

Piirilevyjen kierrätysprosessin simulointi

TURUN YLIOPISTO
Informaatioteknologian laitos
Tietojenkäsittelytiede
Susanna Nevalainen
Helmikuu 2016

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

TURUN YLIOPISTO
Informaatioteknologian laitos

SUSANNA NEVALAINEN

Piirilevyjen kierrätysprosessin simulointi

LuK-tutkielma, 30 s.
Tietojenkäsittelytiede
Helmikuu 2016

Tutkielmassa kuvataan simuloinnin kehittämistä piirilevyjen kierrätysprosessille Outotec Oyj:n HSC Sim -simulaatioalustalla. Simuloinnissa kuvataan Kuusakoski Oy:n Heinolan kierrätyskeskuksessa suoritettua kuvaputkitelevisioiden piirilevyjen todellista kierrätysprosessia. Simulaation pohjana käytettiin Kuusakosken työntekijöiden suorittamaa materiaalivirtausten tutkimusta piirilevyjen kierrätysprosessissa. Tutkielma on osa Tekesin rahoittamaa ARVI-tutkimusohjelmaa, jonka tarkoituksena on kehittää uusia menetelmiä kierrätysprosessien kehitykseen ja hallintaan globaalissa toimintaympäristössä.

Simulaatiossa tarkkailtiin murskattujen piirilevyjen materiaalivirtausten kulkua kierrätysprosessin laitteistossa. Simulaatiossa onnistuttiin mallintamaan realistisesti virtausten kokonaismassojen ja metallien kulkua prosesseissa, mutta ei-metallien ja piirilevyjen pohjaa sisältävien osien osuudet virtauksissa erosivat jonkin verran prosessin loppupuolella kerätyistä näytteistä. Syynä poikkeavuuksiin oli se, että prosessiin syötettyjen materiaalien määrää ja kompositioita ei ollut analysoitu Kuusakosken tutkimuksissa, vaan arvot perustuivat estimaatteihin.

Piirilevyjen kierrätysprosessin simulaatiomalli tarjoaa käyttäjälle mahdollisuuden muokata prosessissa käytettäviä arvoja yksinkertaisessa käyttöliittymässä. Näin simulaatiota voidaan tarkentaa tarpeiden mukaan tulevaisuudessa, kun tarkempia tutkimustuloksia on saatavilla. Piirilevyjen kierrätysprosessin simulaatiomalli toimii myös hyvänä pohjana muiden kierrätysprosessien simuloinnin kehittämiseksi.

Avainsanat: simulointi, kierrätys, SER, piirilevy, HSC Sim, ARVI-tutkimusohjelma

KIITOKSET

Tutkielma on toteutettu yhteistyössä ARVI-tutkimusohjelman kahden suurimman yrityksen, Outotec Oyj:n ja Kuusakoski Oy:n, kanssa.

Outoteciltä haluan kiittää erityisesti teknologiajohtaja Antti Roinetta, joka tarjosi minulle ainutlaatuisen tilaisuuden osallistua tähän projektiin. Lisäksi kierrätyksen erityisasiantuntija Markus Reuter avasi minulle laajalla osaamisellaan moniulotteista kierrätysalaa ja opasti minua lähestymään monimutkaisia kierrätysprosesseja myös matemaattisesta näkökulmasta.

Lämmin kiitos myös Kuusakosken varapääjohtajalle Jyri Taljalle, joka esitteli minulle kierrätyksen ja kierrätyslaitteiden toimintaa käytännössä. Piirilevyjen koeajoihin osallistuneet tutkimus- ja kehitysinsinöörit Sini Eskonniemi ja Leena Tuominen sekä diplomi-työntekijä Tatu Karlström olivat myös tärkeässä roolissa tarjoten arvokasta aineistoa materiaalivirtauksista simuloinnin pohjaksi.

Lisäksi haluan myös kiittää tutkielmani ohjaajaa Lasse Bergrothia, jonka positiivinen asenne ja ymmärtäväisyys kantoivat läpi työn hidasteista huolimatta.

Turussa 16.2.2016

Susanna Nevalainen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. AINEISTO JA MENETELMÄT	4
2.1. KIERRÄTYSPROSESSIN KÄSITTEET	4
2.2. KIERRÄTYSPROSESSIN KOEAJO	6
2.3. SIMULOINTITYÖKALUT	6
3. SIMULOINTI.....	8
3.1. SYÖTE	8
3.2. SEPAROINTI.....	13
3.2.1 <i>Seula</i>	14
3.2.2 <i>Tuuliseula</i>	15
3.2.3 <i>Magneettinen separaattori</i>	16
3.2.4 <i>Pyörrevirtaseparaattori</i>	17
4. TULOKSET	18
4.1. TULOSTEN VERTAILU	18
4.2. TESTAUS	22
5. YHTEENVETO.....	27
LÄHTEET	30

1. JOHDANTO

Nykyisessä kulutusyhteiskunnassamme kulutamme luonnonvaroja niiden uusiutumista nopeammin. Pelkästään yksi ihminen maailmassa kuluttaa tällä hetkellä keskiarvolta noin viisi tonnia materiaaleja vuodessa. Suoraan luonnosta saatavat resurssit eivät enää tulevaisuudessa tule riittämään, ellei resurssitehokkuuteen kiinnitetä enemmän huomiota. Jätteestä onkin tullut suuri globaali ongelma kaatopaikkojen tilan vähentyessä ja lisääntyneen jätteen aiheuttamien ympäristö- ja terveyshaittojen kasvaessa. (Worrell & Reuter 2014, 5.)

Jatkuvasti lisääntyvän sähkö- ja elektroniikkalaitteiden kulutuksen vuoksi yksi nopeimmin kasvavista jätelajeista on sähkö- ja elektroniikkaromu (SER). 1990-luvulta lähtien sähkö- ja elektroniikkalaitteet ovat mullistaneet elämäämme, mutta samaan aikaan sähkö- ja elektroniikkalaitteiden ostosykli on lyhentynyt ja SER:n määrä on lisääntynyt. SER on erityinen jätetyyppi, sillä se sisältää runsaasti arvokkaita metalleja, mutta toisaalta sen ympäristöhaitat ovat myös merkittävät. Vuonna 2014 maailmassa tuotettiin arviolta noin 42 miljoonaa tonnia sähkö- ja elektroniikkaromua, ja sen kasvu vaikuttaa kiihtyvän entisestään tulevaisuudessa. (Baldé et al. 2015, 5, 11.)

Tärkein keino resurssitehokkuuden lisäämiseen on kierrätys. Kierrätys tapahtuu käytännössä lajittelemalla eli separoimalla jäte kierrätysseparaattoreilla ja lopuksi myymällä prosessoitu materiaali jälleen raaka-aineeksi valmistajille. (Worrell & Reuter 2014, 6). Kierrätysprosessit ovat monimutkaisia prosesseja, joissa jätteen ja separaattorien ominaisuudet yhdessä sattuman kanssa vaikuttavat lopulliseen separointitulokseen. Kierrätysprosessien muuttaminen on tavallisesti hidasta ja kallista toteuttaa. Uudistusten kokeilu käytännössä on aina myös riski: Kokeilun epäonnistuessa laitteisto voi vaurioitua ja kierrätystulos heikentyä, jolloin prosessista saadut materiaalit eivät kelpaa enää raaka-aineiksi. Lisäksi kierrätysprosesseissa käsitellään usein myös vaarallisia aineita, joille ei haluta tehdä riskialttiita kokeiluja turvallisuussyistä.

Tietokonesimulaatiolla pystytään kuitenkin edullisesti, nopeasti ja turvallisesti testaamaan erilaisia syöte- ja ominaisuusparametreja sekä erilaisia vaihejärjestyksiä myös

kierrätysprosesseille. Simuloinnin avulla pystytään kehittämään ja optimoimaan todellisia kierrätysprosesseja uudella tavalla tietokoneen avulla. Vaikka kierrätyksellä on jo pitkä historia, SER:n kierrätyskokeilut aloitettiin vasta reilut 20 vuotta sitten (Worrell & Reuter 2014, 397). Matemaattisia malleja kierrätykselle on tutkittu jo useita vuosikymmeniä, mutta konkreettisia työkaluja kierrätysprosessien simulointiin tietokoneella ei toistaiseksi kuitenkaan ole markkinoilla tarjolla (Markus Reuter, suullinen tiedonanto 2015).

Tämän tutkielman tarkoituksena on tarjota konkreettinen työkalu kuvaputkitelevisioiden (CRT, *Cathode Ray Tube TV*) piirilevyjen kierrätysprosessin simulointiin ja toimia samalla pohjana kierrätyssimuloinnin laajemmalle kehitykselle. Erityisesti SER:n kierrätys ei vain ehkäise merkittäviä ympäristöhaittoja vaan myös ottaa uudelleen käyttöön romun sisältämiä arvokkaita materiaaleja. Tutkielma keskittyykin piirilevyjen esimerkitapauksen avulla SER:n kierrätyksen simuloinnin mallintamiseen tarjoamalla samalla kierrätykseen erikoistuneille yrityksille uuden menetelmän kierrätysprosessien testaukseen ja optimointiin.

Simuloinnin kehityksessä on sovellettu ohjelmoinnin ja matematiikan työkaluja kierrätysseparaattorien toiminnan mallintamiseen. Simuloinnissa on otettu myös huomioon kierrätettävän romun fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia. Tämä tutkielma ei kuitenkaan sisällä simuloitavien kierrätyslaitteiden yksityiskohtaisten toimintaperiaatteiden tai koodien kuvauksia vaan pyrkii kuvaamaan kierrätysprosessin separoinnin simulointia kokonaisuutena. Keskeistä työssä ovat piirilevyjen kierrätysprosessin mallintaminen simulointiohjelmalla sekä simuloitujen separaattorien parametrien kalibrointi todellisuutta vastaaviksi. Kierrätyslaitteiden yksityiskohtainen tekninen kuvaus on jätetty työn ulkopuolelle.

Tutkielma on osa Tekesin (Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus) sekä kierrätykseen erikoistuneiden yritysten ja tutkimusorganisaatioiden rahoittamaa ARVI (Materiaalien arvovirrat) -tutkimusohjelmaa. Ohjelman tavoitteena on luoda innovaatioita kierrätyksen materiaalivirtojen hallintaan sekä kasvattaa kierrätyksen liiketoimintamahdollisuuksia globaalissa toimintaympäristössä. Tutkimusohjelmaan osallistuvat suoma-

laisen kierrätysliiketoiminnan keskeisimmät toimijat, joiden nykyisen kahden miljardin liikevaihdon arvioidaan nousevan 12–14 miljardiin euroon vuoteen 2030 mennessä. (CLEEN Oy.) Tämä kandidaatintutkielma on toteutettu yhteistyössä Outotec Oyj:n ja Kuusakoski Oy:n kanssa, jotka toimivat tutkimusohjelman kahtena suurimpana yrityksenä.

