ei-rikastuneisiin metalleihin, LOW-kortin koeajojen tulosten pohjalta 75 % tutkituista metalleista rikastui pölyihin.

**Taulukko 11 LOW-kortin murskauksessa vapautuneet pölyfraktiot**

| LOW murske |       |      | LOW murskauspöly |      | Suhdeluku<br>pölyt/murske | LOW pohjapöly |      | Suhdeluku<br>pölyt/murske |
|------------|-------|------|------------------|------|---------------------------|---------------|------|---------------------------|
| Au         | < 15  | g/tn | 78               | g/tn | 5,20                      | 33            | g/tn | 2,20                      |
| Pd         | 31    | g/tn | 76               | g/tn | 2,45                      | 108           | g/tn | 3,48                      |
| Ag         | 302   | g/tn | 681              | g/tn | 2,25                      | 613           | g/tn | 2,03                      |
| Cu         | 13,5  | %    | 1,68             | %    | 0,12                      | 1,43          | %    | 0,11                      |
| Al         | 6,46  | %    | 3,77             | %    | 0,58                      | 2,03          | %    | 0,31                      |
| Cr         | 0,15  | %    | 0,026            | %    | 0,17                      | 0,018         | %    | 0,12                      |
| Mg         | 0,231 | %    | 0,247            | %    | 1,07                      | 0,252         | %    | 1,09                      |
| Mn         | 2,19  | %    | 4,06             | %    | 1,85                      | 7,41          | %    | 3,38                      |
| Ni         | 0,185 | %    | 0,322            | %    | 1,74                      | 0,265         | %    | 1,43                      |
| Pb         | 0,595 | %    | 1,53             | %    | 2,57                      | 1,75          | %    | 2,94                      |
| Sn         | 1,16  | %    | 1,43             | %    | 1,23                      | 1,3           | %    | 1,12                      |
| Zn         | 1,6   | %    | 2,38             | %    | 1,49                      | 3,6           | %    | 2,25                      |
| Fe         |       |      | 18,2             | %    |                           | 28,9          | %    |                           |

LOW-kortista suoritettiin sama koeajo uudestaan tylsillä pyöröleikkurin terillä, ja saadut pölyanalyysit on esitetty taulukossa 12. Sama trendi jatkuu niin jalometallien kuin taulukon alarivien metallien rikastumisessa. Poikkeuksen tekee magnesium, jota on tässä tapauksessa matalammalla pitoisuudella pölyissä kuin murskeessa. Kupari, alumiini ja kromi eivät edelleenkään rikastu pölyihin. Jälleen kerran verrattaessa lukumäärällisesti rikastuneiden metallien määrää suhteessa ei-rikastuneisiin metalleihin, kyseisessä koeajossa rikastui tutkittavista metalleista 67 % pölyihin.

**Taulukko 12 LOW-kortin murskauksessa vapautuneet pölyfraktiot tylsien terien koeajossa**

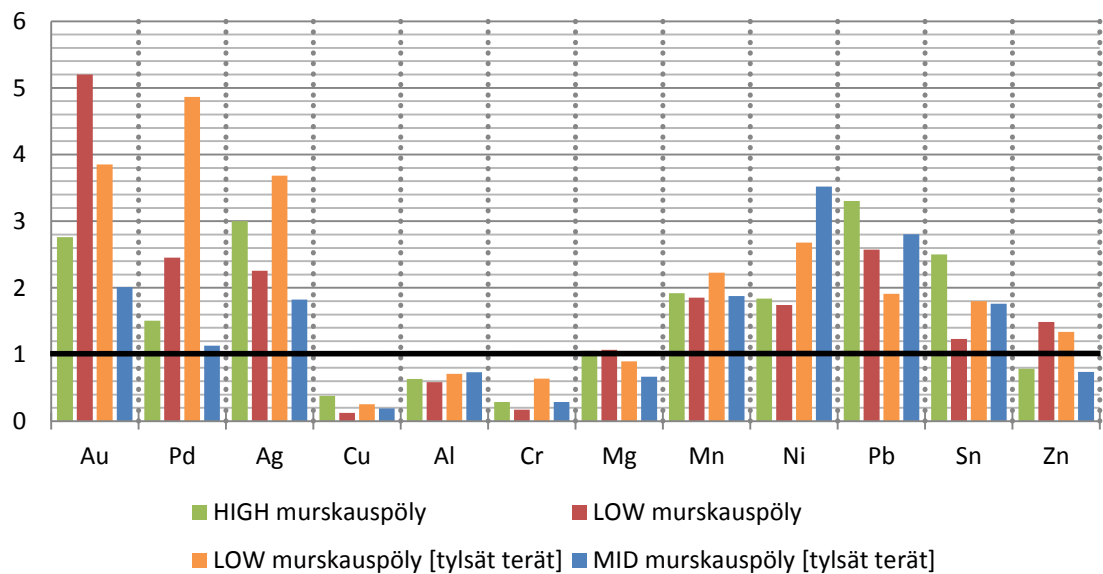
| LOW murske [tylsät terät] |       |      | LOW murskauspöly [tylsät terät] |      | Suhdeluku pölyt/murske | LOW pohjapöly [tylsät terät] |      | Suhdeluku pölyt/murske |
|---------------------------|-------|------|---------------------------------|------|------------------------|------------------------------|------|------------------------|
| Au                        | 20    | g/tn | 77                              | g/tn | 3,85                   | 45                           | g/tn | 2,25                   |
| Pd                        | < 15  | g/tn | 73                              | g/tn | 4,87                   | 102                          | g/tn | 6,80                   |
| Ag                        | 307   | g/tn | 1130                            | g/tn | 3,68                   | 629                          | g/tn | 2,05                   |
| Cu                        | 14,8  | %    | 3,75                            | %    | 0,25                   | 2,57                         | %    | 0,17                   |
| Al                        | 4,03  | %    | 2,86                            | %    | 0,71                   | 2,3                          | %    | 0,57                   |
| Cr                        | 0,099 | %    | 0,063                           | %    | 0,64                   | 0,023                        | %    | 0,23                   |
| Mg                        | 0,249 | %    | 0,224                           | %    | 0,90                   | 0,166                        | %    | 0,67                   |
| Mn                        | 1,61  | %    | 3,59                            | %    | 2,23                   | 5,04                         | %    | 3,13                   |
| Ni                        | 0,221 | %    | 0,592                           | %    | 2,68                   | 0,321                        | %    | 1,45                   |
| Pb                        | 0,895 | %    | 1,71                            | %    | 1,91                   | 1,66                         | %    | 1,85                   |
| Sn                        | 1,3   | %    | 2,34                            | %    | 1,80                   | 1,52                         | %    | 1,17                   |
| Zn                        | 1,65  | %    | 2,21                            | %    | 1,34                   | 2,72                         | %    | 1,65                   |
| Fe                        |       |      | 15,3                            | %    |                        | 21,7                         | %    |                        |

Suoritimme lisäksi tylsillä pyöröleikkurin terillä ylimääräisen koeajon LCD-televisioista lähtöisin olevilla MID-korteilla, minkä pölyanalyysitulokset on nähtävissä taulukosta 13. Vaikka tässäkin tapauksessa jalometallit rikastuvat, niiden rikastumisaste ei ole yhtä merkittävä kuin aikaisemmissa tapauksissa. Muutkin metallit rikastuvat samalla trendillä kuin aikaisemmin. Jos lasketaan rikastuneiden metallien lukumäärä suhteessa ei-rikastuneisiin metalleihin kaikissa pölynäytteiden analyyseissä, kaiken kaikkiaan 63 % tutkituista metalleista rikastui pölyihin.

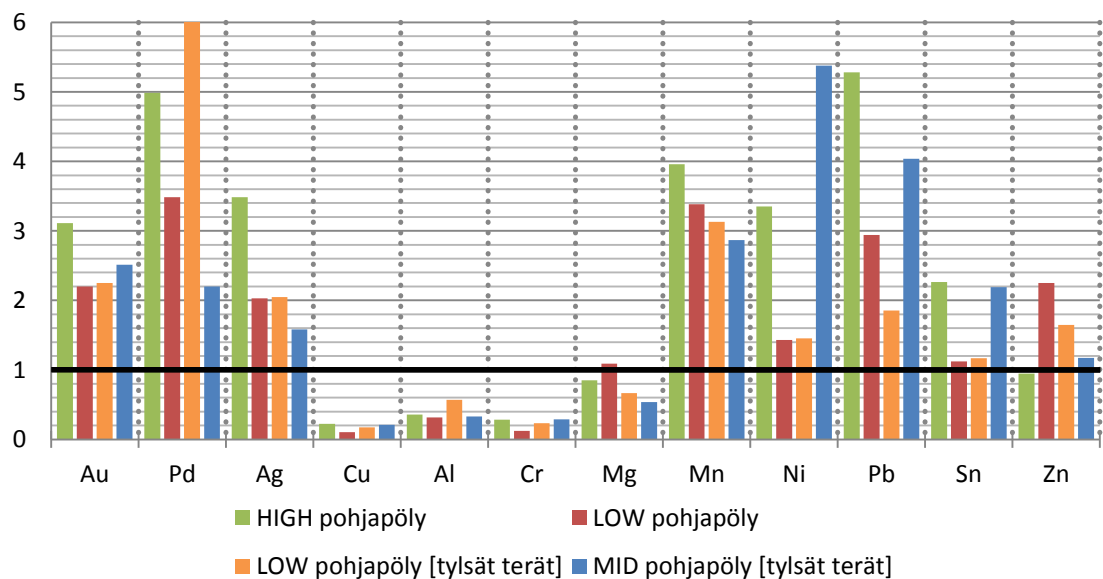
**Taulukko 13 MID-kortin murskauksessa vapautuneet pölyt tylsien terien koeajossa**

| MID murske [tylsät terät] |       |      | MID murskauspöly [tylsät terät] |      | Suhdeluku pölyt/murske | MID pohjapöly [tylsät terät] |      | Suhdeluku pölyt/murske |
|---------------------------|-------|------|---------------------------------|------|------------------------|------------------------------|------|------------------------|
| Au                        | 90    | g/tn | 181                             | g/tn | 2,01                   | 226                          | g/tn | 2,51                   |
| Pd                        | < 15  | g/tn | 17                              | g/tn | 1,13                   | 33                           | g/tn | 2,20                   |
| Ag                        | 789   | g/tn | 1440                            | g/tn | 1,83                   | 1250                         | g/tn | 1,58                   |
| Cu                        | 19,3  | %    | 3,72                            | %    | 0,19                   | 4,06                         | %    | 0,21                   |
| Al                        | 4,36  | %    | 3,21                            | %    | 0,74                   | 1,43                         | %    | 0,33                   |
| Cr                        | 0,076 | %    | 0,022                           | %    | 0,29                   | 0,022                        | %    | 0,29                   |
| Mg                        | 0,275 | %    | 0,184                           | %    | 0,67                   | 0,148                        | %    | 0,54                   |
| Mn                        | 0,502 | %    | 0,942                           | %    | 1,88                   | 1,44                         | %    | 2,87                   |
| Ni                        | 0,318 | %    | 1,12                            | %    | 3,52                   | 1,71                         | %    | 5,38                   |
| Pb                        | 0,307 | %    | 0,861                           | %    | 2,80                   | 1,24                         | %    | 4,04                   |
| Sn                        | 1,74  | %    | 3,07                            | %    | 1,76                   | 3,81                         | %    | 2,19                   |
| Zn                        | 2,15  | %    | 1,59                            | %    | 0,74                   | 2,52                         | %    | 1,17                   |
| Fe                        |       |      | 8,12                            | %    |                        | 13,4                         | %    |                        |

Kuviin 47 ja 48 on koottu kaikki analyysitulokset pölyjen pitoisuussuhteesta verrattuna murskeeseen. Kaikki arvot, jotka ovat yli yhden ja näin ollen kuvien mustan ohjeiivan yläpuolella, ovat rikastuneet pölyihin. Kuten aikaisemminkin on todettu, ja mikä on selkeästi kuvista havaittavissa, on jalometallien rikastuminen murskauksen yhteydessä pölyihin. Myös mangaani, nikkeli, lyijy ja tina rikastuvat pölyihin kaikissa tapauksissa. Trendin mukaisesti kaikissa koeajoissa ja pölytyypeissä kuparin, alumiinin ja kromin pitoisuudet ovat matalammat pölyissä kuin murskeessa.



