



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**MINIPILOT- RIKASTAMON DYNAAAMISESSA  
MALLINNUKSESSA KÄYTETTÄVIEN  
PARAMETRIEN KARTOITUS**

Eetu Heikkinen

Prosessitekniikka

Kandidaatintyö

Marraskuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Minipilot-rikastamon dynaamisessa mallinnuksessa käytettävien parametrien kartoitus

Eetu Heikkinen

Oulun yliopisto, prosessitekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö, marraskuu 2019, 22 s.

Työn ohjaajat yliopistolla: Antti Koistinen & Jari Ruuska

Tässä kandidaatintyössä määritetään Oulu Mining School minipilot-rikastamon jauhatuspiirin dynaamiseen mallinnukseen vaadittavat parametrit ja laitemallit. Mallinnukseen käytetään Aveva DYNOSIM-ohjelmistoa. Työssä tutustutaan rikastamon yksikköprosesseihin, käytettyyn ohjelmistoon sekä sen laitemalleihin ja niiden toimintaan. Tavoitteena on löytää mahdollisimman monta ohjelmiston vaatimaa parametriä tutkimalla minipilot-rikastamolta saatua aineistoa.

Työssä listattiin minipilot-rikastamon jauhatuspiirin dynaamiseen mallinnukseen vaaditut laitemallit ja niiden toiminta. Laitemalleille löydettiin välttämättömät parametrit ja asetukset, jotka antavat perusteet minipilot-rikastamon jauhatuspiirin dynaamisen mallin rakentamiselle. Saatuja tuloksia voidaan hyödyntää aihetta jatkavissa tutkimuksissa, kuten murskauksen tai vaahdotuksen dynaamisessa mallinnuksessa.

*Asiasanat: dynaaminen mallinnus, simulointi, rikastustekniikka, minipilot*

# ABSTRACT

Survey of parameters for dynamic model of minipilot beneficiation plant

Eetu Heikkinen

University of Oulu, Degree Programme of Process Engineering

Bachelor's thesis, November 2019, 22 pp.

Supervisors at the university: Antti Koistinen & Jari Ruuska

The aim of this bachelor's thesis was to determine the parameters and process equipment models for the dynamic grinding circuit model of Oulu Mining School's minipilot beneficiation plant. The modelling is done using Aveva's DYN SIM software. This thesis describes the unit processes of the beneficiation plant and familiarizes the reader with the software and its process equipment models. The aim of the thesis is met by studying materials and information acquired from the minipilot beneficiation plant.

In the thesis, the parameters and the needed process equipment models for the dynamic model of the minipilot beneficiation plant were listed. The necessary parameters and settings were found and listed. The found parameters and settings provide a basis for making a working dynamic model of the minipilot's grinding circuit. The results obtained in the thesis can be used in future research, such as in dynamic model research of the crushing circuit or the flotation circuit.

*Keywords: dynamic modelling, simulation, mineral processing, minipilot*

# SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO .....	5
2 OMS MINIPILOT-RIKASTAMON PROSESSIKUVAUS.....	6
2.1 Yksikköprosessit .....	7
2.1.1 Murskaus.....	7
2.1.2 Jauhatus.....	7
2.1.3 Valmennin ja vaahdotus .....	8
3 DYNAAMINEN SIMULOINTI.....	9
3.1 Aveva DYNOSIM simulointiohjelmisto .....	10
3.2 Ohjelmiston M3 laitemallit .....	11
4 MALLINNETTAVAT LAITTEET JA PARAMETRIT .....	14
4.1 Syöte- ja tuotesäiliö.....	14
4.2 Tanko- ja kuulamyly .....	15
4.3 Ruuviluokitin.....	18
4.4 Kokooja.....	19
5 YHTEENVETO JA POHDINTA .....	21
LÄHDELUETTELO .....	22

# 1 JOHDANTO

Kaivosteollisuuden aiheuttamat vaikutukset ympäristöön ja yhteiskuntaan saa lisääntyvää huomiota. Samalla ihmisten hyvinvointi on riippuvaista maaperästä saaduista raakamateriaaleista, ja kilpailu vedestä ja energiasta on entistä kiivaampaa. Mineraaliresurssien tehokas käyttö varmistaisi raakamateriaalien jatkuvan saatavuuden ja loisi edellytykset tasapainoiselle ja kestäväälle kehitykselle. Nämä haasteet vaativat innovatiivisia teknologisia ratkaisuja kaikkiin mineraalien rikastusprosessien vaiheisiin, jotta prosessien tehokkuus paranisi. (Pirjo Seppälä *et al.* 2014) Yleensä rikastusprosessin suurin energian kuluttaja on jauhatusvaihe. Se voi viedä jopa 50% rikastamon energian kulutuksesta. (Wills 2005)