Tutkielman toisessa luvussa avataan piirilevyjen kierrätysprosessin keskeisimpiä käsitteitä sekä esitellään tutkimuksessa käytetyt tutkimusmenetelmät ja työkalut. Kolmannessa ja neljännessä luvussa kuvataan varsinaisen simuloinnin kehittämistä ja simulaation tuloksia piirilevyjen kierrätysprosessissa. Viimeisessä luvussa kootaan yhteen piirilevyjen kierrätys- ja simulointi- ja johtopäätöksiä sekä pohditaan simuloinnin jatko- ja yleistämismahdollisuuksia.

2. AINEISTO JA MENETELMÄT

Piirilevyjen simulointimallin kehittämiseen yhdistettiin tutkielmaa tehtäessä niin kirjallisuustutkimuksen, empiirisen tutkimuksen kuin konstruktiivisenkin tutkimuksen elementtejä. Teoreettinen kirjallisuustutkimus keskittyi kierrätyskäsitteiden ymmärtämiseen ensisijaisesti Ernst Worrellin ja Markus Reuterin (2014) *Handbook of Recycling* -kirjan avulla, joka kuuluu tämän päivän merkittävimpiin kierrätysalan teoksiin. Empiiristä tutkimusta toteutettiin Kuusakosken kierrätysprosessin koeajossa ottamalla näytteitä todellisen piirilevyjen kierrätysprosessin ulostuloista yhdessä Kuusakosken työntekijöiden kanssa. Varsinaiseen simulointiin kehittämiseen taas käytettiin konstruktiivista tutkimusta luomalla tiedossa olevien empiirisen tutkimuksen lopputulosten perusteella täysin uusi konstruktio, kierrätysmalli, HSC Sim -simulointialustaa käyttäen.

2.1. Kierrätysprosessin käsitteet

Kierrätyksen tehtävänä on kierrättää jätevirroissa olevien tuotteiden eli syötteen materiaaleja ja palauttaa ne käsittelyn jälkeen raaka-aineiksi valmistajille. Kehittyneemmässä mineraalikeskeisessä lähestymistavassa tutkitaan kierrätettävän tuotteen sisältämien materiaalien lisäksi alkuaineita, yhdisteitä ja seoksia, joista materiaalit koostuvat. (Worrell & Reuter 2014, 11.) Tuotteet siis koostuvat materiaaleista ja materiaalit koostuvat mineraaleista, joiden avulla pystytään määrittämään tarkasti tuotteen rakenne eli kompositio.

Kierrätysprosessi alkaa tavallisesti esilajittelulla, jossa valitaan kierrätysprosessissa käsiteltävä jäte eli syöte. Tämän jälkeen valikoitu jäte paloittellaan murskaimessa, minkä ansiosta jätteen käsittely on prosessin myöhemmissä vaiheissa helpompaa ja tehokkaampaa. Murskauksessa syntyneitä jätteen paloitetuista osia kutsutaan partikkeleiksi. Tavallisesti murskain paloittelee syötettävää romua terissään niin kauan kunnes partikkelit mahtuvat murskaimessa olevan seulan aukkojen lävitse. Seulan aukkojen koko määrittää rostikoon eli sen, kuinka suuria kierrätysprosesseissa käsiteltävät partikkelit ovat. Myös partikkelin muoto määräytyy pääosin murskausvaiheessa. (Talja 2015, 8.)

Kun syöte on murskattu partikkeleiksi, on vuorossa separointi eli partikkelien lajittelu. Separointi tapahtuu separaattoreissa, jotka erottelevat partikkeleita eri ulostuloihin niiden fysikaalisten tai kemiallisten ominaisuuksien perusteella. Tavallisesti kukin separaattori tarkkailee erityisesti yhtä partikkelin ominaisuutta lajitellessaan partikkeleita, mutta käytännössä sattumalla sekä separointilaitteen ja partikkelien muilla ominaisuuksilla on myös vaikutusta separointitulokseen. Jotkin separaattorit keskittyvät ominaisuuksiin, joihin partikkelien sisältämät materiaalit eivät vaikuta, mutta useiden separaattorien toimintaan vaikuttaa myös partikkelien kompositio. Tutkielman piirilevyjen kierrätysprosesseissa käytettiin partikkelien kokoon, tiheyteen, magneettisuuteen ja sähköjohtokykyyn perustuvia separaattoreita, jotka on esitelty lyhyesti simulaation yhteydessä tutkielman kolmannessa luvussa.

Kierrätysprosesseissa käytetään murskauksen jälkeen useita erilaisia separaattoreita peräkkäin, minkä lopputuloksena erilaiset materiaalit on eroteltu toisistaan. Useimmissa separaattoreissa on kaksi ulostuloa: separoitu ja separoitumaton. Partikkelit, jotka täyttävät separaattorin asettaman ehdon, separoituvat, ja loput separoitumattomat partikkelit jatkavat matkaansa seuraavaan laitteeseen tai ulostuloon. Partikkelit, joiden olisi pitänyt separoitua mutta päätyivät jostain syystä jatkamaan matkaansa, kuuluvat ohivirtaukseen (*bypass*).

Käytännössä separointi ei koskaan onnistu kierrätysprosesseissa täydellisesti, sillä kierrätyksessä partikkelit sisältävät tavallisesti useampia toisiinsa tiiviisti kiinnittyneitä materiaaleja. Murskauskokoa pienentämällä saadaan materiaalit irtautumaan toisistaan paremmin, mutta toisaalta murskaamisen lisääminen nostaa myös kustannuksia ja pölyjen määrää (Saulny 2015). Separoinnin jälkeen eroteltuja materiaaleja voidaan tarvittaessa myös jalostaa tai separoida uudestaan, mikäli separointituloksesta sisältyy runsaasti epäpuhtauksia.



Kuva 1: Kierrätyksen vaiheet

2.2. Kierrätysprosessin koeajo

Osallistuin piirilevyjen kierrätysprosessin koeajoon Kuusakosken Heinolan toimipisteellä 22.10.2015 kolmen Kuusakosken tutkimus- ja kehitystiimin jäsenen opastuksella. Koeajossa syötettiin rengasmurskaimelle kuvaputkitelevisioiden piirilevyjä, minkä jälkeen murskauksessa syntyneet partikkelit lajiteltiin separaattorien avulla. Näytteiden otto tapahtui separaattorien ulostuloista muun muassa muuttolaatikoiden avulla. Otetut näytteet siirrettiin lopuksi vahvoin BigBag-säkkeihin, joissa näytteet punnittiin ja kuljetettiin tutkittaviksi Kuusakosken Lahden toimipisteeseen. Myös kierrätysprosessissa syntyvistä pölyistä otettiin näytteitä, mutta nämä eivät olleet olennaisia materiaalien simuloinnin kannalta.



Kuva 2: a) Kierrätysprosessin syöte ennen murskausta, b) partikkelien näytteenottoa seulalla, c) näytteiden siirto BigBag-säkkiin

Kuusakosken kierrätysasiantuntijat antoivat koeajon ulostulojen alkuainejakaumista estimaatit, joita hyödynnettiin simuloinnissa. Tämän lisäksi simuloinnissa käytettiin myös Kuusakosken 8.1.2013 Heinolassa toteutetun vastaavanlaisen kierrätysprosessin koeajon tuloksia, joissa partikkelivirtauksia oli analysoitu yksityiskohtaisemmin.

2.3. Simulointityökalut

Tutkielmassa käytetty prosessisimulointimoduuli HSC Sim on osa Outotecin kehittämää kansainvälisesti tunnettua HSC Chemistry -ohjelmistoa. HSC Chemistry on vuodesta 1974 asti kehitetty laajasti teollisuuden käytössä oleva ohjelmisto, joka on suunniteltu

tukemaan kemiallisia reaktioita, tasapainotuslaskelmia sekä prosessisimulointia. (Outotec Oyj.) HSC Sim on ohjelmiston suurin moduuli, joka sisältää prosessisimulaatiotyökaluja niin mineraaliprosessointiin kuin pyro- ja hydroprosesseihin.

Sim-moduulissa käytetään flowsheet-mallinnusta, jossa prosessin laitteet ja ainevirtaukset piirretään graafiseen käyttöliittymään. Flowsheet-kierrätysmalleissa separoitu aines merkataan tavallisesti separaattorista alaspäin piirretyllä nuolella, kun taas separoitumasta ainesta kuvaa oikealle piirretty nuoli. Laitteiden ja virtausten ominaisuuksia voidaan muokata käyttöliittymässä parametreja muuttamalla, joiden perusteella ohjelma simuloi prosessin kulun ja tulokset. Prosessia ajettaessa käyttöliittymästä nähdään koko prosessin materiaalivirtausten kulku laitteesta toiseen. Moduuli tukee Microsoft Excel -ohjelmiston arvoja, minkä vuoksi joitain arvoja voidaan tarvittaessa kopioida myös suoraan Excelistä moduulin käyttöliittymään.

Toukokuussa 2015 aloin kehittämään Outotecin tutkimus- ja kehitystiimin kesätyöntekijänä HSC Sim -moduulia myös kierrätys- ja prosessisimulointia tukevaksi. Kesän aikana ohjelmoin VB.NET-ohjelmointikielellä Microsoft Visual Studio 2012 -ohjelmointiympäristössä toiminnan tavallisimmille kierrätysseparaattoreille. Yksi separaattori on toteutettu aina yhtenä DLL-mallina (*Dynamic Link Library*), kuten muutkin prosessilaitteet HSC Sim -moduulissa. Näihin yhdistetään simuloinnissa moduulin omat nuolilla piirretyt syöte- ja tulosvirrat, jotka siirtävät prosessissa kulkevia materiaaleja. Kesällä kehittämäni separaattorien DLL-mallit toimivat myös tutkielman kierrätysprosessissa tarvittavien separaattorien pohjana, mutta tutkielman aikana separaattoreihin on myös tehty joitakin pieniä parannuksia. Syötteenä toimiva murskattujen piirilevyjen DLL-malli on luotu erikseen tätä tutkielmaa varten.