Kuva 47 Metallien rikastuminen murskauspölyihin



Kuva 48 Metallien rikastuminen pohjapölyihin

Toisin kuin alun perin ajateltiin, tylsien terien koeajoissa metallien rikastuminen pölyihin oli vähäisempää kuin terävien terien murskauksessa. Ero on kuitenkin todella pieni, sillä terävien terien koeajoissa 69 % kaikista metalleista rikastui pölyihin, kun taas tylsillä terillä vastaava luku on 65 %. Näiden tulosten pohjalta onkin luotettavinta väittää, että terien tylsyys ei erityisemmin vaikuta piirilevyjen murskauksen yhteydessä vapautuneiden pölyjen rikastumiseen. Pyöröleikkurin käyttöä piirikorttien murskauksessa on pitkään perusteltu sen pienten häviöiden vuoksi juuri leikkaavan voimansa ansiosta. Kuitenkin terien tylsistyessä leikkaava voima vähenee ja hiertävä tai murskaava voima lisääntyy, mikä ei kuitenkaan näiden tulosten valossa näy kasvavana pölyjen rikastumisasteena arvometallien osalta.

Tämän kappaleen pölyanalyysien tärkein anti on varmistus jalometallien rikastumisesta murskauksen yhteydessä pölyfraktioon. On sitten asia erikseen, halutaanko tämän tiedon pohjalta ryhtyä korjaaviin toimenpiteisiin. Näitä tuotantoa tehostavia operaatioita voisivat olla muun muassa murskauksen imujärjestelmän, kapasiteetin ja talteenoton parantaminen tai erillisen pölyjen jatkokäsittelyn kehittäminen. Pölyjen kuparipitoisuus on kuitenkin todella matala verrattuna murskeeseen, joten on kyseenalaista, kannattaako pölyä edes myydä kuparisulatolle. Tällä hetkellä kerätyt pölyt yhdistetään kuparisulatolle lähtevään erään, jolloin jalometallirikas pöly laimenee ja käytännössä katoaa myytävään erään. Yksi vaihtoehto voisi olla optimoitu liuotusprosessi, sillä pieni massa ja hieno partikkelikoko mahdollistaisivat pienen mittakaavan ja mahdollisimman yksinkertaisen toiminnan. Tämän diplomityön puitteissa ei ole kuitenkaan mahdollista paneutua sen syvällisemmin pölyjen jalostusmahdollisuuksiin, vaan sitä varten täytyy myöhemmin kohdistaa erillisiä tutkimusresursseja.

### **6.3 Analyysitulokset massan jakautumisen suhteen**

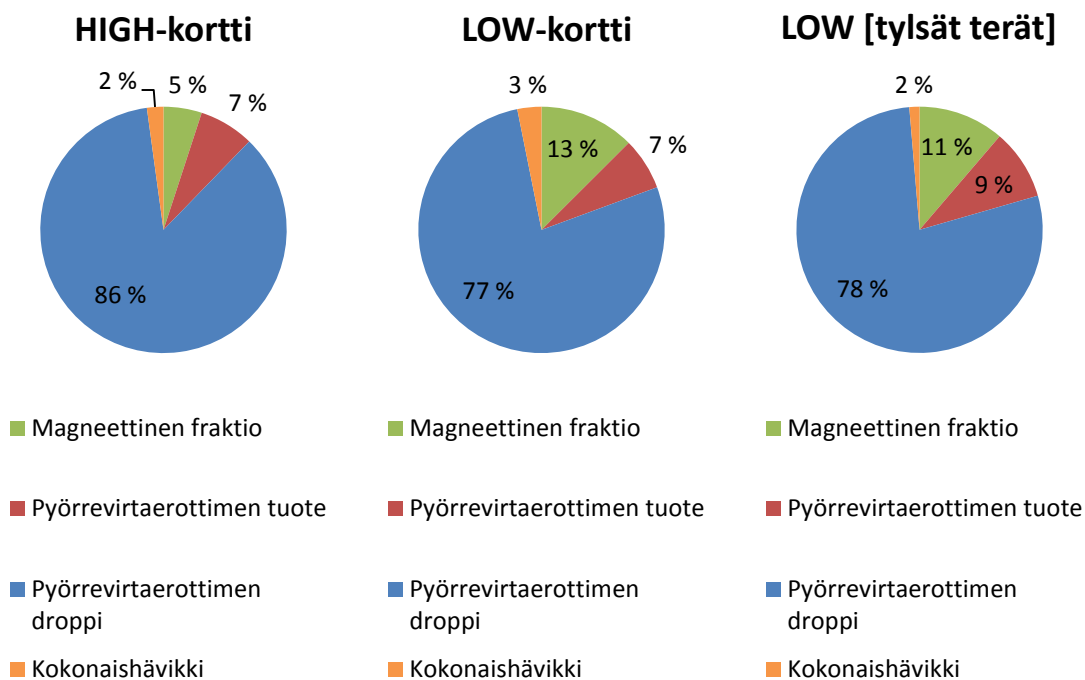
Pelkät pitoisuudet eivät kerro vielä koko totuutta piirilevyjen kierrätysprosessista, vaan ne täytyy suhteuttaa jakeiden massoihin. Lupaavat pitoisuudet eivät vielä varmista fraktion taloudellista kannattavuutta, jos niiden kokonaismassat ovat vaatimattomat. Taulukkoon 14 on kerätty eri jakeiden massat sekä niistä on laskettu paino-osuus murskeeseen nähden. Kuvassa 49 näitä jakeiden massoja yritetään havainnollistaa ympyrädiagrammien avulla.

**Taulukko 14 Koeajojen syötteen massan jakautuminen yksikköprosessien mukaan**

|                           | Syöte      | Magneettinen fraktio |                     | Pyörrevirtaerottimen tuote |                     | Pyörrevirtaerottimen droppi |                     | Kokonaishävikki |                     |
|---------------------------|------------|----------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
|                           | Massa [kg] | Massa [kg]           | Osuus syöttestä [%] | Massa [kg]                 | Osuus syöttestä [%] | Massa [kg]                  | Osuus syöttestä [%] | Massa [kg]      | Osuus syöttestä [%] |
| HIGH-kortti               | 7400       | 372                  | 5,0                 | 535                        | 7,2                 | 6333                        | 85,6                | 160             | 2,2                 |
| LOW-kortti                | 10820      | 1355                 | 12,5                | 742                        | 6,9                 | 8381                        | 77,5                | 342             | 3,2                 |
| LOW-kortti [tylsät terät] | 8640       | 974                  | 11,3                | 800                        | 9,3                 | 6751                        | 78,1                | 115             | 1,3                 |

Aivan kuten pitääkin, pyörrevirtaerottimen droppiin päätyy ylivoimaisesti suurin osuus massasta kaikissa tapauksissa. Myös magneettisen fraktion osuus mukailee totuttuja tuloksia kaikissa koeajoissa. Tylsien terien koeajoissa magneettisen fraktion osuus on pienentynyt ja pyörrevirtaerottimen tuotteen määrä kasvanut verrattuna terävien terien koeajoon. Mitään selkeää trendiä ei ollut havaittavissa pyöröleikkurin terien kulumisen johdosta. Hävikki muodosti muutaman prosentin osuuden syötteen kokonaispainosta, mikä on hyvin todennäköisesti liioittelevan suuri näin yksinkertaisessa prosessissa. Skeptisyyttä tuloksia kohtaan lisää se, että tylsien terien tuloksissa hävikin määrä on vähentynyt, vaikka sen pitäisi loogisesti ajatellen kasvaa. Jakeiden punnitsemisessa oli niin paljon epävarmuustekijöitä ja mittavirheitä, että jakeiden massoja pitää katsoa enemmän suuntaa antavina arvioina kuin absoluuttisina totuuksina.





Kuva 49 Ympyrädiagrammit jakeiden massoista

Koska pitoisuustulokset oli toteutettu erikseen sekä hienolle että karkealle fraktiolle, kokonaisfraktion pitoisuus laskettiin painotetulla keskiarvolla seulonnan tuloksista. Seulontakokeiden perusteella arvioitiin 10 % massasta päätyvän seulan alitteeseen ja 90 % seulan ylitteeseen. Näitä lukuja sovellettiin painotetun keskiarvon muodostamisessa yhtälön 3 mukaisesti, jossa  $m$  kuvastaa kyseisen jakeen massaa.

$$m_{\text{keskiarvo}} = 0,1 \cdot m \cdot \rho_{<15\text{mm}} + 0,9 \cdot m \cdot \rho_{>15\text{mm}} \quad (3)$$

Pölyjen arvioitiin muodostavan 0,1 % syötteen massasta, josta puolet koostui pölynimuriin talteenotetuista pölyistä ja toinen puoli pyöröleikkurin pohjalle muodostamasta pölykerroksesta. Lahden laboratorion analyysitulosten ja yllä mainittujen estimaattien avulla lasketut tulokset on esitelty alla olevissa taulukoissa 15-17. Kyseisiä tuloksia pitää tarkastella erityisellä varauksella, sillä niissä on paljon virhelähteitä aina näytteenotosta painotusarvioihin.

Kulta ja hopea kiinnostavat korkean hintansa vuoksi piirilevyjen kierrättäjiä, ja lähtökohtaisesti niiden kaikki hävikit halutaan minimoida. Tämän vuoksi jokaisesta koeajosta otetaan erityystarkasteluun kullan ja hopean kulkeutuminen kierrätysprosessissa yksinkertaisen ympyrädiagrammin muodossa. Valitettavasti palladiumin pitoisuudet olivat monessa jakeessa havaitsemisrajan alapuolella, joten palladiumin tutkiminen vastaavan ympyrädiagrammin muodossa ei ole tässä yhteydessä mielekäästä.

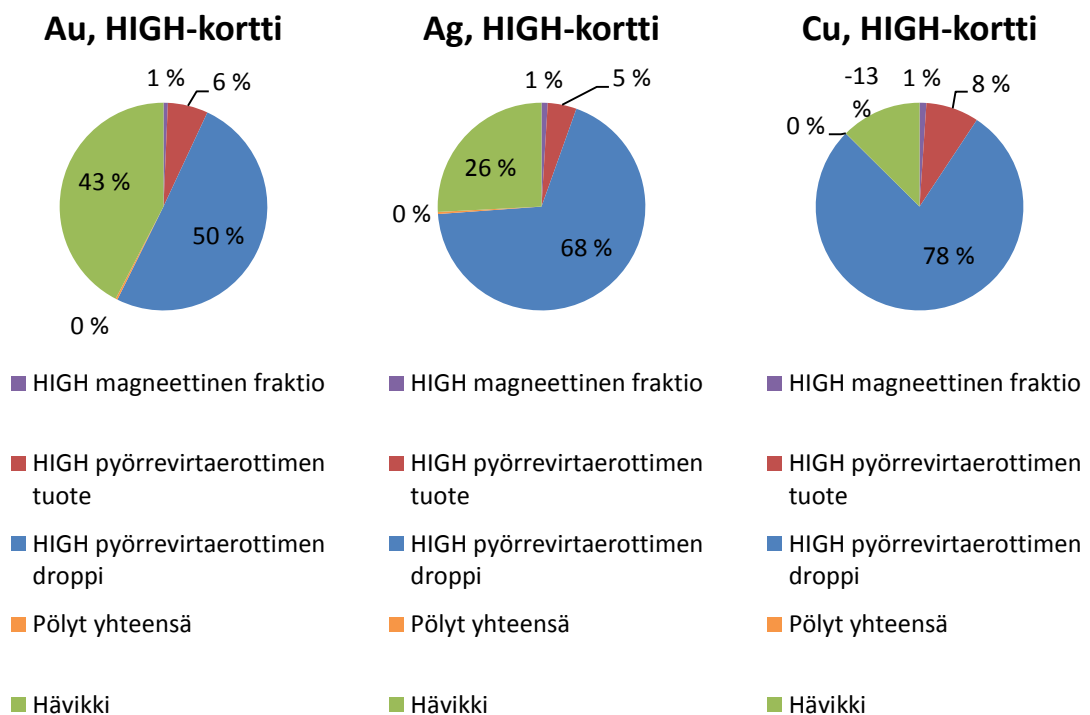
Ensimmäiseksi otetaan HIGH-kortti yksityiskohtaisempaan tarkasteluun. HIGH-kortti oli ainoa piirilevylaatu, jolle oli mahdollista tehdä kokonaisvaltainen tase, ja sen analyysitulokset on nähtävissä taulukossa 15. Ensimmäiseksi silmiin osuu joidenkin metallien kohdalta negatiiviset hävikkiarvot, mikä viestii kumuloituneista virhelähteistä, sillä käsittelyn aikana ei ole mahdollista ilmestyä lisää metalleja prosessiin. Magneettisesta fraktiosta löytyy 16 kg kuparia, mutta se on vain 1,4 % syötteen massasta, mikä on varsin positiivinen tulos. Pyörrevirtaerottimen tuotteeseen tosin päätyy 123 kg, eli 11 % kuparista, mitä voisi jo prosessiparametreja säätämällä saada matalammaksi. Kuitenkin on huomioitava, että kuparista valtaosa päätyy pyörrevirtaerottimen droppiin, kuten toivotaankin.