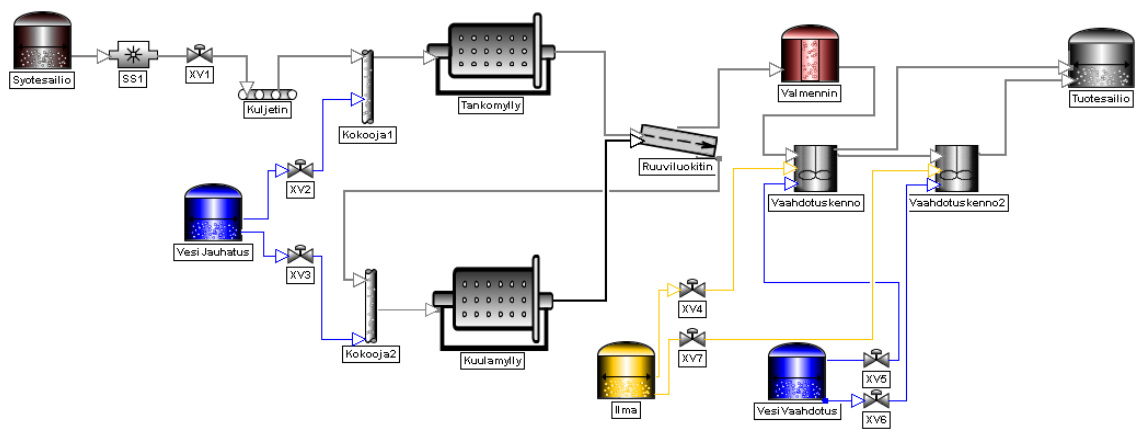
Yksi työkalu kaivosteollisuuden kehittämiseksi on prosessien mallinnus. Riippuen tarkoituksesta, prosessit voidaan mallintaa joko ajasta riippumattomina tai dynaamisissa olosuhteissa. (Ruuska *et al.* 2012) Luotuja mallinnuksia voidaan hyödyntää tutkimus- ja kehitystyössä, suunnittelussa, optimoinnissa ja prosessien ohjauksessa. (Pirjo Seppälä *et al.* 2014)

Työn tarkoituksena on määrittää Oulu Mining Schoolin minipilot-rikastamon dynaamiseen mallinnukseen tarvittavat parametrit ja laitemallit. Mallinnus toteutetaan Aveva DYNOSIM-ohjelmistolla. Työssä tutustutaan ohjelmiston toimintaan ja laitemalleihin, sekä kuinka ohjelmistolla voidaan mallintaa Oulu Mining Schoolin minipilot-rikastamon jauhatuspiiriä. Työssä tarkastellaan laitoksella käytettyjä laitteita ja aikaisempien koeajojen tuloksia, joista määritetään mallinnukseen tarvittavat parametrit.

## 2 OMS MINIPILOT-RIKASTAMON PROSESSIKUVAUS

Oulu Mining School (OMS) minipilot-rikastamo on jatkuvatoiminen, automatisoitu ja modulaarinen minipilot-kokoluokan vaahdotusrikastamo, joka kykenee käsittelemään noin 30 kilogrammaa malmia tunnissa. Minipilot-rikastamo on rakennettu perustuen Pyhäsalmen kaivoksen rikastamoon suhteessa 1:5000. (Harto Veijola 2014)

Ennen kuin malmia pystytään käsittelemään OMS minipilot-rikastamolla, se täytyy olla murskattu. Minipilotille lähetetty malmimurska seulotaan haluttuun partikkelikokoon, ennen kuin se syötetään jauhatuspiiriin syöttösiiloon. (Harto Veijola 2014) Jauhatuksessa pyritään irrottamaan arvokkaat mineraalit arvottomasta sivukivestä, jotta ne voidaan erottaa toisistaan vaahdotuksessa. Ensisijaisena laitteena jauhatuksessa toimii tankomylly, minkä tuote ohjataan ruuviluokittimelle. (Pirjo Seppälä *et al.* 2016) Minipilotilla on käytettävissä myös hydrosykloni luokitusta varten. (Markku Ohenoja *et al.* 2018). Luokituksesta alitteena saatava karkea liete ohjataan kuulamylyyn sekundääriseen jauhatukseen, josta edelleen ruuviluokittimelle. Ylitteenä saatava hienojakoinen tuote johdetaan valmentimeen. Valmennin toimii prosessissa kemikaalien sekoitusastiana ja lietteen ominaisuuksien mittauspisteenä vaahdotuksen optimoimiseksi. Vaahdotuksessa halutut mineraalit erotetaan sivukivestä. Ylitteenä syntyvä vaahto sisältää halutun malmirikasteen. Alite voidaan johtaa sekundääriseen vaahdotukseen, jossa erotetaan muita mineraaleja sivukivestä. (Pirjo Seppälä *et al.* 2016) Prosessikaavio on esitetty kuvassa 1.