3. SIMULOINTI

Simuloinnin kehittäminen perustui Kuusakoskelta saatuun aineistoon, jonka perusteella sovellettiin HSC Sim -moduulin kierrätysseparaattorien toimintaa vastaamaan todellisista kierrätysprosesseista saatuja arvoja. Ensisijaisena vertauskohteena tutkielmassa pidettiin vuonna 2013 analysoitua piirilevyjen kierrätysprosessia, ja ohessa tarkkailtiin myös vuoden 2015 kierrätysprosessin alkuainejakaumien estimaatteja. Prosessiin syötetty massa määriteltiin vuoden 2013 koeajon mukaisesti.

HSC Sim -simulointialustalle ei ole vielä mallinnettu kierrätysmurskainten toimintaa, minkä vuoksi simulointi keskittyi murskattujen partikkelien mallintamiseen ja separointiin. Murskauksessa syntyneen hienojakoisen aineen massa, joka ei päätenyt separointiin asti, vähennettiin koeajon kokonaismassasta ennen massan syöttämistä prosessiin. Pölyjen määrää ei ollut saatavilla laitekohtaisesti, minkä vuoksi pölyjen käsittelyä yksinkertaistettiin poistamalla pölyjen massa yhdessä virtauksessa tuuliseulan kevyeen materiaalivirtaukseen, jonne suurin osa prosessin pölyistä päätyy.

3.1. Syöte

Kuvaputkitelevision piirilevyjen kierrätyksen simuloinnissa lähtökohtana olivat murskauksessa syntyneet partikkelit, jotka lajiteltiin näytteiden perusteella erilaisiin partikkeliluokkiin. Saman luokan sisällä olevat partikkelit sisältävät samanlaisia materiaaleja ja käyttäytyvät separoinnissa samalla tavalla. Materiaalien lisäksi partikkelien koko vaikuttaa ratkaisevasti lajitteluun, minkä vuoksi partikkelien luokittelussa käytettiin myös partikkelin halkaisijaa. Piirilevyjen kierrätysprosessin partikkeliluokittelussa suuri partikkeli kuvaa yli 20 millimetrin kokoista partikkelia, kun taas pienen partikkelin keskimääräinen halkaisija on korkeintaan 20 millimetriä. Partikkeliluokittelun pohjana käytettiin Kuusakosken vuoden 2013 piirilevyjen kierrätysprosessin koelajittelussa käytettyjä luokkia.

Vaikka partikkelit kuuluisivat samaan luokkaan, ne eivät päädy separoinnissa aina samaan ulostuloon. Ajatuksena on, että samaan luokkaan kuuluvilla partikkeleilla on sa-

manlainen separointitodennäköisyys eli todennäköisyys, jolla partikkeli tulee erotelluksi. Kun partikkeliluokan partikkeleja ajetaan tonneittain, voidaan tällöin todennäköisyysjakaumien perusteella päätellä, kuinka suuri osa näistä samantyyppisistä partikkeleista separoituu ja kuinka moni jatkaa matkaansa eteenpäin prosessissa.

Tulevaisuudessa on tarkoitus, että partikkelit luodaan HSC Chemistry -ohjelmistoon kuuluvassa erillisessä materiaalitietokannassa, mutta tutkielman aikana tietokanta oli vielä työn alla. Tämän vuoksi syötteen luomista varten tehtiin oma DLL-malli käyttöliittymineen. Piirilevyjen syötteen DLL-mallissa on kolme taulukkoa, joiden avulla käyttäjä voi muokata simuloinnissa käytettäviä arvoja vastaamaan omia tarpeitaan. Käyttöliittymässä käytetään partikkelien nimissä ja materiaalien nimissä lyhenteinä alkuaineiden lyhenteitä sekä alalla yleisesti käytössä olevia lyhenteitä. Lyhenteiden selitykset alkuaineita lukuun ottamatta näkyvät oheisesta taulukosta.

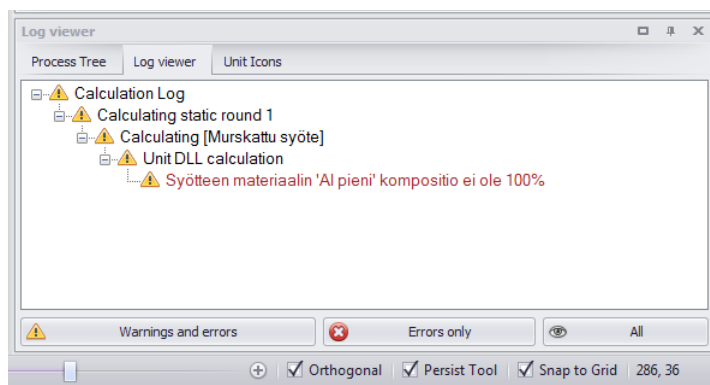
Taulukko 1: Syötteen käyttöliittymässä käytetyt lyhenteet

Ms	Messinki
RST (<i>STT</i>)	Ruostumaton teräs (<i>Stainless Steel</i>)
johto	Muovipäällysteinen kuparisähköjohto
PCB	Piirilevy (<i>Printed Circuit Board</i>)
käämi	Kuparikäämi
kond.	Kondensaattori
muu/ei-metallit	Muovi, pöly, kivi, puu jne.

Ensimmäinen taulukko (Kuva 3) on nimeltään ”Partikkelien kompositio”, ja siinä käyttäjän on mahdollista muokata partikkeliluokkien sisältämiä materiaaleja massaprosenttien avulla. Partikkeliluokat on määritelty koodissa, eikä näitä voi muokata käyttöliittymässä. Oikealla oleva ”Yht %”-sarake päivittyy automaattisesti sitä mukaan kun käyttäjä määrittää materiaaleja. Jos jonkin partikkeliluokan kompositio on erisuuri kuin 100 %, käyttäjä saa varoitusviestin simulaatiota ajettaessa (Kuva 4). Tutkielman simulaatiossa kompositioarvot perustuvat Kuusakosken tarkistamiin omiin estimaatteihini.

Partikkelien kompositio	Al	Mg	Zn	Fe	Cu	Ms	Pb	RST	piirilevy	Ei-metallit	Yht%
Al pieni	99	0	0	0	0	0	0	0	0	1	100
Al suuri	97	0	0	0	0	0	0	0	0	3	100
Mg pieni	0	98	0	0	0	0	0	0	0	2	100
Mg suuri	0	95	0	0	0	0	0	0	0	5	100
Zn pieni	0	0	99	0	0	0	0	0	0	1	100
Zn suuri	0	0	95	0	0	0	0	0	0	5	100
Al+Fe pieni	75	0	0	10	0	0	0	0	0	15	100
Al+Fe suuri	70	0	0	20	0	0	0	0	0	10	100
Al+Cu pieni	80	0	0	0	13	0	0	0	0	7	100
Al+Cu suuri	70	0	0	0	21	0	0	0	0	9	100
Cu pieni	0	0	0	0	97	0	0	0	0	3	100
Cu suuri	0	0	0	0	90	0	0	0	0	10	100
Ms pieni	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100
Ms suuri	0	0	0	0	0	99	0	0	0	1	100
RST pieni	0	0	0	0	0	0	0	99,1	0	0,9	100
RST suuri	0	0	0	0	0	0	0	97	0	3	100
Pb pieni	0	0	0	0	0	0	0	97	0	3	100
Pb suuri	0	0	0	0	0	0	0	98	0	2	100
johto pieni	0	0	0	0	50	0	0	0	0	50	100
johto suuri	0	0	0	0	50	0	0	0	0	50	100
Fe pieni	0	0	0	83	0	0	0	0	0	17	100
Fe suuri	0	0	0	81	0	0	0	0	0	19	100
PCB pieni	0	0	0	0	0	0	0	0	90	10	100
PCB suuri	0	0	0	0	0	0	0	0	89	11	100
käämi pieni	0	0	0	20	60	0	0	0	0	20	100
käämi suuri	0	0	0	17	58	0	0	0	0	25	100
kond. pieni	95	0	0	0	0	0	0	0	0	5	100
kond. suuri	90	0	0	0	0	0	0	0	0	10	100
muu pieni	0	0	0	0	3	0	0	0	0	97	100
muu suuri	0	0	0	0	2	0	0	0	0	98	100

Kuva 3: "Partikkelien kompositio" -taulukossa partikkeliluokat ovat esitetty riveinä ja partikkelien sisältämät materiaalit sarakkeina



Kuva 4: Virheellisestä komposition asetuksesta aiheutunut varoitusviesti

Toinen syötteessä oleva taulukko (Kuva 5) on nimeltään ”Syötteen määrä”, ja siinä määritellään, kuinka paljon kunkin partikkeliluokan partikkeleja syötetään prosessiin. Koska moduulia käytetään tavallisesti suurten massojen kanssa, on yksikkönä tonni (1000 kg). Tutkielman simulaatiossa käytetyt arvot perustuvat Kuusakosken prosentuaalisista estimaateista laskettuihin arvoihin.

	B	C
4	Syötteen määrä	
5	massa (ton)	
6	Al pieni	0,050715
7	Al suuri	0,016905
8	Mg pieni	0,016905
9	Mg suuri	0,016905
10	Zn pieni	0,050715
11	Zn suuri	0,016905
12	Al+Fe pieni	0,050715
13	Al+Fe suuri	0,03381
14	Al+Cu pieni	0,03381
15	Al+Cu suuri	0,03381
16	Cu pieni	0,084525
17	Cu suuri	0,06762
18	Ms pieni	0,050715
19	Ms suuri	0,016905
20	RST pieni	0,016905
21	RST suuri	0,016905
22	Pb pieni	0,016905
23	Pb suuri	0,016905
24	johto pieni	0,084525
25	johto suuri	0,06762
26	Fe pieni	0,30429
27	Fe suuri	0,37191
28	PCB pieni	1,301685
29	PCB suuri	0,37191
30	käämi pieni	0,016905
31	käämi suuri	0,016905
32	kond. pieni	0,06762
33	kond. suuri	0,03381
34	muu pieni	0,06762
35	muu suuri	0,06762

Kuva 5: Syötteen määrä määritellään simulaatiossa partikkeliluokittain

”Materiaalien ominaisuudet” -taulukossa (Kuva 6) käyttäjä voi muokata separaattorien tarkastelemia arvoja: tiheyttä, magneettista susceptibiliteettia ja EC-kerrointa. Tutkielman simulaatiossa käytetyt tiheys- ja susceptibiliteetti-arvot perustuvat Theodore Grayn periodictable.com-sivuston arvoihin (Gray et al.). Simulaatiossa käytetyt EC-kertoimet ovat peräisin Kuusakosken kalvosarjasta (Talja 2015, 34).