Alumiinin kohdalla tulokset ovat varsin heikot. Pyörrevirtaerottimen tuotteeseen erotetaan 48 kg alumiinista, eli 16 %, kun taas pyörrevirtaerottimen dropista analysoitiin 199 kg alumiinia, joka on peräti 67 % murskeesta. Pyörrevirtaerottimen rooli onkin tässä yhteydessä kyseenalainen, kun haluttu erotustehokkuus alumiinin kannalta on todella heikko. Näiden tulosten perusteella Kauklahten tuotantolaitoksella sovelletaan oikeaa toimintamallia, kun HIGH-korttia prosessoitaessa ei pidetä pyörrevirtaerotinta päällä.

**Taulukko 15 HIGH-kortin analyysitulokset massoihin suhteutettuna [syötettä 7400 kg]**

|    | High murske | HIGH magneettin en fraktio |                     | HIGH pyörrevirtaerottimen tuote |                     | HIGH pyörrevirtaerottimen droppi |                     | Pölyt yhteensä |                     | Hävikki    |                     |
|----|-------------|----------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|----------------|---------------------|------------|---------------------|
|    | Massa [kg]  | Massa [kg]                 | Osuus syöttestä [%] | Massa [kg]                      | Osuus syöttestä [%] | Massa [kg]                       | Osuus syöttestä [%] | Massa [kg]     | Osuus syöttestä [%] | Massa [kg] | Osuus syöttestä [%] |
| Au | 6,830       | 0,047                      | 0,68                | 0,428                           | 6,27                | 3,441                            | 50,38               | 0,02           | 0,29                | 2,895      | 42,38               |
| Pd | 2,553       | 0,046                      | 1,79                | 0,066                           | 2,58                | 0,813                            | 31,83               | 0,01           | 0,32                | 1,621      | 63,48               |
| Ag | 42,92       | 0,412                      | 0,96                | 1,928                           | 4,49                | 29,358                           | 68,40               | 0,14           | 0,32                | 11,09      | 25,82               |
| Cu | 1117,4      | 15,82                      | 1,42                | 123,0                           | 11,01               | 1165,53                          | 104,31              | 0,34           | 0,03                | -187,3     | -16,76              |
| Al | 296,74      | 7,42                       | 2,50                | 48,48                           | 16,34               | 198,93                           | 67,04               | 0,15           | 0,05                | 41,76      | 14,07               |
| Cr | 10,88       | 1,02                       | 9,37                | 0,41                            | 3,73                | 8,54                             | 78,53               | 0,00           | 0,03                | 0,91       | 8,34                |
| Mg | 14,50       | 0,50                       | 3,43                | 1,38                            | 9,49                | 12,88                            | 88,80               | 0,01           | 0,10                | -0,26      | -1,82               |
| Mn | 16,35       | 1,24                       | 7,58                | 0,35                            | 2,16                | 7,87                             | 48,11               | 0,05           | 0,29                | 6,85       | 41,86               |
| Ni | 25,60       | 1,74                       | 6,80                | 0,84                            | 3,28                | 21,55                            | 84,17               | 0,07           | 0,26                | 1,41       | 5,49                |
| Pb | 31,82       | 0,78                       | 2,44                | 1,64                            | 5,17                | 46,37                            | 145,73              | 0,14           | 0,43                | -17,11     | -53,76              |
| Sn | 78,44       | 3,04                       | 3,87                | 4,45                            | 5,67                | 132,08                           | 168,38              | 0,19           | 0,24                | -61,32     | -78,17              |
| Zn | 108,04      | 5,20                       | 4,82                | 4,25                            | 3,93                | 144,79                           | 134,02              | 0,09           | 0,09                | -46,29     | -42,85              |

Kullan, hopean ja kuparin käyttäytyminen prosessissa on esitetty kuvan 50 ympyrädiagrammeissa. Jalometallien halutaan päätyvän pyörrevirtaerottimen droppiin, jolloin ne saadaan kuparisulatolta talteen suhteellisen hyvällä katteella. Kuitenkin kullasta vain 50 %, palladiumista 32 % ja hopeasta 68 % havaitaan kyseisessä pyörrevirtaerottimen dropissa. On kuitenkin muistettava, että HIGH-kortin prosessoinnissa pyörrevirtaerotinta ei pidetä päällä, joten laskettaessa pyörrevirtaerottimen tuote mukaan, haluttuun loppufraktioon päätyy 56 % kullasta ja 73 % hopeasta. Lisäksi jalometallien hävikit tuntuvat melko kohtuuttomilta, sillä kullalla se on peräti 42 %, palladiumilla 63 % ja hopealla 26 %. Toisaalta positiivisena tuloksena voidaan pitää sitä, että magneettiseen fraktioon erottui vain vähän jalometalleja. Vaikka edellisessä kappaleessa havaittiin pölyissä korkeita jalometallipitoisuuksia, niiden osuus koko prosessista on häviävän pieni, mikä voi vähentää pölyjen jatkokäsittelyintressejä.



**Kuva 50 Kullan, hopean ja kuparin kulkeutuminen HIGH-kortin kierrätysprosessissa**

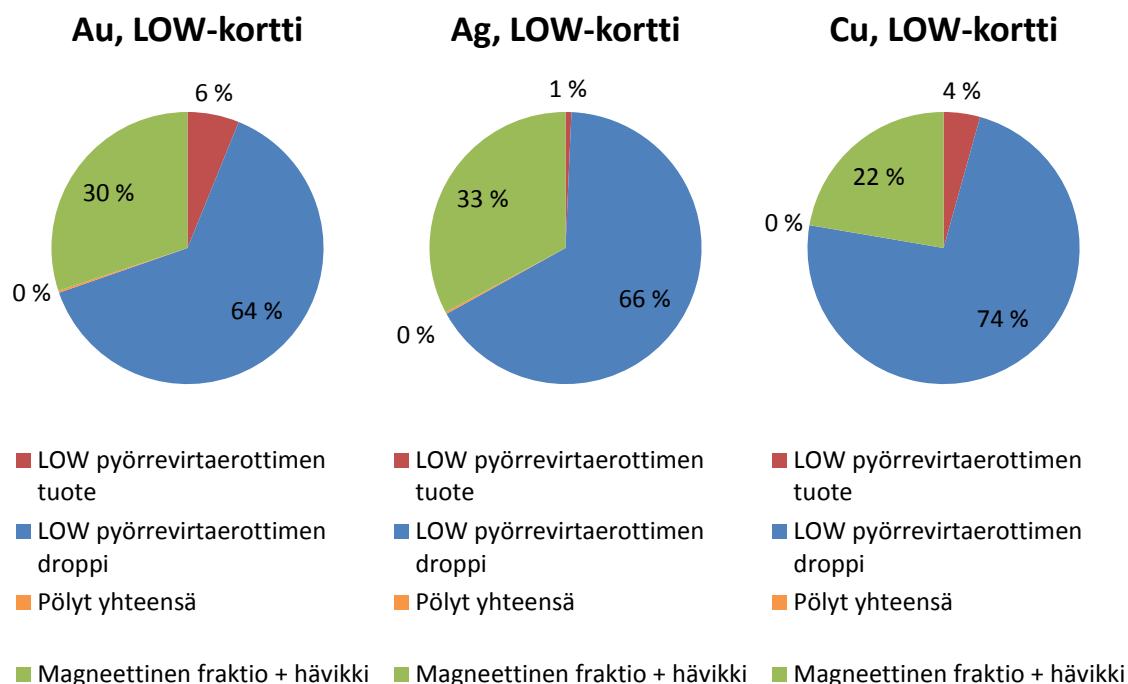
Taulukkoon 16 on kerätty LOW-kortin analyysitulokset ja kuvaan 51 on koottu kullan ja hopean sekä kuparin taseet ympyrädiagrammeina. Valitettavasti magneettisesta fraktiosta ei kerätty analyysituloksia, joten tyhjentävää tasetta ei ollut mahdollista luoda. Kuten HIGH-kortin tapauksessa, kuparista suurin osa löytyi pyörrevirtaerottimen dropista. Koska kyseinen fraktio myydään kuparisulatolle, sen kuparipitoisuus on elintärkeä kannattavan liiketoiminnan varmistamiseksi. Kuparia oli pyörrevirtaerottimen tuotteessa vain 4 %, mikä on melko kiitettävä tulos. Alumiinin

tulos oli parhaimmillaan tyydyttävä, sillä 48 % alumiinista oli erotettu pyörrevirtaerottimen tuotteeseen, mutta peräti 45 % oli kulkeutunut droppiin. Huolellisemmalla murskauksella ja pyörrevirtaerotinta hienosäätämällä voitaisiin todennäköisesti päästä parempaan talteenottoprosenttiin. Toisaalta, jos alumiinista saataisiin suurempi osuus pyörrevirtaerottimen tuotteeseen, se voi samalla tarkoittaa kuparin ja muiden partikkelien kulkeutumista kyseiseen fraktioon epätäydellisen murskauksen johdosta. Magneettisessa fraktiossa ja hävikissä alumiinia oli kuitenkin vain 6 %, mutta kuparia oli jopa 22 %.

**Taulukko 16 LOW-kortin analyysitulokset massoihin suhteutettuna [syötettä 10820 kg]**

|    | LOW<br>murske | LOW<br>pyörrevirtaerottimen tuote |                    | LOW<br>pyörrevirtaerottimen droppi |                    | Pölyt yhteensä |                    | Magneettinen fraktio + hävikki |                    |
|----|---------------|-----------------------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------|----------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|
|    | Massa [kg]    | Massa [kg]                        | Osuus syötettä [%] | Massa [kg]                         | Osuus syötettä [%] | Massa [kg]     | Osuus syötettä [%] | Massa [kg]                     | Osuus syötettä [%] |
| Au | 1,623         | 0,100                             | 6,15               | 1,031                              | 63,52              | 0,004          | 0,24               | 0,488                          | 30,09              |
| Pd | 3,354         | 0,007                             | 0,22               | 0,687                              | 20,49              | 0,010          | 0,30               | 2,650                          | 78,99              |
| Ag | 32,676        | 0,228                             | 0,70               | 21,651                             | 66,26              | 0,070          | 0,21               | 10,727                         | 32,83              |
| Cu | 1460,70       | 63,35                             | 4,34               | 1071,44                            | 73,35              | 0,17           | 0,01               | 325,74                         | 22,30              |
| Al | 698,97        | 337,62                            | 48,30              | 318,06                             | 45,50              | 0,31           | 0,04               | 42,98                          | 6,15               |
| Cr | 16,23         | 1,82                              | 11,20              | 3,89                               | 23,99              | 0,00           | 0,01               | 10,52                          | 64,79              |
| Mg | 24,99         | 1,79                              | 7,14               | 17,38                              | 69,54              | 0,03           | 0,11               | 5,80                           | 23,21              |
| Mn | 236,96        | 0,83                              | 0,35               | 133,15                             | 56,19              | 0,62           | 0,26               | 102,36                         | 43,20              |
| Ni | 20,02         | 0,89                              | 4,47               | 13,36                              | 66,73              | 0,03           | 0,16               | 5,73                           | 28,64              |
| Pb | 64,38         | 0,83                              | 1,28               | 62,40                              | 96,92              | 0,18           | 0,28               | 0,98                           | 1,52               |
| Sn | 125,51        | 1,46                              | 1,16               | 100,81                             | 80,32              | 0,15           | 0,12               | 23,09                          | 18,40              |
| Zn | 173,12        | 2,05                              | 1,19               | 122,20                             | 70,58              | 0,32           | 0,19               | 48,55                          | 28,04              |

Kullan 64 % osuus ja hopean 66 % osuus pyörrevirtaerottimen dropista on kohtalainen, mutta prosenttiosuus voisi olla korkeampikin. Jos tuloksia verrataan HIGH-korttiin, kullan hävikin sekä magneettisen fraktion osuus on pienempi (30%). Toisaalta hopeaa on kadonnut LOW-kortissa prosessin aikana suhteellisesti enemmän kuin HIGH-kortissa. Lohdullista on, että pyörrevirtaerottimen tuotteeseen joutui kultaa vain 6 % ja hopeaa vain mitättömät 1 %.