**Kuva 1.** DYNسیم -ohjelmistolla luotu prosessikaavio.

## 2.1 Yksikköprosessit

Rikastusprosessit koostuvat periaatteellisesti kahdesta eri vaiheesta: arvokkaiden mineraalien vapautuksesta arvottomasta sivukivestä ja mineraalien erottamisesta sivukivestä. Mineraalien vapautus tapahtuu materiaalin murskauksella ja jauhatuksella, joilla on omat yksikköprosessinsa. Vapautettujen mineraalien erotusta sivukivestä kutsutaan rikastamiseksi. Rikastuksella on myös erilaisia yksikköprosesseja, joilla erotus pystytään tekemään. (Wills 2005) Seuraavissa kappaleissa käsitellään OMS minipilot-rikastamolla käytettyjä yksikköprosesseja sekä yksikköprosesseja, joita siellä on mahdollista käyttää.

### 2.1.1 Murskaus

Murskaus on prosessin ensimmäinen mekaaninen vaihe, missä päätarkoitus on aloittaa arvokkaiden mineraalien erotus sivukivestä murskaamalla syöte pienemmiksi partikkeleiksi. (Wills 2005). Murskaus käsittelee malmista mahdollisimman tasalaatuista ja raekooltaan pientä syötettä jauhinmyllylle. Murskattu malmi voidaan seuloa ennen jauhatusta halutun suurimman reakoon mukaan. (Pirjo Seppälä *et al.* 2014)

Yleisimpiä teollisuudessa käytettyjä murskaimia ovat leuka- ja kartiomurskaimet, joista leukamurskaimet toimivat useimmin primäärisenä murskaimena ja kartiomurskaimet sekundäärisenä. Leukamurskainten toimintaperiaate on yleisesti yksinkertainen. Laite koostuu kahdesta levystä, kiinteästä ja akseliin kiinnitetystä, joista akselin varaan kiinnitetty saatetaan liikkeeseen toista vastaan, jolloin syntyy murskaimelle ominainen leukamainen liike. Karkea syöte johdetaan murskaimen yläpäähän, missä se hajoaa liikkeen voimasta pienemmiksi partikkeleiksi. Kartiomurskain koostuu metallisesta kartiosta, joka on kiinnitetty pystyakseliin. Pystyakseli on kiinnitetty epäkeskholkkiin, niin että se kykenee pyörimään oman akselinsa ympäri. Epäkeskholkki saa aikaan kartiomaisen liikkeen murskaimen vaipan sisäpintaa pitkin, joka edelleen luo paineen materiaaliin ja hajottaa sen pienempiin partikkeleihin. (Wills 2005).

### 2.1.2 Jauhatus

Jauhatuksessa jatketaan partikkeleiden koon pienentämistä iskuvoimien, puristuksen ja hiertymisen yhteistekijänä, kuivana tai veden läsnä ollessa. (Wills 2005). Minipilotilla

jauhatuksen primäärimyllynä toimii tankomylly, johon syötetään kuivan materiaalin lisäksi vettä. (Pirjo Seppälä *et al.* 2016) Tankomylly jauhaa partikkelit pienemmiksi pyörivän vaipan ja sen sisällä olevien metallisten tankojen avulla. Tangot pyörivät vaipan mukana tiettyyn pisteeseen saakka, kunnes painovoima tiputtaa ne seinämää pitkin alas. Tankojen liike ja partikkelien osuminen seinämää vasten saa aikaan malmipartikkelien hienontumisen. (Wills 2005). Tankomyllyn tuote pumpataan ruuviluokittimelle luokitukseen. Luokitin erottaa lietteen raekoon perusteella ylitteeksi ja alitteeksi. Luokittimen alitteena saatava, raekooltaan liian karkea liete johdetaan kuulamylyyn sekundääriseen jauhatukseen. (Pirjo Seppälä *et al.* 2016)

Kuulamylyn toimintaperiaate on sama kuin tankomyllyllä, mutta siinä käytetään tankojen sijasta metallisia kuulia. Kuulia käytetään, koska niiden pinta-ala on suurempi painoa kohden ja siksi ne soveltuvat hienojauhatukseen paremmin. (Wills 2005) Kuulamylystä saatava tuote pumpataan takaisin ruuviluokittimelle. Luokittimen ylitteenä saadaan hienompijakeista tuotetta johdettavaksi valmentimeen. (Pirjo Seppälä *et al.* 2016)