	B	C	D	E
4	Materiaalien ominaisuudet			
5		Tiheys (kg/l)	Susceptibiliteetti (m ³ /kg)	EC-kerroin
6	Al	2,7	7,8E-09	13,1
7	Mg	1,1738	6,9E-09	12,5
8	Zn	7,14	-2,21E-09	2,4
9	Fe	7,874	9999	6,4
10	Cu	8,92	-1,08E-09	6
11	Ms	8,297	-1,4755E-09	1,4
12	Pb	11,34	-1,5E-09	0,4
13	RST	7,9	999	1,3
14	Piirilevy	4,277273	801,8	2,05721
15	Ei-metallit	0,97	0	0

Kuva 6: ”Materiaalien ominaisuudet” -taulukossa määritellään separoinnissa tarvittavat ominaisuusarvot materiaaleittain

Kun partikkeliluokkien sisältämien materiaalien määrät sekä näiden materiaalien ominaisuuksien arvot ovat separaattorin tiedossa, voidaan laskea näiden perusteella ominaisuuksien keskiarvot. Tietyn ominaisuuden keskiarvo kuvaa kokonaisten partikkelien käyttäytymistä tätä tiettyä ominaisuutta tarkkailevassa separaattorissa. Ominaisuusarvoihin tutustutaan tarkemmin separaattorien yhteydessä.

Syötteen koodissa on lisäksi määritelty materiaalien kompositio (Taulukko 2), mutta tätä ei ole liitetty käyttöliittymään. Materiaalien kompositio perustuu Kuusakosken tarkastamiin omiin estimaatteihini sekä piirilevyjen kompositioita käsittelevään artikkeliin (Ogunniyi et al. 2009, 2). Ruostumattoman teräksen kompositio on peräisin *European Steel and Alloy Grades* -tietokannasta (SteelNumber.com). Tutkielman simulaatiossa käytetty materiaalien kompositio on esitetty oheisessa taulukossa mineraalien massa-prosentteina.

Taulukko 2: Koodissa määritelty partikkelien sisältämien materiaalien kompositio

Materiaalit → Mineraalit ↓	Al	Mg	Zn	Fe	Cu	Ms	Pb	RST	PCB	Muu
Al	100,00								2,00	
Mg		100,00								
Zn			100,00			35,00				
Fe				100,00				74,43	8,00	
Cu					100,00	65,00			20,00	
Pb							100,00		2,00	
Ni								8,00	2,00	
Cr								17,50		
C								0,07	11,00	33,00
Sn									4,00	
Ag									0,05	
Au									0,01	
SiO₂									30,00	
H									20,94	67,00
Yhteensä	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

3.2. Separointi

Separoinnin simulointi toteutettiin kalibroimalla separaattorien parametreja yksi kerrallaan niin, että ulostulojen massa ja materiaalit vastasivat mahdollisimman hyvin Kuusakoskelta saatuja arvoja. Simulointi aloitettiin ensimmäisestä separaattorista, ja kun sekä ulostuleva massa että materiaalit vastasivat suunnilleen Kuusakosken arvoja, siirryttiin seuraavaan separaattoriin.

Piirilevyn kierrätysprosessin simuloinnissa käytettyjen separaattorien luomisessa hyödynnettiin mineraaliprosessoinnissa käytettyä Whitenin "Reduced Efficiency Curve" -todennäköisyysjakaumaa (ks. esim. Weiss 1985). Tutkittavan partikkelin tietyn ominaisuuden arvot vastaavat todennäköisyysjakauman vaaka-akselin arvoja, ja pystyakseli saa arvoja nolasta yhteen, mikä vastaa separointitodennäköisyyden arvoja. Todennäköisyyttä voidaan säätää muuttamalla todennäköisyysjakauman odotusarvoa (d_{50}) ja jyrkkyyttä (α). Lisäksi kussakin separaattorissa voidaan säätää ohivirtauksen (*bypass*) määrää, joka kertoo, kuinka suuri osa partikkeleista virtaa ohi, vaikka teoriassa niiden pitäisi separoitua. Separaatteiden käyttöliittymässä voi lisäksi valita, minkä perusteella tietyn ominaisuuden keskiarvo partikkelille lasketaan. Yleisimmät vaihtoehdot ovat massa- ja tiheyspainotteinen keskiarvo.

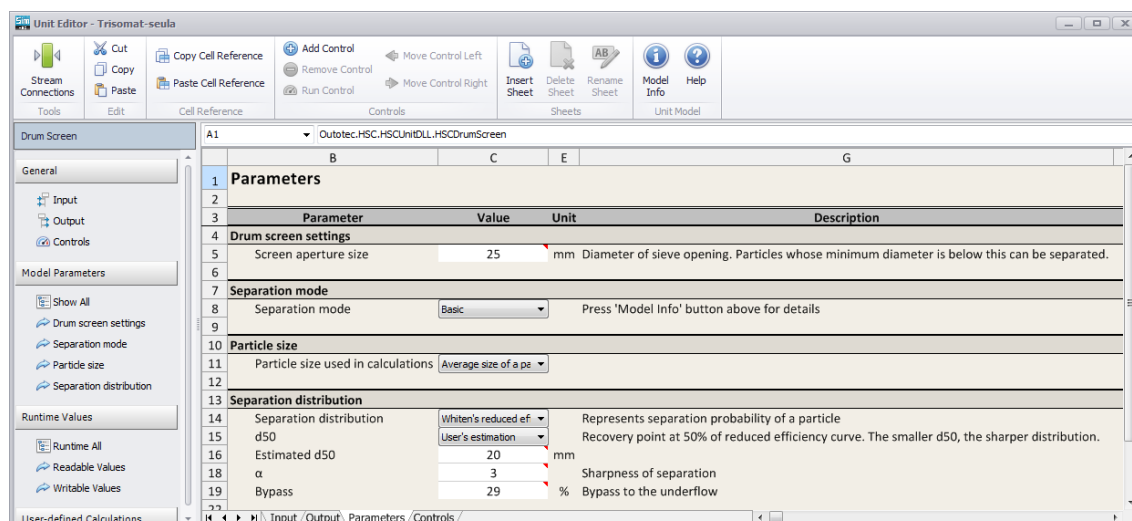
Tutkielman kierrätysprosessissa partikkelien separointiin käytettiin seulaa, tuuliseulaa, pyörrevirtaseparaattoria ja magneettisia separaatteja. Prosessissa oli käytössä useita erilaisia magneettisia separaatteja, mutta simuloinnin pohjana samantyyppisille separaatteille käytetään vain yhtä yleistä mallia, sillä separaattorien parametreja muuttamalla saadaan muokattua separaattorien ominaisuuksia eri laiteversioita vastaaviksi. Tulevaisuudessa, kun sopivat parametrit eri tyypeille tunnetaan esimerkkiprosessien perusteella, voidaan eritellä eri versiot omiksi DLL-malleikseen. Seuraavaksi keskitytään piirilevyjen kierrätysprosesseissa käytettyjen separaattorien lyhyeen esittelyyn ja kalibrointiin simulaation kannalta.

3.2.1 Seula

Seula on yksi tavallisimmista separaattoreista kierrätysprosesseissa. Seulan tehtävänä on lajitella partikkelit partikkelikoon mukaan eri ulostuloihin. Materiaalien virratessa seulan läpi seulan aukkoja pienemmät partikkelit kulkeutuvat seulan reikien lävitse, kun taas suuremmat partikkelit jatkavat matkaansa prosessissa. Seulassa separoitua hienojakoisempaa virtausta kutsutaan alitteeksi, ja karkeampi materiaalivirtaus on nimeltään ylite. Käytännössä pienempiä partikkeleja kulkeutuu kuitenkin suurempien partikkelien mukana myös ylitteeseen. (Gupta 2003, 163–165.) Seuloissa voi olla myös kahta useampia ulostuloja, mutta simuloinnissa tämä toteutetaan laittamalla useampia kahden ulostulon seuloja peräkkäin.

HSC Sim -moduulissa seula laskee kullekin partikkeliluokalle separointitodennäköisyyden keskimääräisen partikkelikoon ja seulan aukkojen koon perusteella. Partikkelien partikkelikoot on määritelty koodissa partikkelien luonnin yhteydessä. Mikäli partikkelin minimihalkaisija on suurempi kuin seulan aukko, erillistä separointitodennäköisyyttä ei lasketa, vaan partikkelin oletetaan päätyvän aina ylitteeseen. Partikkelit, jotka ovat ainakin jossain asennossa pienempiä kuin seulan aukot, voivat kulkea seulan läpi, ja näille partikkeleille lasketaan separointitodennäköisyys todennäköisyysjakaumaa käyttäen.

Seulan käyttöliittymässä (Kuva 7) parametreina ovat seulan aukkojen koko, joksi tutkimassamme prosessissa on asetettu murskaimen rostikoko 25 mm. Separointijakaumaan liittyväksi odotusarvoksi (d_{50}) asetettiin 20 mm, sillä Kuusakosken vuoden 2013 koeajojen seulan näytteiden tuloksissa yli ja alle 20 mm partikkeleita esiintyi seulassa suunnilleen yhtä paljon. Todennäköisyysjakauman jyrkkyys asetettiin melko loivaksi ja ohivirtaus melko suureksi (29 %), sillä koeajoissa käytetylle seulalle on tyypillistä, että partikkelit takertuvat helposti ja näin ollen myös separointitulokset ei ole kovin tarkka.

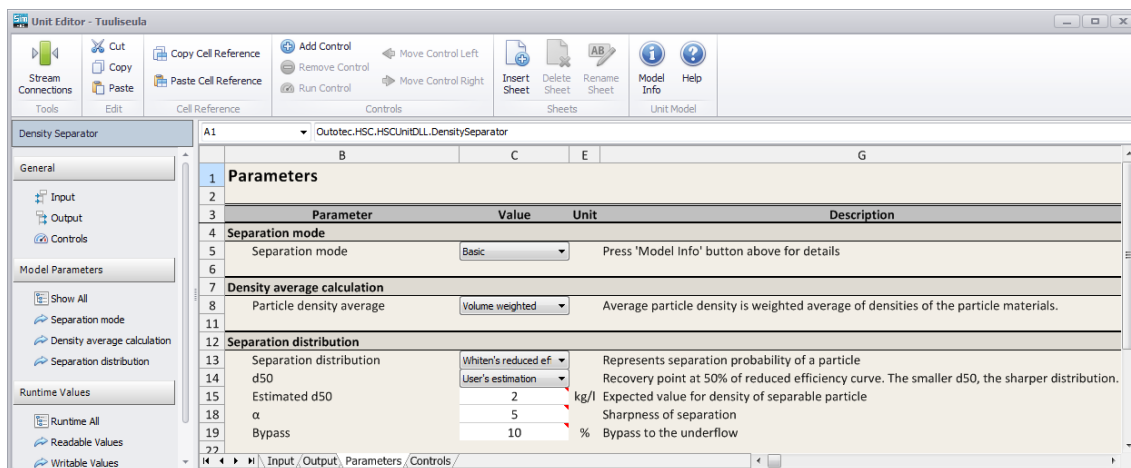


Kuva 7: Seulan käyttöliittymä HSC Sim -moduulissa

3.2.2 Tuuliseula

Tuuliseulassa separointi perustuu pääosin partikkelien tiheyteen ja painoon, mikä erottaa tuuliseulan koon perusteella lajittelevista seuloista. Tuuliseulassa ilmavirtaus puhalttaa kevyet partikkelit seulan yläosaan, kun taas painavammat partikkelit putoavat seulan pohjalle. Käytännössä myös partikkelin koko ja muoto vaikuttavat ratkaisevasti tuuliseulassa tapahtuvaan separointiin. (Klumpar et al. 1986, 77.) Piirilevyjen kierrätysprosesseissa kevyeen fraktioon päätyy etenkin pölyä, muovia ja kondensaattoreista purkautunutta alumiinifoliota.