**Kuva 51 Kullan, hopean ja kuparin kulkeutuminen LOW-kortin kierrätysprosessissa**

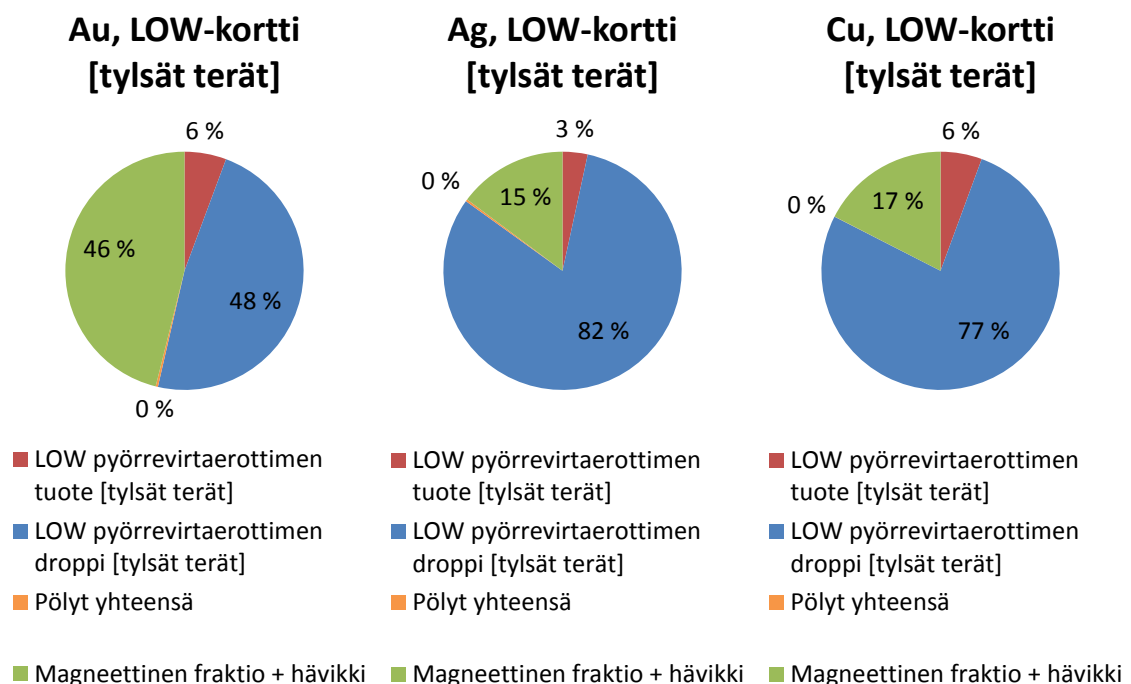
LOW-kortin analyysitulokset tylsien terien koeajojen jälkeen on kerätty taulukkoon 17. Ensinnäkin selkeä ongelmakohta on havaittavissa alumiinin kohdalla, sillä pyörrevirtaerottimen dropin alumiinimäärä on lähes kaksinkertainen verrattuna syötteeseen. Tulos johtuu yllättävän korkeasta alumiinipitoisuudesta dropissa, mikä puolestaan johtaa dropin ison massan vuoksi runsaaseen alumiinin määrään. Kupari käyttäytyy kuten aikaisemmissakin tapauksissa, ja jopa 77 % kuparista havaitaan pyörrevirtaerottimen dropissa ja vain 6 % kuparista löytyy pyörrevirtaerottimen tuotteesta.



**Taulukko 17 LOW-kortin tylsien terien koeajojen analyysitulokset massoihin suhteutettuna [syötettä 8640 kg]**

|    | LOW<br>murske<br>[tylsät<br>terät] | LOW<br>pyörrevirtaerotti<br>men tuote [tylsät<br>terät] |                             | LOW<br>pyörrevirtaerotti<br>men droppi [tylsät<br>terät] |                             | Pölyt yhteensä |                             | Magneettinen<br>fraktio + hävikki |                             |
|----|------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
|    | Massa<br>[kg]                      | Massa<br>[kg]                                           | Osuus<br>syöttees<br>tä [%] | Massa<br>[kg]                                            | Osuus<br>syöttees<br>tä [%] | Massa<br>[kg]  | Osuus<br>syöttees<br>tä [%] | Massa<br>[kg]                     | Osuus<br>syöttees<br>tä [%] |
| Au | 1,728                              | 0,098                                                   | 5,69                        | 0,830                                                    | 48,05                       | 0,005          | 0,31                        | 0,799                             | 46,25                       |
| Pd | 1,296                              | 0,066                                                   | 5,09                        | 0,559                                                    | 43,16                       | 0,008          | 0,58                        | 0,671                             | 51,74                       |
| Ag | 26,525                             | 0,906                                                   | 3,41                        | 21,689                                                   | 81,77                       | 0,076          | 0,29                        | 3,931                             | 14,82                       |
| Cu | 1278,72                            | 71,89                                                   | 5,62                        | 983,42                                                   | 76,91                       | 0,27           | 0,02                        | 223,41                            | 17,47                       |
| Al | 348,19                             | 265,01                                                  | 76,11                       | 686,82                                                   | 197,25                      | 0,22           | 0,06                        | -603,64                           | -173,36                     |
| Cr | 8,55                               | 0,65                                                    | 7,66                        | 4,18                                                     | 48,92                       | 0,00           | 0,04                        | 3,71                              | 43,42                       |
| Mg | 21,51                              | 1,82                                                    | 8,46                        | 20,16                                                    | 93,72                       | 0,02           | 0,08                        | -0,47                             | -2,18                       |
| Mn | 139,10                             | 1,40                                                    | 1,01                        | 97,80                                                    | 70,31                       | 0,37           | 0,27                        | 39,90                             | 28,69                       |
| Ni | 19,09                              | 0,37                                                    | 1,94                        | 11,90                                                    | 62,33                       | 0,04           | 0,21                        | 6,82                              | 35,73                       |
| Pb | 77,33                              | 0,86                                                    | 1,11                        | 56,11                                                    | 72,56                       | 0,15           | 0,19                        | 20,36                             | 26,34                       |
| Sn | 112,32                             | 1,91                                                    | 1,70                        | 98,90                                                    | 88,05                       | 0,17           | 0,15                        | 11,51                             | 10,24                       |
| Zn | 142,56                             | 3,13                                                    | 2,19                        | 112,40                                                   | 78,85                       | 0,21           | 0,15                        | 27,03                             | 18,96                       |

Tylsillä terillä toteutettu LOW-korttien kullan ja hopean ympyrädiagrammit on nähtävissä kuvasta 52. Kulta on päätyntä pyörrevirtaerottimen droppiin vain 48 %, ja näiden tulosten perusteella magneettiseen fraktioon ja hävikkiin menee peräti 46 % kullasta. Hopeassa tulos on positiivisempi, sillä pyörrevirtaerottimen dropissa havaittiin peräti 81 % syötteen hopean määrästä, ja magneettisessa fraktiossa sekä hävikissä hopean osuus on 15 % syöttestä. Suurimpia eroja vastaavaan terävien terien koeajoon on reilumpi kullan hävikki, mikä tuntuu loogiselta tulokselta. Yllättäen kuitenkin hopean määrä hävikissä on huomattavasti pienempi tylsien terien koeajossa kuin vastaavassa terävien terien koeajossa. Kuten terävien terien tapauksessa huomattiin, pyörrevirtaerottimen tuotteeseen erottuu melko maltillisesti kulta ja hopeaa. Tylsillä terillä tämä osuus on jopa pienentynyt. Näiden tutkimustulosten valossa hopeassa vaikuttaisi olevan pienemmät hävikit kuin kullalla, jonka lisäksi suurempi osuus hopeasta päätyy haluttuun loppufraktioon.



Kuva 52 Kullan, hopean ja kuparin kulkeutuminen LOW-kortin tylsien terien kierrätysprosessissa

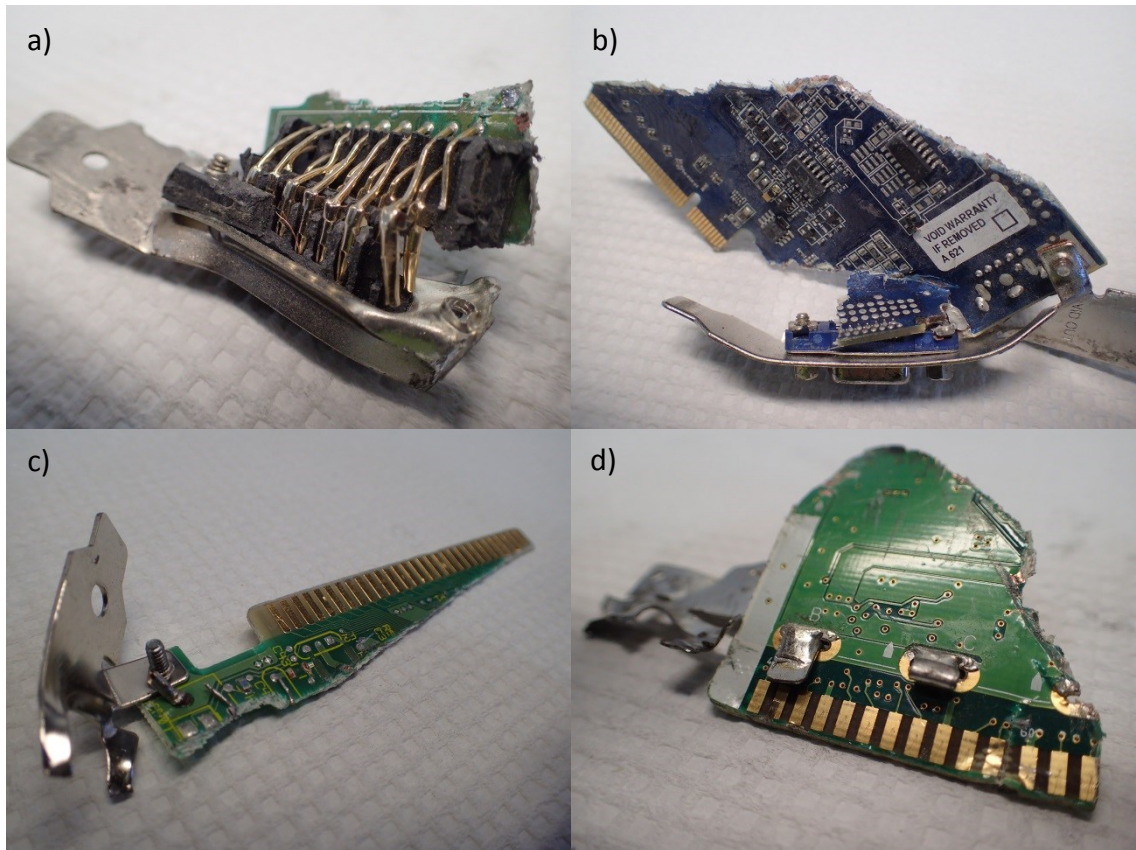
Aivan kuten alun perin ajateltiin, tylsien terien ajossa pölyihin jakautuu hieman enemmän metalleja kuin terävien terien ajossa. Kun lisäksi huomioidaan pölyjen pieni massaosuus koko prosessista, kokonaismäärien ero jää mitättömäksi. Muuten hävikin määrä vaihtelee tylsien ja terävien terien koeajoissa satunnaisesti, eikä mitään selkeätä trendiä voida havaita. Kokonaismäärällisesti terävien terien koeajoissa muodostui jopa hieman enemmän hävikkä kuin tylsillä terillä, mikä tuntuu alkuperäisten hypoteesien valossa nurinkuriselta.