HSC Sim -moduulissa tuuliseulan pohjana on käytetty tiheyteen perustuvaa separaattoria (Kuva 8). Separaattori laskee kunkin partikkeliluokan separointitodennäköisyyden hyödyntäen syötteessä annettuja kompositiotietoja ja materiaalien tiheyksiä. Tiheyden yksikkönä simuloinnissa käytetään kg/l ($=\text{g/cm}^3$). Simuloinnissa todellisuutta vastaaviin tuloksiin päästiin melko jyrkällä jakaumalla ja asettamalla partikkelien tiheyden odotusarvoksi pari tiheysyksikköä. Ohivirtaus 10 % on melko yleinen arvio separoinnin ohivirtauksesta, ja tuuliseulassa se tarkoittaa että noin kymmenesosa kevyistä partikkeleista päätyi painavaan fraktioon muun painavan massan mukana.

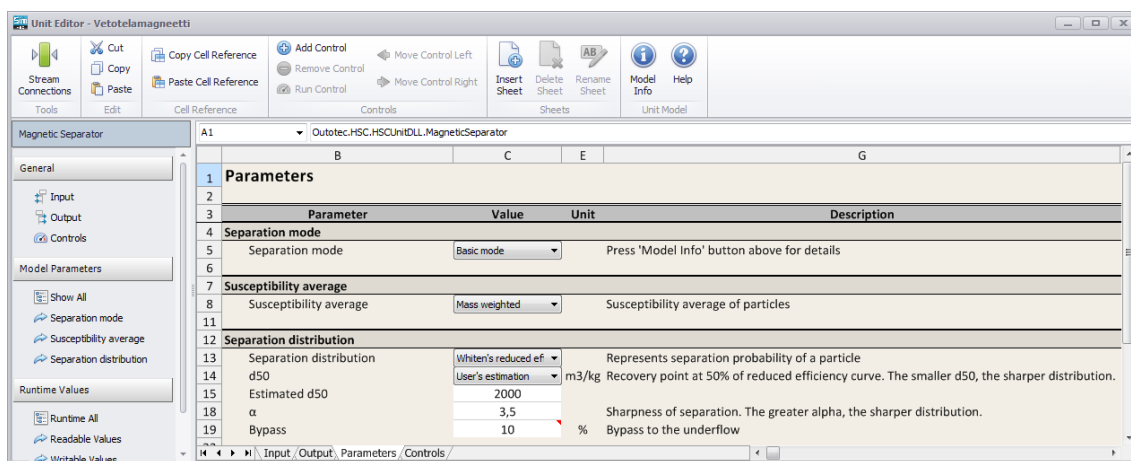


Kuva 8: Tuuliseulan käyttöliittymä HSC Sim -moduulissa

3.2.3 Magneettinen separaattori

Magneettinen separointi perustuu partikkelien massaperusteisiin magneettisiin susceptibiliteetteihin. Magneettinen susceptibiliteetti voidaan laskea jakamalla magnetoinnin voimakkuus eli magnetoituma separaattorin magneettikentän voimakkuudella. (Worrell & Reuter 2014, 541–542.)

HSC Sim -moduulin magneettisessa separaattorissa (Kuva 9) lasketaan separointitodennäköisyys kullekin partikkeliluokalle partikkelin sisältämien materiaalien susceptibiliteettiarvojen perusteella. Susceptibiliteetin yksikkönä simulaatiossa käytetään SI-yksikköä m^3/kg . Susceptibiliteettien arvot vaihtelevat pienistä negatiivisista luvuista kymmeniin tuhansiin, minkä vuoksi todennäköisyysjakauman hajonta saattaa olla hyvinkin suuri. Kalibroinnissa parhaat tulokset saatiin, kun odotusarvoksi asetettiin yli tuhat ja jyrkkyys sekä ohivirtaus pidettiin kohtuullisen pieninä.

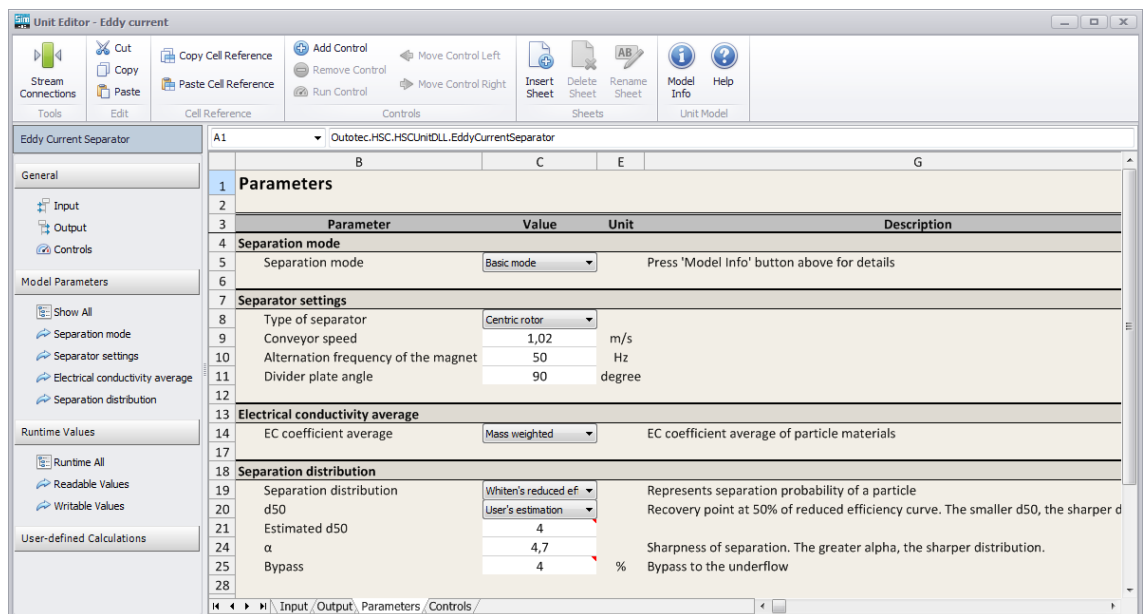


Kuva 9: Vetotela magneetin käyttöliittymä HSC Sim -moduulissa

3.2.4 Pyörrevirtaseparaattori

Pyörrevirtaseparaattorin toiminta perustuu separaattorin vaihtelevaan magneettikenttään, joka aiheuttaa partikkeleille pyörrevirtauksen (*eddy current*). Tämä puolestaan aiheuttaa voiman, joka on verrannollinen partikkelin sähkönjohtokyvyn ja tiheyden suhteeseen eli EC-kertoimeen (*EC Coefficient*). Pyörrevirtaseparaattorilla on etenkin alumiinin ja magnesiumin erottelu tehokasta, mutta sillä saadaan lisäksi eroteltua myös messinkiä, kuparia, sinkkiä ja lyijyä sisältäviä partikkeleita. Ruostumaton teräs, muovipäällysteiset sähköjohdot sekä metalleja sisältämättömät partikkelit eivät tavallisesti reagoi separaattorin pyörrevirtaukseen. (Worrell & Reuter 2014, 542; Talja 2015.)

HSC Sim -moduulin pyörrevirtaseparaattorilla (Kuva 10) saatiin parhaita tuloksia hie-
man jyrkällä jakaumalla ja pienellä ohivirtauksella. EC-kertoimen odotusarvoksi asetet-
tiin neljä, jolloin etenkin alumiini (EC-kerroin 13,1), magnesium (EC-kerroin 12,5) ja
kupari (EC-kerroin 6,4) saatiin hyvin eroteltua.



Kuva 10: Pyörrevirtaseparaattorin käyttöliittymä HSC Sim -moduulissa

4. TULOKSET

Tulosten tarkastelussa vertailtiin Kuusakosken kierrätysprosesseista saatuja arvoja ja estimaatteja HSC Sim -simulointialustalla mallinnetun piirilevyjen kierrätysprosessien arvoihin. Tämän lisäksi kierrätysprosessia testattiin yleisesti ajamalla piirilevyjen kierrätysprosessia HSC Sim -simulaatioalustan käyttöliittymässä ja tutkimalla eri materiaalien kulkua separaattorista toiseen.

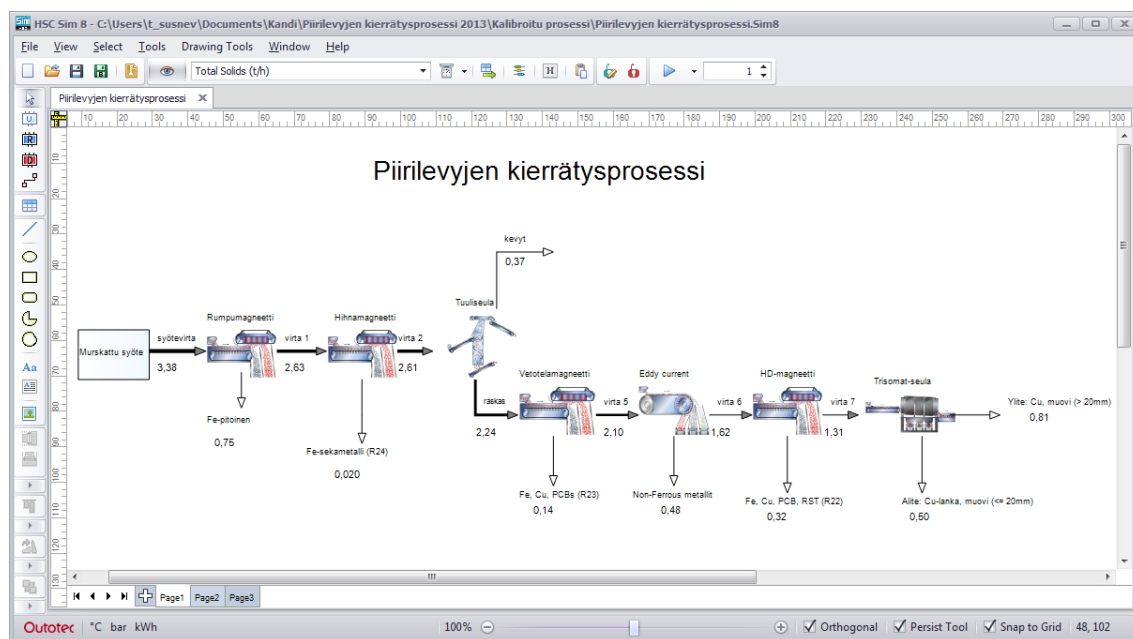
4.1. Tulosten vertailu

Tulosten vertailun pohjana käytettiin koeajosta mitattua massatasetta, jonka voitiin olettaa olevan suhteellisen tarkka arvo verrattuna muihin koeajoista saatuihin arvoihin. Alla olevasta taulukosta (Taulukko 3) huomataan, että simulaation massatase noudattaa hyvin tarkasti todellisen kierrätysprosessin massatasetta. Ainoastaan Trisomat-seulan ylitteessä on 0,01 tonnin heitto, mikä johtunee ohjelman pyöristyksistä.

Taulukko 3: Koeajon massataseen ja simulaation massataseen vertailu

	Mitattu massa 2013	Simulaatio
Syöte murskauksen jälkeen	3,38 t	3,38 t
Rumpumagneetti	0,75 t	0,75 t
Hihnamagneetti	0,02 t	0,02 t
Tuuliseulan kevyt (pöly)	0,37 t	0,37 t
Vetotelamagneetti	0,14 t	0,14 t
Pyörrevirtaseparaattori	0,48 t	0,48 t
HD-magneetti	0,32 t	0,32 t
Trisomat-seulan ylite	0,80 t	0,81 t
Trisomat-seulan alite	0,50 t	0,50 t

HSC Sim- simulaatioalustan käyttöliittymästä (Kuva 11) nähdään prosessia ajamalla koko prosessin massatase kerralla. Virtausnuolen paksuus kuvaa massan määrää massaprosentteina koko virtauksesta. Ulostulojen materiaalien massat ovat esitetty tonneina.



Kuva 11: Piirilevyjen kierrätysprosessin massatase HSC Sim -simulaatioalustalla.

Massataseen ohella tarkkailtiin vuoden 2013 piirilevyjen kierrätysprosessissa analysoituja ulostulojen materiaali-jakaumia massaprosentteina kokonaisvirtauksesta. Analysointi oli toteutettu Kuusakosken toimesta vain kolmelle kierrätysprosessin kannalta olennaisimmalle laitteelle, minkä vuoksi myös arvojen vertailu keskittyi näiden kolmen separaattorin ulostulojen tarkkailuun.

Vertailussa huomattiin, että suurimmillaan Kuusakoskelta saadut estimaatit ja analysoidut näytteet heittivät useita kymmeniä prosentteja, minkä vuoksi myös haluttua simulaation tulosta oli osittain vaikea arvioida. Ensisijaisesti päädyin tarkkailemaan analysoitujen näytteiden arvoja, kun taas estimaatit toimivat ennemminkin tukevin vertailukohteina. Oman haasteen simulointiin loi myös se, että prosessiin syötetyt partikkeliluokkien määrät olivat myös Kuusakoskelta saatuja estimaatteja. Tämän vuoksi tarkka eri partikkeliluokkien jakauma ei ollut tarkasti tiedossa, vaikka kokonaismassa vastasi mitattuja tuloksia.

Ensimmäinen analysoitu separaattori oli rumpumagneetti (Taulukko 4). Ensisijainen tavoitteeni oli saada raudan määrä vastaamaan suunnilleen mitattuja tuloksia ja tämä onnistuikin erittäin hyvin sekä näytearvojen että estimaattien kannalta. Myös ei-metallien arvo vastasi suhteellisen tarkasti analysoituja arvoja. Ainoa poikkeava arvo

vaikutti olevan piirilevyjen määrä, jossa analysoidun näytteen ja simulaation tuloksen välillä oli noin kahdeksan prosenttiyksikköä. Esimerkki koeajossa magneettisella separaattorilla separoiduista partikkeleista on nähtävissä alla (Kuva 12).

Taulukko 4: Rumpumagneetissa separoitujen materiaalien massaprosenttien vertailu

	Rumpumagneetti		
	<i>Analysoitu näyte</i>	<i>Asiantuntijan estimaatti</i>	<i>Simulaation tulos</i>
Alumiini	0,0–0,6 %	8,00 %	2,14 %
Kupari	> 0,2 %	11,00 %	1,05 %
Rauta	69,90 %	73,50 %	71,00 %
Magnesium	0,00 %	ei tiedossa	0,00 %
Messinki	0,10 %	ei tiedossa	0,00 %
Ei-metallit	18,40 %	ei tiedossa	17,07 %
Lyijy	0,00 %	ei tiedossa	0,19 %
Piirilevy	1,50 %	ei tiedossa	9,58 %
Ruostumaton teräs	0,00 %	ei tiedossa	0,39 %
Sinkki	0,00 %	3,00 %	0,00 %
Tina	N/A	3,00 %	0,38 %



Kuva 12: Magneettisella separaattorilla separoituja partikkeleja

Toinen tarkkailun kohteena oleva separaattori oli pyörrevirtaseparaattori (Taulukko 5), joka on erikoistunut etenkin alumiinin erotteluun. Simulaatiovirtauksen alumiinin määrä vastasikin kohtuullisen hyvin analysoidun näytteen arvoa. Erikoista oli, että analysoitu näyte ei ollut sisältänyt lainkaan magnesiumia, joka kuitenkin tavallisesti reagoi pyörrevirtaseparaattorin pyörrevirtaukseen. Simulaation tuloksessa magnesiumia esiintyi kuitenkin pieni määrä. Pyörrevirtaseparaattoreissa tavallisesti separoituvan sinkin simuloitu arvo taas vastasi hyvin näytteen arvoa. Huomattavin eroavaisuus esiintyi piirilevyjen

arvojen välillä. Koeajossa otetusta kuvasta (Kuva 13) näkyy, että pyörrevirtaseparaattori erottelee alumiinipartikkelien lisäksi myös pieniä määriä kuparilankaa ja piirilevyn palasia.

Taulukko 5: Pyörrevirtaseparaattorissa separoitujen materiaalien massaprosenttien vertailu

	Pyörrevirtaseparaattori		
	<i>Analysoitu näyte</i>	<i>Asiantuntijan estimaatti</i>	<i>Simulaation tulos</i>
Alumiini	47,50 %	26,00 %	40,20 %
Kupari	> 8,1 %	28,00 %	29,41 %
Rauta	0,00 %	18,00 %	2,96 %
Magnesium	0,00 %	ei tiedossa	1,28 %
Messinki	1,70 %	ei tiedossa	0,50 %
Ei-metallit	4,60 %	ei tiedossa	8,64 %
Lyijy	0,00 %	ei tiedossa	0,38 %
Piirilevy	1,40 %	ei tiedossa	17,04 %
Ruostumaton teräs	0,00 %	ei tiedossa	0,17 %
Sinkki	1,20 %	11,00 %	1,78 %
Tina	N/A	11,00 %	0,68 %



Kuva 13: Pyörrevirtaseparaattorilla separoituja partikkeleja

Trisomat-seula (Taulukko 6) oli kierrätysprosessin viimeinen separaattori, ja näin ollen myös sen arvot heittivät eniten. Myös estimaattien ja analysoitujen arvojen hajonta oli suurta. Simulaatiossa saadut kuparin ja muiden metallien määrät vastasivat melko hyvin näytteiden arvoja, mutta etenkin piirilevypartikkelien määrässä oli jo usean kymmenen prosenttiyksikön ero. Koeajossa otetusta kuvasta (Kuva 14) nähdään, että Trisomat-seulan näyte oli hyvin heterogeeninen.

Taulukko 6: Seulan ylitteen materiaalien massaprosenttien vertailu

	Trisomat-seulan ylite		
	<i>Analysoitu tasenäyte</i>	<i>Asiantuntijan estimaatti</i>	<i>Simulaation tulos</i>
Alumiini	0,10 %	8,00 %	1,96 %
Kupari	> 4,2 %	44,00 %	4,43 %
Rauta	0,00 %	27,00 %	6,48 %
Magnesium	0,00 %	ei tiedossa	0,02 %
Messinki	0,90 %	ei tiedossa	4,95 %
Ei-metallit	28,80 %	ei tiedossa	12,56 %
Lyijy	0,00 %	ei tiedossa	4,40 %
Piirilevy	21,70 %	ei tiedossa	68,65 %
Ruostumaton teräs	0,60 %	ei tiedossa	1,31 %
Sinkki	0,00 %	5,00 %	6,18 %
Tina	N/A	5,00 %	2,75 %