#### 6.4 Magneettisen fraktion irtautumisasteet

Lopuksi haluttiin selvittää, kuinka puhdasta ferromagneettinen fraktio on. Ihannetavoite on, että magneetin mukana erottuisi vain puhtaita ferromagneettisia kappaleita, jotka voisi parhaimmillaan myydä sellaisenaan asiakkaalle. Todellisuudessa magneetin mukana kulkeutuu erilaisia partikkeleita, joihin on kiinnittyneenä epätäydellisen murskauksen ja puutteellisen irtautumisasteen johdosta erilaisia metalleja, muoviosia, keraameja tai näiden yhdistelmiä.

Pahimmillaan arvokkaita jalometalleja joutuu magneettiseen fraktioon, jolloin ne ovat automaattisesti pois lopputuotteen, eli pyörrevirtaerottimen dropin, arvon muodostavasta seoksesta. Teoriassa magneettiseen fraktioon erottuneet jalometallit on vielä mahdollista saada talteen jatkojalostuksen yhteydessä Kuusakosken Heinolan prosessissa, mutta lisäkäsittelyt kasvattavat aina hävikin määrää. Kuvaan 53 on kerätty

magneettisesta fraktiosta löytyneitä arvokkaita kappaleita, joissa on selkeästi nähtävissä kullalla pinnoitetut liittimet sekä jokin ferromagneettinen liitos, jonka takia se on erottunut ferromagneettiseen fraktioon. Kuvan 53 provosoivat partikkelit valittiin lähinnä varoittavina esimerkkeinä, eivätkä ne edusta tavallista ferromagneettista kappaletta.



**Kuva 53 Esimerkkikuvia ferromagneettiseen fraktioon päätyneistä arvokkaista epäpuhtaista kappaleista**

Taulukkoon 17 on kerätty manuaalisesti laskettujen puhtaiden ja epäpuhtaiden ferromagneettisten kappaleiden lukumäärät sekä niiden punnitut massat. Tutkittavat partikkelit valittiin ferromagneettisen fraktion yli 15 mm:n ylitteestä, sillä pienemmistä partikkeleista koostunut alite olisi ollut liian haasteellinen tutkittavaksi. Manuaalisella erottelutyöllä aikaansaatu ferromagneettisten partikkelien jakautuminen on nähtävissä kuvista 54. Kyseisistä kuvista on erityisen helppo huomata selkeä väri- ja rakenne-ero puhtaiden ja epäpuhtaiden ferromagneettien välillä. Saaduista tuloksista on muodostettu prosenttiosuudet jokaiselle koeajolle. Kuvaan 54 on havainnollistettu taulukossa 18 esitettyjä tuloksia.



Kuva 54 Ferromagneettiseen fraktioon päätyneiden kappaleiden jakaminen puhtaisiin ja epäpuhtaisiin jakeisiin: a) HIGH-kortin jakautuminen b) lähikuva LOW-kortin puhtaasta ferromagneettisesta jakeesta c) lähikuva LOW-kortin epäpuhtaasta ferromagneettisesta jakeesta

Kuten tuloksista havaitaan, HIGH-kortin irtautumisasteet ovat heikommät kuin LOW-kortilla. Tähän voi vaikuttaa erityisesti HIGH-kortin monimutkaisempi rakenne, sillä niihin komponentteja on usein kiinnitetty tiheämmin ja lukumäärällisesti enemmän kuin LOW-kortteihin. Lisäksi HIGH-kortin monikerroksinen pohjalevy tekee sen murskaamisesta työläämpää kuin yksinkertaisemmissa LOW-korttien tapauksessa. Näin ollen todennäköisyydet ovat HIGH-kortissa suuremmat sille, että murskauksen jälkeen ferromagneettiseen osaan on edelleen kiinnittynyt jokin ei-ferromagneettinen partikkeli, mikä puolestaan reagoi magneettiseen erottimeen. Lukumäärällisesti HIGH-kortin irtautumisaste oli 62 % ja massaan suhteutettuna vain 45 %.

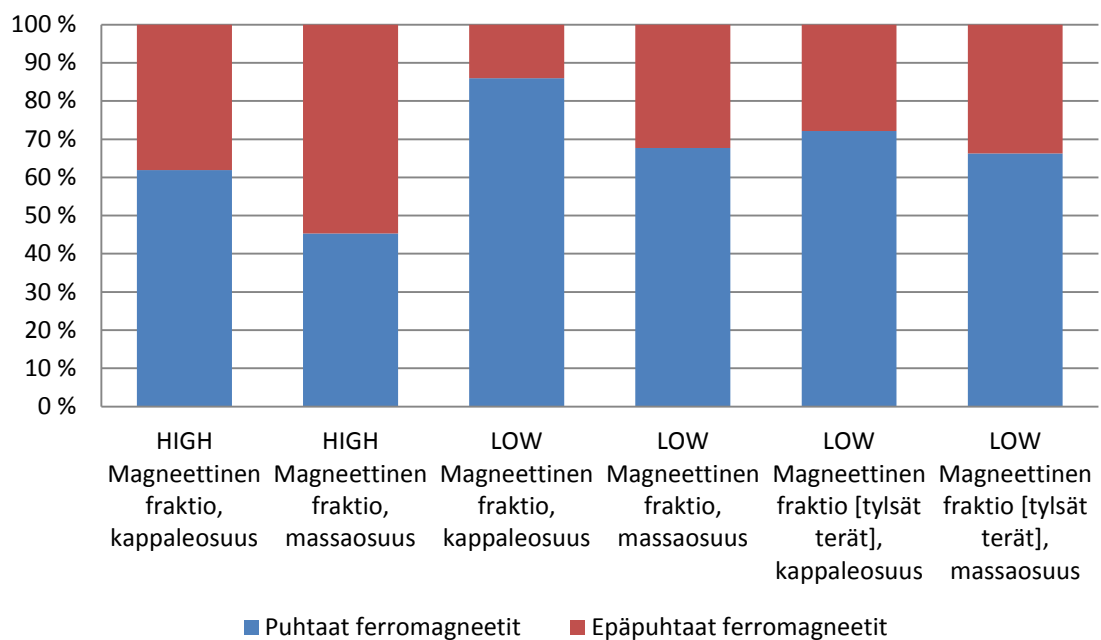


**Taulukko 18 Magneettisen fraktion puhtaiden ja epäpuhtaiden ferromagneettisten kappaleiden suhde toisiinsa nähden**

|                           | HIGH Magneettinen fraktio |                     | LOW Magneettinen fraktio |                     | LOW Magneettinen fraktio [tylsät terät] |                     |
|---------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------------------|---------------------|
|                           | Kappalemäärä, kpl         | Prosenttiosuus, %   | Kappalemäärä, kpl        | Prosenttiosuus, %   | Kappalemäärä, kpl                       | Prosenttiosuus, %   |
| Puhtaat ferromagneetit    | 703                       | 61,9                | 1822                     | 86,0                | 443                                     | 72,1                |
| Epäpuhtaat ferromagneetit | 433                       | 38,1                | 297                      | 14,0                | 171                                     | 27,9                |
| Yhteensä                  | 1136                      | 100                 | 2119                     | 100                 | 614                                     | 100                 |
|                           | massa (kg)                | Prosenttiosuus, m-% | massa (kg)               | Prosenttiosuus, m-% | massa (kg)                              | Prosenttiosuus, m-% |
| Puhtaat ferromagneetit    | 4,04                      | 45,3                | 6,46                     | 67,7                | 4,2                                     | 66,2                |
| Epäpuhtaat ferromagneetit | 4,88                      | 54,7                | 3,08                     | 32,3                | 2,14                                    | 33,8                |
| Yhteensä                  | 8,92                      | 100                 | 9,54                     | 100                 | 6,34                                    | 100                 |

Kuten aikaisemminkin todettiin, LOW-kortin irtautumisasteet ovat näiden tulosten valossa paremmat kuin HIGH-kortilla. LOW-kortilla puolestaan terävillä terillä saatiin korkeammat irtautumisasteet kuin tylsien terien koeajossa. Tylsien terien murskauksessa ajatellaan olevan vähemmän leikkaavia voimia ja enemmän murskaavia sekä hiertäviä voimia. Tämä tarkoittaisi tylsien terien murskauksessa vähemmän siististi leikkautuneita reunoja ja enemmän runneltuja partikkeleita sekä toisistaan irtautumattomia komponentteja. Kyseinen murskausteoria tukee näin ollen tylsien terien koejoista saatuja heikompia irtautumisastetuloksia. Parhaaksi irtautumisasteeksi saatiin LOW-kortin 86 prosenttinen kappaleosuus.





**Kuva 55 Ferromagneettisen fraktion irtautumisasteet eri koeajoissa**

Jokaisen koeajon tuloksissa oli havaittavissa kappaleosuudessa analyysissä korkeampi irtautumisaste kuin massaosuuden tapauksessa. Epäpuhtaissa kappaleissa oli ferromagneettiseen osaan kiinnittynyt monissa tapauksissa painavia metalliosia, mikä lisää luonnollisesti massaperusteisesti epäpuhtaiden partikkeleiden merkittävyyttä. Paino on kuitenkin loppupeleissä paljon merkittävämpi mittari tuotannon kannalta kuin yksittäisten kappaleiden lukumäärä, sillä jalostettujen metallifraktioiden hinta muodostuu painon perusteella. Tästä voidaan kuitenkin päätellä, että pienemmät kappaleet ovat todennäköisesti puhtaampia ferromagneetteja kuin isot partikkelit. Jos ideaa jalostaa pidemmälle, niin tehokkaammalla murskauksella tai pienemmällä rostikoolla saataisiin irtautumisastetta kasvatettua.

## 7 Johtopäätökset

Seulontakokeiden perusteella voidaan todeta, että metallien rikastuminen pienempään kokoluokkaan on hieman yleisempää kuin karkeaan kokoluokkaan. Tarkemmin sanottuna 42 % kaikkien koeajojen alkuainepitoisuuksista on korkeampi karkeammassa kokoluokassa, mutta kaikkien virhelähteiden valossa ero jää lähes merkityksettömäksi. Analyysitulokset olivat metalleista ja koeajoista riippuen hyvin vaihtelevia, eikä mitään selkeätä rikastumistrendiä ollut havaittavissa edes käytettäessä tylsiä teriä murskauksessa. Ainoastaan kuparin havaittiin suosivan kaikissa tapauksissa karkeaa kokoluokkaa. Sen lisäksi alumiinin, kromin, lyijyn ja tinan pitoisuudet olivat enimmäkseen korkeammat seulonnan ylitteessä. Toisaalta jalometallien havaittiin rikastuvan hieman enemmän hienompaan fraktiokokoon, kuten Sun et al. kokeissa (2015) myös havaittiin. Kun trendittömän ja satunnaisesti vaihtelevien tulosten lisäksi otetaan huomioon hienon partikkelikoon 10 % painosuus seulan ylitteeseen nähden, ei ole perusteltua käyttää minkäänlaisia seuloja osana jokapäiväistä tuotantoa.