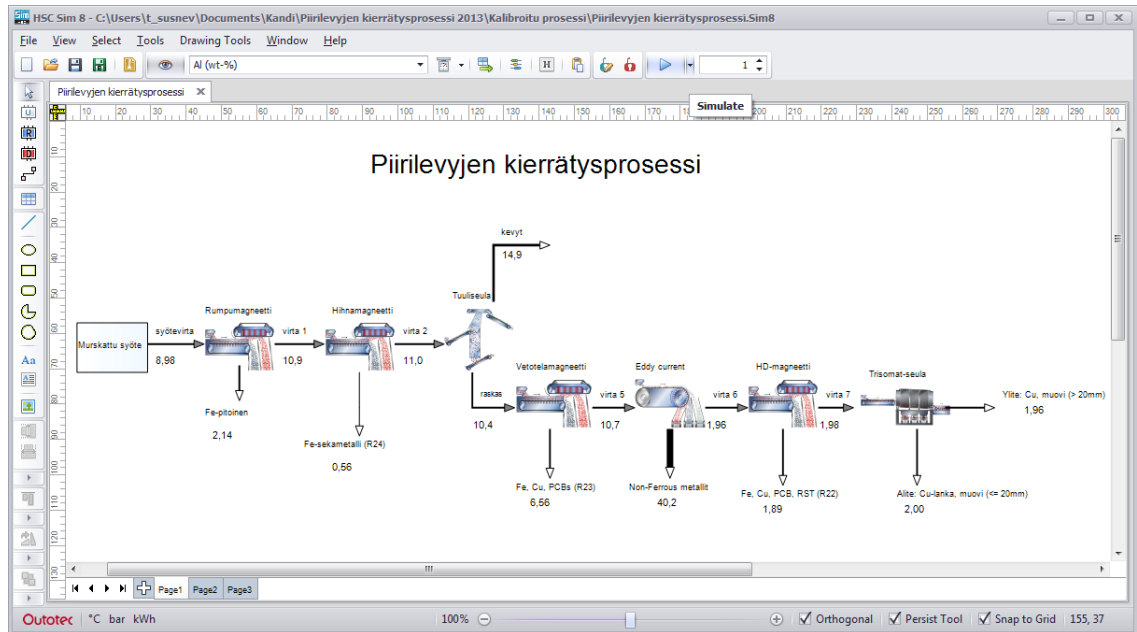


Kuva 14: Partikkelinäyte seualta

4.2. Testaus

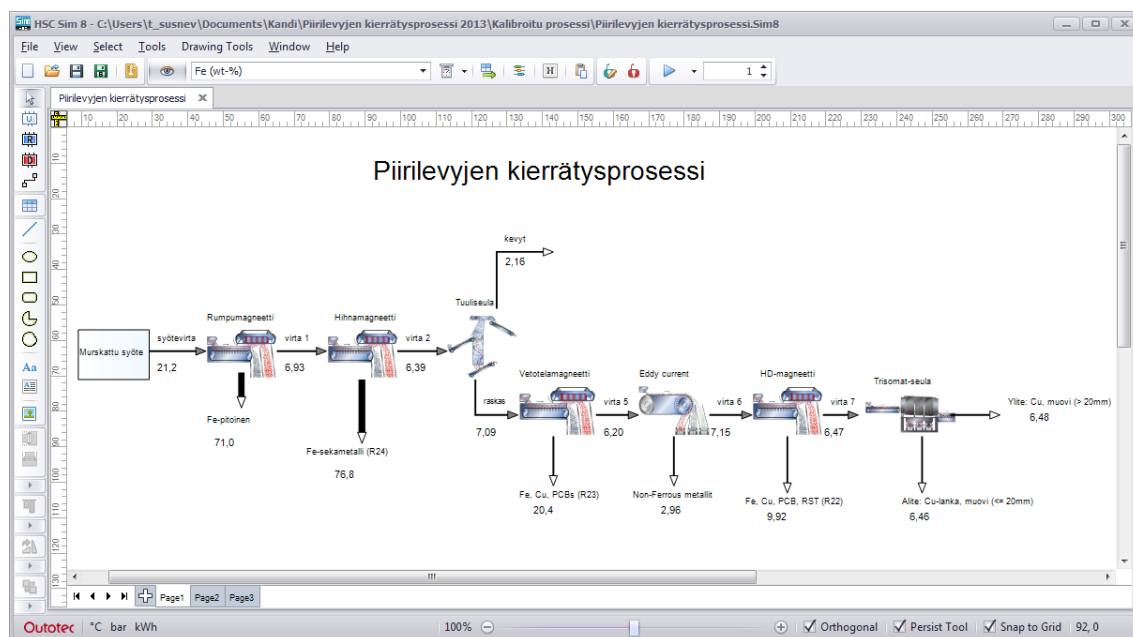
Kolmen separaattorin arvojen vertailujen lisäksi piirilevyjen kierrätysprosessia testattiin HSC Sim -simulaatioalustalla tutkimalla materiaalien kulkua yksittäin. Kierrätysprosessien kannalta olennaisimpien materiaalien kulkua prosessissa verrattiin Kuusakoskelta saatujen prosessikaavioiden merkintöihin sekä yleistietoon separaattorien toiminnasta ja piirilevyjen kierrätysprosessista. Käyttöliittymässä virtausten luvut kuvaavat tutkittavan materiaalin määrän prosentteina virtauksien kokonaismassoista.

Alumiinin kulkua simuloitaessa (Kuva 15) nähdään, että ylivoimaisesti eniten alumiinia poistuu pyörrevirtaseparaattorissa, joka on erikoistunut alumiinin erotteluun. Pieniä määriä alumiinia näkyy myös muissa ulostuloissa, mikä on luonnollista, kun käsitellään monista eri materiaaleista koostuvia partikkeleja. Suhteellisen suuri määrä alumiinia kulkeutuu myös tuuliseulan kevyeen fraktioon, sillä kondensaattoreista peräisin oleva kevyt alumiinifolio päätyy pääasiassa tänne muun kevyen materiaalin ohella.



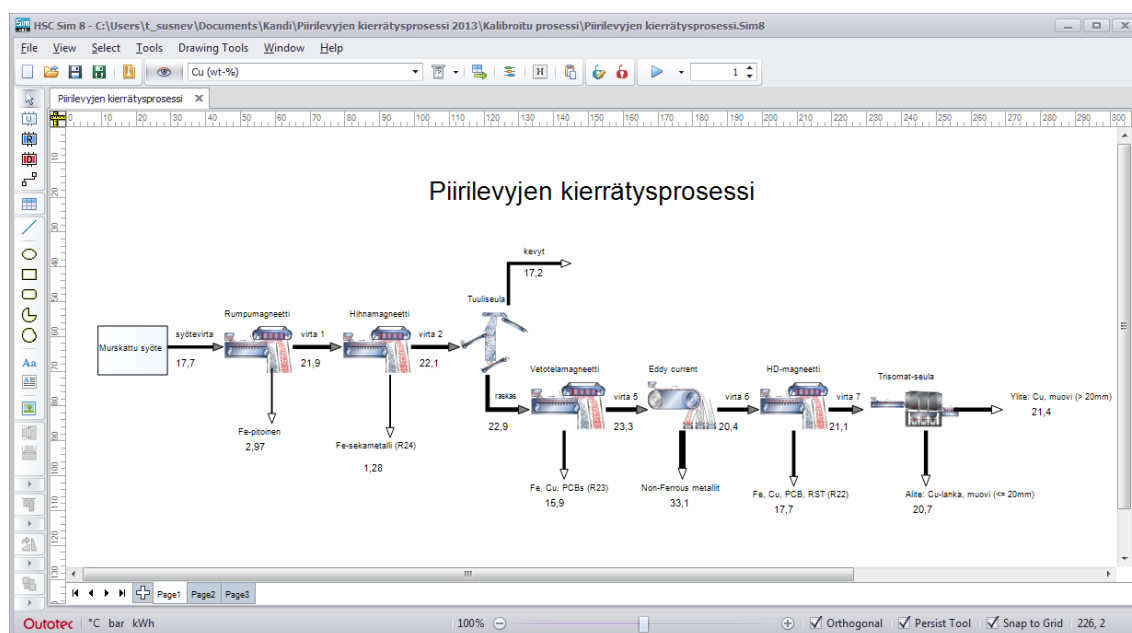
Kuva 15: Alumiinin massaprocentit virtauksissa

Raudan kulkua tarkasteltaessa (Kuva 16) huomattiin, että suurin osa raudasta poistuu magneettisissa separaattoreissa niin kuin todellisuudessaakin kierrätysprosesseissa tapahtuu. Prosessin alkupuolella raudan määrä on suurimmillaan, minkä vuoksi myös rautaa poistuu enemmän. Viimeisenkin magneettisen separaattorin ulostulossa rautaa on kuitenkin vielä lähes 10 %. Tuuliseulan kevyessä fraktiossa ja pyörrevirtaseparaattorin separoidussa osassa rautaa on vain muutama prosentti, mikä vaikuttaa loogiselta. Aiemmassa vertailussa huomattiin, että seulan ylitteen rautamäärä vaihteli Kuusakoskelta saadussa aineistossa 0–27 % välillä, minkä vuoksi on hankala sanoa, kuinka realistinen simulaatiossa saatu Trisomat-seulan ylitteen raudan osuus 6,48 % todellisuudessa on.



Kuva 16: Raudan massaprocentit virtauksissa

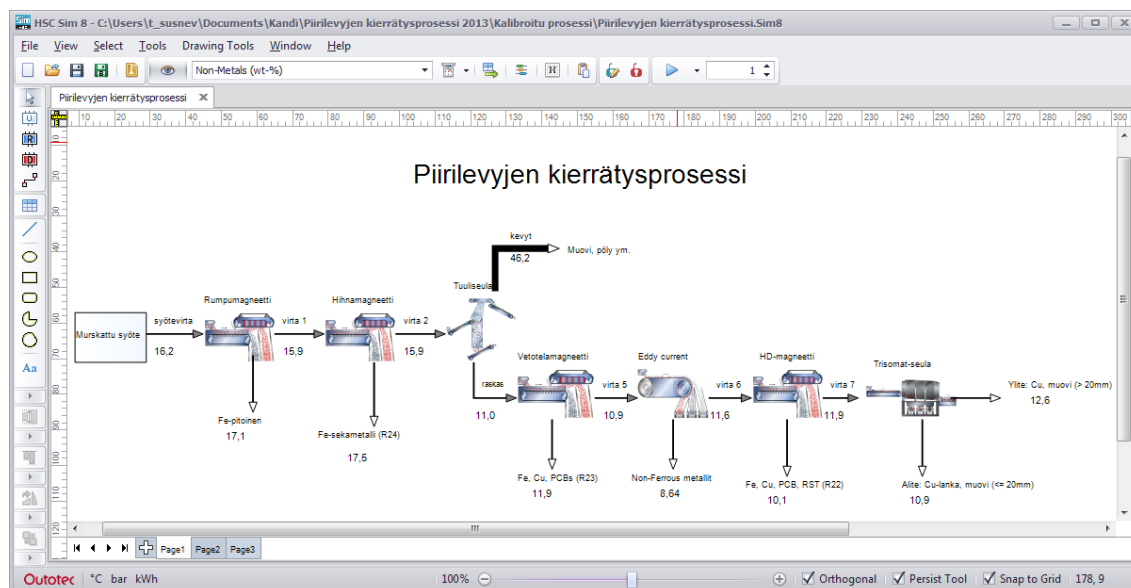
Kuparin kulkua tutkittaessa (Kuva 17) huomattiin, että kuparia poistuu lähinnä prosessin loppupuolella. Kuparin määrä näyttääkin olevan suurimmillaan ulostuloissa, jotka ovat myös simulaation pohjana olleessa prosessikaaviossa merkattu kuparin ulostuloiksi. Pyörrevirtaseparaattorissa kuparin määrä on myös suuri, mikä vaikuttaa luonnolliselta, sillä myös kuparin EC-kerroin on suhteellisen suuri. Prosessin alussa olevissa magneettisissa separaattoreissa kuparin määrä on hyvin pieni, mikä vastaa hyvin todellista prosessia.



Kuva 17: Kuparin massaprocentit virtauksissa

Ei-metalleilla tarkoitettiin simuloidussa prosessissa lähinnä muovia ja pölyä, ja ei-metallien ominaisuudet säädettiin vastaamaan kevyttä muovia. Ei-metallien kulkua tarkasteltaessa (Kuva 19) nähdään, että muovia poistuu etenkin tuuliseulan kevyessä virtauksessa ja seulassa, mikä vastaa hyvin prosessikaavion merkintöjä. Toisaalta ei-metallien määrä on varsin suuri myös magneettisissa separaattoreissa. Suurimpana syynä tähän on todennäköisesti se, että piirilevyjen metallit ovat reagoineet magneettiin, jolloin piirilevyjen mukana on mennyt myös alustassa olevaa muovia. Myös syötteen

rautapartikkeleissa muovin määrä oli huomattava (17–19%), minkä vuoksi rautapartikkelien mukana on simulaatiossa aina kulkeutunut myös muovia magneettiseen virtaukseen.



Kuva 19: Ei-metallien massaprocentit virtauksissa

5. YHTEENVETO

Piirilevyt ovat tärkeitä kierrätystuotteita, sillä ne sisältävät runsaasti arvokkaita metalleja, jotka ovat haluttuja raaka-aineita teollisuudessa. Piirilevyjen kierrätyksen haasteena on kuitenkin sen monimutkainen rakenne, jonka vuoksi materiaalien erottaminen toisistaan ei ole yksinkertaista. Tutkielmassa pyrittiin kehittämään piirilevyjen kierrätysprosessille realistinen simulaatiomalli, jonka avulla voidaan tutkia ja analysoida piirilevyjen kierrätysprosessin materiaalivirtauksia. Tätä tietoa voidaan hyödyntää myös piirilevyjen kierrätysprosessien testauksessa ja optimoinnissa sekä yleisesti kierrätyssimulaation kehityksessä.

Tutkielmassa simulaatiota lähdettiin kehittämään mallintamalla murskatut partikkelit, jotka syötettiin partikkeleja erottelevien separaattoreiden läpi. Piirilevyjen kierrätysprosessissa käytettiin partikkelien magneettisuutta, tiheyttä, sähkönsiirtookykyä sekä kokoa tarkastelevia separaattoreita. Kunkin separaattorin todennäköisyysjakaumien parametrit kalibroitiin niin, että separaattoreista lähtevät materiaalivirtaukset vastasivat mahdollisimman hyvin todellisista prosesseista otettujen näytteiden arvoja.

Simuloinnissa massatase täsmäsi tarkasti vuoden 2013 koeajoissa mitatun massataseen kanssa, ja metallien kulku vastasi myös suunnilleen mitattujen näytteiden arvoja. Etenkin raudan, alumiinin ja kuparin arvot saatiin vastaamaan suhteellisen hyvin todellisen kierrätysprosessin näytteiden arvoja. Kierrätysprosessin testauksessa etenkin magneettiset separaattorit ja pyörrevirtaseparaattori erottelivat metallit tehokkaasti laitteille yleisesti tyypillisellä tavalla.

Ei-metalleja ja piirilevyjä sisältävien partikkelien määrä koko materiaalivirtauksesta erosi analysoiduista näytteistä etenkin kierrätysprosessin loppupuolella. Piirilevypartikkeleja esiintyi läpi prosessin enemmän kuin analysoidut näytteet antoivat ymmärtää. Syynä tähän on todennäköisesti se, että piirilevypartikkelien määrä oli yliarvioitu partikkeleja syötettäessä. Simulaatioprosessin alussa partikkelit syötettiin kierrätysprosessiin partikkeliluokittain, mutta partikkeliluokkien massat perustuivat Kuusakoskelta saatuihin estimaatteihin, eivätkä mitattuihin näytteisiin. Syötteessä piirilevypartikkelien

määrä oli yli puolet kaikista prosessiin syötetyistä partikkeleista, minkä vuoksi niitä esiintyi myös materiaalivirtauksissa runsaasti. Lisäksi partikkeliluokissa oli määritelty vain yhdenlaisia piirilevypartikkeleja, vaikka todellisuudessa piirilevyjen partikkelien kompositio saattaa vaihdella hyvinkin paljon. Pienemmät erot ei-metallien tuloksissa johtuvat todennäköisesti myös syötteen määrän ja komposition estimaattien eroista suhteessa todellisuuteen. Koska ei-metalleja, etenkin muovia, sisältyy useampiin partikkeliluokkiin, on hyvin todennäköistä, että tietyt partikkeliluokat saattavat sisältää enemmän tai vähemmän ei-metalleja todellisuudessa kuin kompositioon on määritetty.

Haasteena simuloinnissa oli lähtöaineiston rajallisuus ja epävarmuus. Kuusakoskelta saadut alkuainejakaumien estimaatit vuoden 2015 koeajosta erosivat huomattavasti Kuusakoskella vuonna 2013 analysoiduista vastaavan prosessin näytteistä. Suurimmillaan erot olivat jopa useita kymmeniä prosentteja. Lisäksi kierrätys­simulaatiotutkimuksen uutuuden vuoksi saatavilla ei ollut muita kierrätys­simulaatiomalleja, minkä vuoksi simulaation vertailukohteet puuttuivat. Vaikka partikkelien tutkiminen materiaalivirtauksissa on hidasta, simulaation kannalta yksikin perusteellinen tutkimus edesauttaa simulaation kehitystä merkittävästi. Kun partikkelit on kerran huolellisesti mallinnettu, voidaan näitä partikkeleja käyttää myös tulevaisuudessa aina uudelleen erilaisten prosessien syötteissä.

Tutkielmassa huomattiin, että monimutkaisten kierrätysprosessien simulointi perustuu pitkälti estimointiin, ja yksikäsitteisiä tuloksia on käytännössä mahdoton saavuttaa. Simulaatiossa partikkelien jako partikkeliluokkiin on keinotekoinen – ja myös mineraalien ja partikkelien komposition määrittäminen on tulkinnanvaraista – etenkin ilman näytteiden tarkkaa analysointia. Kierrätysseparaattorien toiminta on käytännössä myös hyvin monimutkaista ja osittain myös sattumaan perustuvaa, minkä vuoksi niiden täydellistä toimintaa on erittäin vaikea mallintaa. Tämän vuoksi luonnollisen kierrätysprosessin mallintaminen numeeriseksi simulaatioksi tulee tehdä askel kerrallaan kehittämällä aina edellistä versiota saatavilla olevan tiedon ja uusien kokeilujen avulla.

Tutkielmassa kehitetty simulaatiomalli on luonut erinomaisen pohjan kierrätys­simulaation kehittämiseksi, mutta jotta simulaatiomallin tuloksiin voitaisiin aidosti luottaa, tar-

vittaisiin useampia tutkimustuloksia piirilevyjen kierrätysprosesseissa kulkevien partikkelien rakenteesta sekä virtausten materiaalijakaumista. Kun syöte ja partikkelit tunnetaan, saadaan arvokasta aineistoa myös murskainten mallintamiseen. Lisäksi separaattorimallien toiminnan kehittäminen yhä useampia partikkelien ominaisuuksia tarkkaileviksi on tärkeä kehityskohde tulevaisuudessa, sillä partikkelien käyttäytyminen separoinnissa perustuu vain harvoin yhteen partikkelin ominaisuuteen. Separaattorimalleista puuttuu tällä hetkellä myös hävikki, joka tulisi olla säädettävissä laitekohtaisesti.

Vaikka piirilevyjen kierrätysprosessin simulointi vaatiikin vielä tarkempia tutkimustuloksia ennen mallin luotettavaa käyttöönottoa, on myös huomioitava, että simulaation kehityksessä onnistuttiin validoimaan simulaatiossa käytettyjen kierrätysseparaattorien toimintaa. Separaattorimalleja käytettiin tutkielmassa ensimmäistä kertaa todellisessa prosessissa, minkä yhteydessä nähtiin, että nykyiset separaattorimallit reagoivat piirilevyjen kierrätysprosessin materiaaleihin niille tyypillisellä tavalla. Tämän ansiosta käytettyjä separaattorimalleja voidaankin yleisesti pitää simulaation kehityksen pohjana myös muissa kierrätysprosesseissa tulevaisuudessa.

LÄHTEET

Balde, C.P., Kuehr, R., Blumenthal, K., Fondeur Gill, S., Kern, M., Micheli, P., Magpantay, E. & Huisman, J. (2015) E-waste statistics. Guidelines on Classification, Reporting and Indicators. United Nations University - Institute for the Advanced Study of Sustainability http://i.unu.edu/media/ias.unu.edu-en/project/2238/E-waste-Guidelines_Partnership_2015.pdf. 21.11.2015

CLEEN Oy, Cluster for Energy and Environment. Arvi (Materiaalien arvovirrat). <http://www.cleen.fi/fi/arvi>. 15.11.2015

European Steel and Alloy Grades (2011-2015) SteelNumber.com
http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=100. 29.1.2016

Gray, T., Whitby, M., Mann, N. Periodictable.com. <http://periodictable.com/index.html>. 29.1.2016

Gupta, Chiranjib Kumar (2003) Chemical Metallurgy: Principles and Practice. Weinheim: Wiley.

Klumpar, I., Currier, F. & Ring, T. (1986) Air Classifiers. Chemical Engineering, March 3, 77–92.
<http://www.che.utah.edu/~ring/Papers/Air%20Classifier%20Article.pdf>. 2.2.2016

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 Journal. Elsevier.
[http://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/13172/Ogunniyi_Chemical\(2009\).pdf?sequence=1](http://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/13172/Ogunniyi_Chemical(2009).pdf?sequence=1). 29.1.2016

Outotec Oyj, HSC Chemistry. <http://www.hsc-chemistry.com/>. 22.11.2015

Saulny, Michael (2015) Piirikorttien käyttäytyminen leikkaavassa murskauksessa ja sen vaikutukset kierrätysprosessiin. Diplomityö. Espoo: Aalto-yliopisto.

Talja, Jyri (2015) Unit Processes in Recycling. Aalto-yliopiston kalvosarja. Heinola: Kuusakoski Oy.

Weiss, N. L. (1985) SME Handbook of Mineral Processing. Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. New York: AIME

Worrell, Ernst & Reuter, Markus (2014) Handbook of Recycling. State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists. Amsterdam: Elsevier.

KUVAT

Valokuvat: Susanna Nevalainen (2015) Kuusakosken koeajo Heinolassa 22.10.2015

Kuvakaappaukset: Susanna Nevalainen (2016) HSC Chemistry 8, Sim-moduuli