Murskauksessa vapautuneita pölyjä otettiin talteen teollisuusimurilla sekä pyöröleikkurin pohjalta, ja niistä tehdyt analyysitulokset paljastavat yksiselitteisesti, että pölyihin rikastuu jalometalleja. Lisäksi hieman merkityksettömät mangaani, nikkeli, lyijy ja tina rikastuvat pölyihin, kun taas kuparin, alumiinin ja kromin pitoisuudet ovat matalammat pölyissä kuin murskeessa. Yllättäen tylsistä teristä johtuva pölynmuodostus ja metallien rikastuminen ei eronnut merkittävästi terävien terien koeajoista.

Tämän diplomityön pölytulosten pohjalta voin todeta, että kannattaa tutkia ja etsiä vaihtoehtoisia käsittely- ja myyntikanavia jalometallirikkaalle murskauspölylle. Tällä hetkellä kerätyt pölyt yhdistetään lopuksi kuparisulatolle lähtevään erään, mikä tuntuu insinöörimäisestä näkökulmasta resurssitehottomalta toimintatavalta. Jos kerran tuotannosta onnistutaan erottamaan jalometallirikas pöly, sen palauttaminen takaisin lopputuotteeseen tuntuu harkitsemattomalta. Näin tietysti saadaan ainakin näennäisesti rikastuneista jalometalleista jokin arvo takaisin, mutta todennäköisesti jalometallirikas pöly vain laimenee ja käytännössä katoaa myytävään erään. Lisäksi pölyjen kuparipitoisuus on todella matala, joten kuparisulatto ei ole tästä näkökulmasta välttämättä edes paras myyntikohde kyseiselle pölylle. Yksi vaihtoehto voisi olla yksinkertainen jatkorikastus sekä mahdollisesti yrityksen oma liuotusprosessi. Näiden tulosten perusteella on ainakin selvää, että murskauksen imujärjestelmää, kapasiteettia ja talteenottoa kannattaa kehittää ja parantaa.

Jakeiden massat jakautuivat eri fraktioihin odotusten mukaisesti. Piirilevyjen tärkein metalli, kupari, saatiin melko hyvällä prosenttiosuudella talteen pyörrevirtaerottimen

droppiin, ja sitä erottui muihin jakeisiin niukasti. Alumiinin tulokset olivat taas melko heikot. Vaikka alumiini pitäisi erottua pyörrevirtaerottimen tuotteeseen, iso osa siitä kulkeutui silti pyörrevirtaerottimen droppiin. Onnettomin tulos saatiin HIGH-kortin tapauksessa, mikä todistaa, ettei pyörrevirtaerotin sovi osaksi HIGH-kortin käsittelyprosessia. LOW-kortin tilanne on parempi, ja fraktioiden visuaalinen tarkastelu tukee alumiinin talteenottoa ja siten pyörrevirtaerottimen käyttämistä osana tuotantoa.

Jalometalleissa havaittiin melko suuret hävikit. Kullan hävikit olivat runsaammat kuin hopealla, minkä lisäksi kultaa päätyi toivottuun lopputuotteeseen pienemmällä osuudella kuin hopeaa. Magneettiseen fraktioon sekä pyörrevirtaerottimen tuotteeseen erottui jalometalleja kuitenkin melko vähän. Terien tylsistymisellä ei havaittu juurikaan eroa hävikin muodostumisessa. Koska hopean saanti oli parempi kuin kullan, pitäisi prosessissa keskittyä ennen kaikkea kullan mahdollisiin hävikkikohteisiin ja pyrkiä niiden minimointiin. Esimerkiksi murskaus ja fraktioiden erottelu pitäisi tehdä mahdollisimman suljetussa prosessissa niin, että pölyyntymistä ja partikkelien kulkeutumista prosessin ulkopuolelle tapahtuisi mahdollisimman vähän.

Ferromagneettisesta fraktiosta laskettuja irtautumisastetuloksia voidaan pitää heikkoina tai parhaimmillaan tyydyttävänä. LOW-kortissa saatiin paremmat irtautumisasteet ja tylsät terät laskivat odotetusti hieman irtautumisastetta. Mitä pienikokoisempi ferromagneetti on, sitä todennäköisemmin se oli puhdas. HIGH-kortin tapauksessa voidaan jopa kyseenalaistaa magneetin tarpeellisuus, kun huomioidaan raudan tai teräksen matala hinta verrattuna esimerkiksi kupariin, alumiiniin tai jopa jalometalleihin. Jos magneettiseen fraktioon hukataan arvokkaita metalleja, ne ovat pois lopputuotteesta, mutta ne eivät myöskään kasvata magneettisen fraktion arvoa, joka myytäisiin halpana teräksenä tai rautana. Toisaalta pyörrevirtaerottimen dropissa raudan arvo myös menetetään, mutta muita arvokkaita metalleja ei ole silloin hukkunut magneettisen erotuksen myötä. Näiden tutkimustulosten pohjalta ei pystytä vielä sanomaan, kannattaako HIGH-kortin prosessoinnissa pitää magneettia päällä, mutta mitä korkeammat irtautumisasteet saadaan, sen perustellumpaa on käyttää magneettista erotinta osana prosessia.

Lopuksi vielä tiivistettynä piirilevyjen prosessoinnin parannusehdotukset: Huolellisemmalla murskaamisella saadaan pienennettyä kappalekokoa ja parannettua partikkelien irtautumisastetta toisistaan, jolloin erotusprosesseissa saataisiin puhtaampia ja mahdollisesti suoraan myyntikuntoisia jakeita. Tämä johtaa luonnollisesti runsaampaan pölyjen muodostumiseen murskauksen yhteydessä, mutta jalometallirikkaan pölyn jatkorikastus, erilliset myyntikanavat tai yrityksen sisäinen liuotusprosessi tekisivät siitä toivottavaa liiketoimintaa. Samalla koko prosessin jalometallihävikkejä voitaisiin pienentää tiiviillä käsittelylinjalla niin, että myös

prosessin aikana pölyyntyvät partikkelit otettaisiin talteen osaksi samaa pölyliiketoimintaan. Terien tylsistymisellä ei ole näkyviä vaikutuksia piirilevyjen murskaantumiseen eikä erotettuihin jakeisiin, joten teriä kannattaa vaihtaa vasta, kun se on tuotannollisesti järkevää. Mursketta ei ole perusteltua jakaa seulalla hienoon sekä karkeaan fraktioon, ja pyörrevirtaerotinta ei kannata käyttää osana HIGH-kortin prosessointia.

## 8 Yhteenveto

Sähkö- ja elektroniikkaromu on erityisen mielenkiintoinen ja haluttu kierrätystuote, sillä se sisältää kirjavan joukon arvokkaita metalleja kuparista jalometalleihin, joiden tarve on kasvanut lähiaikoina huomattavasti. Toisaalta liiketoiminnan kannalta arvostetut metallit löytyvät usein siroteltuna monimutkaisista komponenteista ja osista, joista löydetään myös ihmisille ja ympäristölle haitallisia materiaaleja. Resurssitehokkaan ja materiaalikeskeisen SER:n kierrätys ei ole vain nykyhetken trendikysymys, vaan kyseessä on kestävä kehitys tukeva miljardiliiketoiminta, jota täytyy tukea kauaskantoisilla innovaatioilla, teknisellä huippututkimuksella, kaupallistetuilla prosessiparannuksilla sekä poikkitieteellisillä ajatushautomoilla. Tämä diplomityö yrittää osallistua edes symbolisesti kyseiseen kilpailukyvyyn vahvistamiseen.

Tällä hetkellä kiinnostavin tutkimuskohde sähkö- ja elektroniikkaromun piiristä on erilaiset piirikortit, jotka on myös valittu diplomityön kierrätystuotteeksi. Piirikortti on elektroniikkateollisuuden elintärkeä elementti, joka yhdistää komponentit sähköisesti toisiinsa ilman erillisiä johtimia sekä tukee systeemiä mekaanisena kiinnitysalustana. Piirikortit sisältävät heterogeenisen joukon erilaisia metalleja (n. 28 painoprosenttia), muoveja (n. 23 painoprosenttia) sekä keraameja että lasimateriaaleja. Koska kupari toimii piirilevyn sähkönsiirtäjänä, se on yleisin piirikorteista löytyvä metalli (n. 10-20 % piirikorttien painosta). Jalometallit esiintyvät alkuainemuodossaan kytköksissä muihin metalleihin, mikä tekee niiden vapauttamisesta monimutkaista. Piirikorttien kierrättämisen päätavoite on metallien maksimaalinen talteenotto ja täten arvon tuottaminen. Suurin taloudellinen ongelma piilee yksinkertaisesti siinä, että piirikorttien kierrätys on osittain puutteellista, jolloin hintavia metalleja päätyy murskaus- ja erotusprosessien kombinaation myötä väärin fraktioihin tai häviää pahimmillaan pölyihin.

Resurssitehokkaassa piirilevyjen käsittelyssä ei ole vain kaupallisia intressejä, sillä niin sanottu WEEE-direktiivi asettaa EU-maille tavoitteita sähkö- ja elektroniikkaromun ennaltaehkäisyyn sekä tehokkaampaan romun hyötykäyttöön. Piirikorttien kierrätysliiketoimintaa ohjaa myös RoHS-direktiivi, jonka tarkoitus on rajoittaa tiettyjen vaarallisten aineiden käyttöä sähkö- ja elektroniikkalaitteissa.

Piirilevyjen kierrätyksessä ja tässä diplomityössä sovelletaan muutamia tyypillisiä yksikköprosesseja: manuaalinen erottelu ja purku, leikkaava murskaus, magneettinen erotin ja pyörrevirtaerotin. Diplomityön kokeellisen osion korkearvoiset piirikortit ovat usein lähtöisin tietokoneista ja sähkökaapeista ja matala-arvoiset piirikortit saadaan usein purkamalla kuvaputkitelevisioita. Purkaminen toteutetaan työntekijän arvion ja kiinnitysmekanismien perusteella erilaisilla työkaluilla porakoneesta vasaraan. Pyöröleikkuri koostuu kahdesta tai neljästä akselist, joihin on kiinnitetty



vastakkaisiin suuntiin pyörivät teräshampailla varustetut kiekot. Juuri pyöröleikkurin leikkaavat voimat ovat tehneet siitä käytetyimmän murskaintyyppin piirilevyjen murskauksessa, minkä takia kyseinen murskaintyyppi on valittu diplomityöhön.

Murskevirran yläpuolelle asetettava hihnamagneetti on yleisin magneettinen erotteluprosessi, ja kyseistä mallia käytetään myös tämän diplomityön kokeellisessa osiossa. Magneettinen hihna nappaa ferromagneettiset partikkelit murskevirran yläpuolelle ja kuljettaa ne omaa hihnaa pitkin, kunnes magneettisen vuon vaikutus lakkaa ja ne putoavat keräysastiaan. Toisin kuin perinteinen magneettinen erotin, pyörrevirtaerotin mahdollistaa ei-ferromagneettisen metallin erottamisen muusta materiaalivirrasta ferromagneettisen fraktion lisäksi. Polaarisuutta vaihteleva roottori luo voimakkaan ja jatkuvasti muuttuvan magneettivuon, mikä indusoi ei-ferromagneettiseen metalliin puolestaan oman magneettikentän. Kappaleen ja roottorin magneettikentät ovat samannapaiset, mikä johtaa hylkimisvoimaan ja metallin sinkoutumiseen liukuhihnan loppupäästä.

Taloudellisen kannattavuuden ja mahdollisimman mutkattoman metallurgisen jatkokäsittelyn kannalta on välttämätöntä saada yllä mainittujen murskaus- ja erottelumekanismien lopputuotteena mahdollisimman puhtaita fraktioita. Kuitenkin kierrätyksen haastavan luonteen vuoksi täysin puhtaita jakeita ja 100 % materiaalisaantia on käytännössä mahdotonta saavuttaa. Tyypillisesti murskausvaiheessa eri materiaaleista koostuvan komponentin osat eivät irtoa perusteellisesti toisistaan ja kulkeutuvat erotteluvaiheessa hallitsevimman materiaalin mukana.

Piirikortit koostuvat lukemattomista osista, komponenteista ja kappaleista, jotka ovat tavalla tai toisella kiinni toisissaan. Osat voidaan esimerkiksi hitsata, juottaa, ruuvata, pultata, niitata, liimata ja kiinnittää kemiallisesti toisiinsa. Pulttaus- ja niittausliitokset on melko helppo murtaa, mikä johtaa korkeaan irtautumisasteeseen. Liimauksen, juotoksen ja vaahtomuoviliitoksen rikkominen on kohtalaisen mutkatonta, mutta pinnoitettuja tai maalattuja kappaleita on todella haastavaa irrottaa toisistaan.

Piirikorttien murskauksen yhteydessä on yleisesti havaittu korkeaa irtautumisastetta, mutta kaikissa tapauksissa partikkelikoot ovat olleet huomattavasti pienempiä kuin Kuusakosken tyypillisessä tuotannossa. Tyypillisesti parempaan puhtaaksijauhausasteeseen pääsee niin mineraaliteknologiassa kuin kierrätyksessä perusteellisemmalla murskaamisella. Esimerkiksi Guo et al. kokeissa (2011) huomattiin, että metalliset sekä ei-metalliset osat irtautuivat murskausten avulla toisistaan lähes täydellisesti alle 0,6 mm partikkelikoossa. Wen et al. tutkimuksen (2005) mukaan irtautumisasteen kannalta optimaalinen partikkelikokoko piirilevyjen murskauksessa löytyy 0,5 mm kokoluokasta. Ogunniyin et al. työssä (2009) puolestaan  $-75+38\ \mu\text{m}$

kokoluokassa puhtaaksijauhatustasteeksi havaittiin peräti 99,48 %. Murugan et al. tutkimuksessa (2008) 6 mm partikkelikoossa ferromagneettiset ja kuparipartikkelit olivat täysin irtautuneita omiksi elementeikseen. Vidyadhar et al. puolestaan kirjoittivat raportissaan (2012), että alle 150 µm partikkelikoossa piirikorttien murskeessa kaikki metallien ja ei-metallisten osien liitokset oli saatu rikottua. Castro et al. tutkimuksessa (2005) suositeltiin murskaamaan piirikortit 0,15–0,59 mm partikkelikokoon, jotta metallien ja ei-metallisten partikkelin irtautumisaste ja erotusprosessit olisivat mahdollisen tehokkaita.

On kuitenkin huomattava, että perinpohjainen kierrätysvirtojen hienontaminen nostaa tuotanto-, energia- ja työkustannuksia, eikä se silti takaa kaikkien materiaaliosien irtautumista toisistaan. Lisäksi perusteellisempi murskaaminen edistää partikkelien plastista muodonmuutosta, mikä voi johtaa jo irtautuneiden materiaalien uudelleentakertumiseen toisiinsa kompleksisiksi komponenteiksi. Pienempi kappalekoko lisää myös partikkelien ominaispinta-alaa, joka kytkeytyy reaktiivisten metallien, kuten alumiinin ja magnesiumin, ylimääräisiin hapettumisesta johtuviin häviöihin. Suurin huoli liittyy kuitenkin runsaslukuisempaan pölypartikkelien muodostumiseen, ja sitä kautta kasvaviin hävikkilukuihin.

Murskauspölyihin pelätään myös hukattavan arvokkaita metalleja. Wang et al. tutkimuksessa (2015) piirilevyjen murskauskokeissa pölyihin oli rikastunut seuraavia metalleja: Au, Al, Fe, Cu, Pb, Mn ja Zn. Yamane et al. tutkimuksessa (2011) havaittiin jopa 25 painoprosentin materiaalihävikki emolevypiirikorteille ja 29 painoprosentin materiaalihävikki matkapuhelinten piirikorteille, ja tutkijat arvelevat murskauksen yhteydessä pienten partikkeleiden pölyävän ja siten aiheuttavan materiaalihävikkiä. Chancerel et al. työssä (2009) jopa 5 painoprosenttia koko sähkö- ja elektroniikkaromun palladiumista oli rikastunut murskauspölyihin, sillä palladiumia käytetään jonkun verran piirikorttien keraamiosissa, jolloin murskauksen yhteydessä myös palladiumpartikkelit hajoavat pölyiksi keraamin mukana.

Diplomityön koeajot suoritettiin Kuusakosken toimipisteellä Espoossa ja näytteet analysoitiin Kuusakosken Lahden tutkimus- ja kehityskeskuksessa. Koeajoissa ajettiin kahta piirikorttilaataa, matala-arvoista kuvaputkinäytön piirikorttia (eng. cathode ray tube display, CRT) ja korkea-arvoista emolevypiirikorttia (eng. motherboard). Espoon koeajoissa käytettiin tyypillistä ja yksinkertaista sähkö- ja elektroniikkaromun prosessointilinjaa, joka koostuu pyöröleikkurista, magneettisesta erottimesta sekä pyörrevirtaerottimesta.

Laboratoriossa näytteet seulotaan ja saadut näytteet jaetaan jakolaitteella, jotta sulatukseen päätyvä jae edustaisi koko näytettä mahdollisimman hyvin. Pyriittisulatuksessa näytteen materiaalisäällön pitäisi sekoittua ja jakaantua

mahdollisimman tasaisesti ja lisäksi orgaanisten yhdisteiden pitäisi palaa korkeassa lämpötilassa. Jäähdyntynyt näyte murskataan sekä jaetaan muutamia kertoja, jotta lopullinen näyte liukenesi happoihin mahdollisimman helposti ja ICP-analyysistä saatu tulos olisi mahdollisimman edustava.

Seulontakokeiden perusteella voidaan todeta, että metallien rikastuminen pienempään kokoluokkaan on hieman yleisempää kuin karkeaan kokoluokkaan, mutta kaikkien virhelähteiden valossa ero jää lähes merkityksettömäksi. Analyysitulokset olivat metalleista ja koeajoista riippuen hyvin vaihtelevia, eikä mitään selkeää rikastumistrendiä ollut havaittavissa edes käytettäessä tylsiä teriä murskauksessa. Ainoastaan kuparin havaittiin suosivan kaikissa tapauksissa karkeaa kokoluokkaa. Sen lisäksi alumiinin, kromin, lyijyn ja tinan pitoisuudet olivat enimmäkseen korkeammat seulonnan ylitteessä. Toisaalta jalometallien havaittiin rikastuvan hieman enemmän hienompaan fraktiokokoon, kuten Sun et al. kokeissakin (2015) havaittiin. Kun trendittömän ja satunnaisesti vaihtelevien tulosten lisäksi otetaan huomioon hienon partikkelikoon 10 % paino-osuus seulan ylitteeseen nähden, ei ole perusteltua käyttää minkäänlaisia seuloja osana jokapäiväistä tuotantoa.

Murskauksessa vapautuneita pölyjä otettiin talteen teollisuusimurilla sekä pyöröleikkurin pohjalta, ja niistä tehdyt analyysitulokset paljastavat yksiselitteisesti, että pölyihin rikastuu jalometalleja. Lisäksi hieman merkityksettömät mangaani, nikkeli, lyijy ja tina rikastuvat pölyihin, kun taas kuparin, alumiinin ja kromin pitoisuudet ovat matalammat pölyissä kuin murskeessa. Yllättäen tylsistä teristä johtuva pölynmuodostus ja metallien rikastuminen ei eronnut merkittävästi terävien terien koeajoista.

Jakeiden massat jakautuivat eri fraktioihin odotusten mukaisesti. Piirilevyjen tärkein metalli, kupari, saatiin melko hyvällä prosenttiosuudella talteen pyörrevirtaerottimen droppiin, ja sitä erottui muihin jakeisiin niukasti. Alumiinin tulokset olivat taas melko heikot, mutta niissä oli todennäköisesti suuremmat virhe-arvot. Heikoin tulos saatiin HIGH-kortin tapauksessa, mikä todistaa, ettei pyörrevirtaerotin sovi osaksi HIGH-kortin käsittelyprosessia. Tämä tulos tukeekin Kuusakosken nykyistä HIGH-kortin prosessointimenetelmää. LOW-kortin tilanteessa puolestaan pyörrevirtaerottimen käyttäminen ja alumiinin talteenotto osana tuotantoa on suositeltavaa.

Jalometallien taseissa havaittiin melko suuret hävikit. Kullan hävikit olivat runsaammat kuin hopealla, minkä lisäksi kultaa päätyi toivottuun lopputuotteeseen pienemmällä osuudella kuin hopeaa. Magneettiseen fraktioon sekä pyörrevirtaerottimen tuotteeseen erottui jalometalleja kuitenkin melko vähän. Terien tylsistymisellä ei havaittu juurikaan eroa hävikin muodostumisessa.

Ferromagneettisesta fraktiosta laskettuja irtautumisastetuloja voidaan pitää melko heikkoina. LOW-kortissa saatiin paremmat irtautumisasteet ja tylsät terät laskivat odotetusti hieman irtautumisastetta. Mitä pienikokoisempi ferromagneetti on, sitä todennäköisemmin se oli puhdas. HIGH-kortin tapauksessa voidaan jopa kyseenalaistaa magneetin tarpeellisuus, kun huomioidaan raudan tai teräksen matala hinta verrattuna esimerkiksi kupariin, alumiiniin tai jopa jalometalleihin. Näiden tutkimustulosten pohjalta ei pystytä vielä sanomaan, kannattaako HIGH-kortin prosessoinnissa pitää magneettia päällä, mutta mitä korkeammat irtautumisasteet saadaan, sen perustellumpaa on käyttää magneettista erotinta osana prosessia.

## 9 Jatkotutkimuskohteita ja ehdotuksia

Huolellisemmalla murskaamisella saadaan pienennettyä kappalekokoa ja parannettua partikkelien irtautumisastetta toisistaan, jolloin erotusprosesseissa saataisiin puhtaampia ja mahdollisesti suoraan myyntikuntoisia jakeita. Tämä johtaa luonnollisesti runsaampaan pölyjen muodostumiseen murskauksen yhteydessä, mutta jalometallirikkaan pölyn jatkorikastus, erilliset myyntikanavat tai yrityksen sisäinen liuotusprosessi tekisivät siitä toivottavaa liiketoimintaa. Tällä hetkellä kerätyt pölyt yhdistetään lopuksi kuparisulatolle lähtevään erään, jolloin rikastuneista jalometalleista saadaan näennäisesti jokin arvo takaisin, mutta todennäköisesti jalometallirikas pöly vain laimenee ja käytännössä katoaa myytävään erään. Lisäksi pölyjen kuparipitoisuus on todella matala, joten kuparisulatto ei ole tästä näkökulmasta välttämättä edes paras myyntikohde kyseiselle pölylle.

Koko prosessin jalometallihävikkejä voitaisiin pienentää tiiviillä käsittelylinjalla niin, että myös prosessin aikana pölyntyvät partikkelit otettaisiin talteen osaksi samaa pölyliiketoimintaan. Tulosten perusteella on ainakin selvää, että murskauksen imujärjestelmää, kapasiteettia ja talteenottoa kannattaa kehittää ja parantaa. Terien tylsistymisellä ei ole näkyviä vaikutuksia piirilevyjen murskaantumiseen eikä erotettuihin jakeisiin, joten teriä kannattaa vaihtaa vasta, kun se on tuotannollisesti järkevää. Mursketta ei ole perusteltua jakaa seulalla hienoon sekä karkeaan fraktioon, ja pyörrevirtaerotinta ei kannata käyttää osana HIGH-kortin prosessointia.

## 10 Lähdeluettelo

2011/65/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 8.6.2011 tiettyjen vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa. [Viitattu: 2.10.2015]

Saatavilla: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:174:0088:0110:FI:PDF>

2012/19/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 4.7.2012 sähkö- ja elektroniikkaromusta. [Viitattu: 2.10.2015] Saatavilla: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&qid=1403604619895&from=FI>

Castro, M.B.; Remmerswaal, J.A.M.; Brezet, J.C.; van Schaik, A. & Reuter, M.A. 2005. A simulation model of the comminution–liberation of recycling streams: Relationships between product design and the liberation of materials during recycling. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 75:3–4. S. 255-281. DOI: 10.1016/j.minpro.2004.09.001. ISSN: 0301-7516.

Chancerel, P.; Meskers, C.M.M.; Hagelücken, C. & Rotter, V.S. 2009. Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment. *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 13:5. S. 791-810. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2009.00171.x. ISSN: 1088-1980.

Cui, J. & Forssberg, E. 2007. Characterization of shredded television scrap and implications for materials recovery. *Waste Management*. Vol. 27:3. S. 415-424. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.02.003. ISSN: 0956-053X.

Dalrymple, I.; Wright, N.; Kellner, R.; Bains, N.; Geraghty, K.; Goosey, M. & Lightfoot, L. 2007. An integrated approach to electronic waste (WEEE) recycling. *Circuit World*, Vol. 33:2. S. 52 – 58. DOI: 10.1108/03056120710750256.

Danska, M. 2012. Laajennettu tuottajavastuu kierrätysyhteiskunnan edistäjänä. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Kemian tekniikan korkeakoulu. Espoo. 114 s.

Deng, J.; Guo, J.; Zhou, X.; Zhou, P.; Fu, X.; Zhang, W. & Lin, K. 2014. Hazardous substances in indoor dust emitted from waste TV recycling facility. *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. 21:12 S. 7656-7667. DOI: 10.1007/s11356-014-2662-9

Dig PCB. <http://www.digpcb.com/pcb-material-technical/fr1-cem1-and-fr4.html> [Viitattu 17.9.2015]

Directindustry. <http://pdf.directindustry.com/pdf/regulator-cetrisa/separation-iron-metals-permanent-magnetic-overbelt/59273-95924.html> [Viitattu 20.10.2015]



Duan, H.; Hou, K.; Li, J. & Zhu, X. 2011. Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental concerns. *Journal of Environmental Management*. Vol. 92. S. 392-399. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.10.057.

Duan, C.L.; Zhao, Y.M.; He, Y.Q.; He, J.F. & Wang, S. 2010. Research on Fractal Mechanism of the Crushed Particle of Waste Printed Circuit Board. *Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE), 2010 4th International Conference*. S. 1-4. DOI: 10.1109/ICBBE.2010.5516753. ISSN: 2151-7614.

Eswaraiah, C. & Soni, R.K. 2015. Milling and Classification of Printed Circuit Boards for Material Recycling. *Particulate Science and Technology: An International Journal*. DOI: 10.1080/02726351.2015.1020179.

Eurostat. 2013. Environmental Data Centre on Waste. [Viitattu 2.10.2015] Saatavilla: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/waste/key-waste-streams/weee>

Ghosh, B.; Ghosh, M.K.; Parhi, P.; Mukherjee, P.S. & Mishra, B.K. 2015. Waste Printed Circuit Boards recycling: an extensive assessment of current status. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 94. S. 5-19., DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.024. ISSN: 0959-6526.

Goodship, V. & Stevels, A. 2012. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook. Woodhead Publishing Limited. 752 s. ISBN: 978-0-85709-633-3, ISSN: 2050-151X.

Guo, C.; Hui, W.; Wei, L.; Jiangang, F. & Xin, Y. 2011. Liberation characteristic and physical separation of printed circuit board (PCB). *Waste Management*. Vol. 31. S. 2161–2166. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.05.011. ISSN: 0956-053X.

Hadi, P.; Xu, M.; Lin, C.S.K.; Hui, C.W. & McKay, G. 2015. Waste printed circuit board recycling techniques and product utilization. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 283:11. S. 234-243. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.09.032. ISSN: 0304-3894.

Hester, R.E. & Harrison R.M. 2009. *Electronic Waste Management, Design, Analysis and Application. Issues in Environmental Science and Technology*. Vol. 27. Cambridge: The Royal Society of Chemistry. 263 s. ISBN 978-0-85404-112-1, ISSN: 1350-7583.

Hou, S.; He, Y.; Yang, D. & Xu, Z.; 2013. An impact crushing dynamic model of waste printed circuit board particles. *Research on Chemical Intermediates*. Vol. 39:8. S. 3611-3630. DOI: 10.1007/s11164-012-0866-5. ISSN: 0922-6168.

Ignatius, S.; Myllymaa, T. & Dahlbo H. 2009. Sähkö- ja elektroniikkaromun käsittely Suomessa. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. 57 s. ISSN: 1796-1726.

Kang, H. & Schoenung, J.M. 2005. Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 45:4. S. 368-400, DOI: 10.1016/j.resconrec.2005.06.001. ISSN: 0921-3449.

Kolias, K.; Hahladakis, J.N. & Gidakos, E. 2014. Assessment of toxic metals in waste personal computers. *Waste Management*. Vol. 34. S. 1480–1487. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.04.020.

Kuusakoski Oy. Kuvapankki.

Li, J.; Shrivastava, P.; Gao, Z. & Zhang, H.C. 2004. Printed circuit board recycling: A state-of-the-art survey. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*. Vol. 27:1. S. 33-42. DOI: 10.1109/TEPM.2004.830501

Malin, T. 2015. *Plastics from WEEE dismantling*. Kuusakoski Oy.

Meinander, M.; Mroueh, U.; Bacher, J.; Laine-Ylijoki, J.; Wahlström, M.; Jermakka, J.; Nina Teirasvuo, Kuosa, H.; Törn, M.; Laaksonen, J.; Heiskanen, J.; Kaila, J.; Vanhanen, H.; Dahlbo, H.; Saramäki, K.; Jouttijärvi, T.; Mattila, T.; Retkin, R.; Suoheimo, P.; Lähtinen, K.; Sironen, S.; Sorvari, J.; Myllymaa, T.; Havukainen, J.; Horttanainen, M. & Luoranen, M. 2012. *Directions of future developments in waste recycling*, Espoo: VTT Technology 60. 86 s. Saatavilla: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2012/T60.pdf>

Menad, N.; Guignot, S. & van Houwelingen, J. A. 2013. New characterisation method of electrical and electronic equipment wastes (WEEE). *Waste Management*. Vol. 33:3. S. 706-713. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.04.007. ISSN: 0956-053X.

Murugan, R.V.; Bharat, S.; Deshpande, A.P.; Varughese, S. & Haridoss, P. 2008. Milling and separation of the multi-component printed circuit board materials and the analysis of elutriation based on a single particle model. *Powder Technology*. Vol. 183:2. S. 169–176. DOI: 10.1016/j.powtec.2007.07.020. ISSN: 0032-5910.

Nijkerk, A.A. 1996. *Handbook of Recycling Techniques*. 3. painos. Alankomaat: Nijkerk Consultancy. 172 s. ISBN: 90-802909-1-2.

Ogunniyi, I.O.; Vermaak, M.K.G. & Groot, D.R. 2009. Chemical composition and liberation characterization of printed circuit board comminution fines for beneficiation investigations. *Waste Management*. Vol. 29:7. S. 2140-2146. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.03.004. ISSN 0956-053X.

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

Prismark. 2012. Printed Circuit Report.  
[http://www.prismark.com/what\\_publications\\_pcr.php](http://www.prismark.com/what_publications_pcr.php). [Viitattu 15.9.2015]

Quan, C.; Li, A. & Gao, N. 2012. Study on characteristics of printed circuit board liberation and its crushed products. Waste Management & Research. Vol. 30:11 S. 1178-1186. DOI: 10.1177/0734242X12457119.

RECDEV Project. <http://www.recdev.eu/en-us/abouttheproject.aspx> [Viitattu 28.10.2015]

Rem, P.C.; Leest, P.A. & Van den Akker, A.J. 1997. A model for eddy current separation. International journal of mineral processing. Vol 49:3. S. 193-200. DOI: 10.1016/S0301-7516(96)00045-2.

Reuter, M.A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C. & Hagelüken, C. 2013. UNEP Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International. United Nations Environment Programme. 320 s. ISBN: 978-92-807-3267-2.

Rumpke Recycling. <http://rumpke.com/recycling/>. [Viitattu 26.10.2015]

Song, Q.; Zeng, X.; Li, J.; Duan, H. & Yuan, W. 2015. Environmental risk assessment of CRT and PCB workshops in a mobile e-waste recycling plant. Environmental Science and Pollution Research. Vol. 22:16. S. 12366-12373. DOI: 10.1007/s11356-015-4350-9. ISSN: 1614-7499.

Sun, Z.H.I.; Xiao, Y.; Sietsma, J.; Agterhuis, H.; Visser, G. & Yang, Y. Characterisation of metals in the electronic waste of complex mixtures of end-of-life ICT products for development of cleaner recovery technology. Waste Management. Vol. 35. S. 227-235., DOI: 10.1016/j.wasman.2014.09.021. ISSN: 0956-053X.

Tukiainen, M. 2015. Yhdyskuntajätteen mekaanisen erottelun erotustehokkuus. Diplomityö. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta. 114 s.

Untha shredding technology.  
[http://www.untha.com/files/pdf/produkte/englisch/recycling/rs50-100\\_industrial-shredder\\_en\\_8seitig.pdf](http://www.untha.com/files/pdf/produkte/englisch/recycling/rs50-100_industrial-shredder_en_8seitig.pdf). [Viitattu 2.7.2015]

van Schaik, A. & Reuter, M. A. 2010. Dynamic modelling of E-waste recycling system performance based on product design. Minerals Engineering. Vol. 23:3. S. 192-210. DOI: 10.1016/j.mineng.2009.09.004. ISSN: 0892-6875.

Veit, H.M.; Diehl, T.R.; Salami, A.P.; Rodrigues, J.S.; Bernardes, A.M. & Tenório, J.A.S. 2005. Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap. *Waste Management* Vol. 25. S. 67–74. DOI: 10.1016/j.wasman.2004.09.009.

Vidyadhar, A. & Das, A. 2012. Kinetics and efficacy of froth flotation for the recovery of metal values from pulverized printed circuit boards. 26th International Mineral Processing Congress, IMPC 2012: Innovative Processing for Sustainable Growth - Conference Proceedings. S. 236-243.

Wang, H.; Gu, G.H. & Qi, Y.F. 2005. Crushing performance and resource characteristic of printed circuit board scrap. *Journal of Central South University of Technology*. Vol. 12:5. S. 552-555. DOI: 10.1007/s11771-005-0121-y. ISSN: 1993-0666.

Wang, F.; Zhao, Y.; Zhang, T.; Duan, C. & Wang, L. 2015. Mineralogical analysis of dust collected from typical recycling line of waste printed circuit boards. *Waste Management*. Vol 43. S. 434-441. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.06.021. ISSN: 0956-053X.

Wen, X.; Zhao, Y.; Duan, C.; Zhou, X.; Jiao, H. & Song, S. 2005. Study on metals recovery from discarded printed circuit boards by physical methods. *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*. 16-19.5.2005 S. 121-128. DOI: 10.1109/ISEE.2005.1437005

Yamane, L.H.; Moraes, V.T.; Espinosa, D.C.R. & Tenório, J.A.S. 2011. Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Management*. Vol. 31:12. S. 2553–2558. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.07.006. ISSN: ISSN 0956-053X.

Yazici, E.Y.; Deveci, H. Yazici, R. & Akcil, A. 2015. Base and Precious Metal Losses in Magnetic Separation of Waste Printed Circuit Boards. *Proceedings of EMC 2015*. ISBN: 978-3-940276-63-6.

Ylä-Mella, J.; Poikela, K.; Lehtinen, U.; Tanskanen, P.; Román, E.; Keiski R. L. & Pongrácz, E. 2014a. Overview of the WEEE Directive and Its Implementation in the Nordic Countries: National Realisations and Best Practices. *Journal of Waste Management*. Vol. 2014. 18 s. DOI: 10.1155/2014/457372

Ylä-Mella, J.; Poikela, K.; Lehtinen, U.; Keiski R. L. & Pongrácz, E. 2014b. Implementation of Waste Electrical and Electronic Equipment Directive in Finland: Evaluation of the collection network and challenges of the effective WEEE management. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 86 S. 38-46, DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.02.001 ISSN: 0921-3449.

Zhang, S. & Forssberg, E. 1999. Intelligent Liberation and classification of electronic scrap. Powder Technology. Vol. 105:1–3. S. 295-301. DOI: 10.1016/S0032-5910(99)00151-5. ISSN: 0032-5910.