### **2.1.3 Valmennin ja vaahdotus**

Valmentimella tarkoitetaan mineraalilietteen kemikaalista esikäsitteilyä vaahdotusta varten. Käsitteilyllä pyritään saamaan mineraaleille mahdollisimman hyvät lähtökohdat ja tarpeeksi aikaa reaktioille, jotka ovat haluttuja vaahdotuksessa. (Harto Veijola 2014) Vaahdotuksen tehtävänä on erottaa haluttu mineraali sivukivestä. Vaahdotus on fysikaaliskemiallinen erotusprosessi, joka hyödyntää mineraalipintojen erilaisia ominaisuuksia. Haluttu mineraali nostetaan ilman, kemikaalien ja veden avulla vaahtona pois vaahdotuskennoista, jolloin vaahdotuskennon pohjalle, alitteeksi jää arvoton sivukivi. (Wills 2005). Minipilotilla on käytettävissä 4 kappaletta 16 l vaahdotuskennoja, 6 kpl 4 l kennoja, sekä 3 kpl 8 l kennoja. Kennojen järjestys voidaan valita niin, että se vastaa halutulle syötemateriaalille räätälöityä vaahdotusprosessia. (Pirjo Seppälä *et al.* 2016)



### 3 DYNAAMINEN SIMULOINTI

Simulaatio sanaa käytetään toiminnoista, joita käytetään mallinnettaessa prosessin toimintaa ajamatta sitä. Näihin toimintoihin lukeutuu useita eri tapoja, mutta tietokoneilla tuotetut simulaatiot ovat tehokkaimpia työkaluja simulointien suorittamiseen. Ohjelmistot matkivat prosessin toimintaa ja antavat käyttäjälleen tietoa, kuinka prosessi käyttäytyy erilaisissa tilanteissa. Simulaatioita käyttämällä prosessista voidaan löytää monia heikkouksia, altistamatta oikeaa prosessia kokeellisille olosuhteille. (R. P King 2001) Simulaatioiden perusta on malleissa, mitkä kuvaavat prosessimuuttujien välisiä vuorovaikutuksia. Mallien tyypit ja rakenteet ovat erilaisia riippuen niiden käyttökohteesta. Staattiset mallit kuvaavat jatkuvatilasta prosessien käyttäytymistä. Staattiset mallit ovat hyödyllisiä prosessien suunnittelussa ja optimoinnissa. Dynaamiset mallit sen sijaan kuvaavat ajasta riippuvaista prosessin käyttäytymistä, ja niitä voidaan hyödyntää esimerkiksi prosessien ohjauksen suunnitteluun. (Pirjo Seppälä *et al.* 2016)

Dynaamiset systeemit ovat kokoelma toisiinsa vaikuttavia komponentteja ja voimia, jotka tuottavat jonkinlaisen käyttäytymisen, jota voidaan tarkastella ajan jaksoina. Yleisesti systeemit ovat luonnostaan monimutkaisia kokonaisuuksia, joten mallinnukset ja simulaatiot ovat välttämättömiä, jotta saamme näkemyksen niiden ominaisuuksista ja toiminnoista. (Brita L.G 2013) Dynaamiset systeemit ovat yleisesti esitetty differentiaali- tai differenssiyhtälöillä. (Pirjo Seppälä *et al.* 2014)

Digitaaliset simulointiohjelmistot ovat tehokkaita työkaluja ratkaisemaan matemaattisia yhtälöitä, jotka mallintavat tarkasteltavaa systeemiä. Digitaaliset simulointiohjelmistot käyttävät tunnettuja algoritmeja systeemiä kuvaavien yhtälöiden ratkaisuun. (William L.Luyben 1973)

Rikastuslaitokset ovat kokoelma yksikköprosesseja, jotka ovat yhteydessä toisiinsa prosessivirroilla, jotka siirtävät materiaalia yksikköprosessista toiseen. Laitoksen käyttäytyminen riippuu yksikköprosessien ja prosessoidun materiaalin ominaisuuksista. Simulaatiot yksinkertaistavat laitoksen yksikköprosesseja, jotta ne saadaan joukoksi matemaattisia funktioita, joita simulointiohjelmistot pystyvät käsittelemään. (R. P King 2001)

### 3.1 Aveva DYNMIM simulointiohjelmisto

Aveva DYNMIM -ohjelmistolla kytään rakentamaan realistisia, dynaamisia malleja halutuista yksikköprosesseista ja prosessikokonaisuuksista. Ohjelmiston simulaatio perustuu erilaisten materiaalien ja aineiden käyttäytymiseen, kun niihin vaikuttaa prosessilaitteen tuottamat paine-erot, termo- ja virtausdynaamiset muutokset, sekä laitteen tuottama mekaaninen työ. Ohjelmistossa voidaan valita, mitä vaikuttavia voimia seurataan ja millä matemaattisella mallilla muutoksia kuvataan. Ohjelman käytön tarkoituksena on helpottaa prosessin suunnittelua, säätöjärjestelmien valintaa ja operaattoreiden valmentamista, sekä turvallisuuden että kokonaisprosessin parantamista. (DYNMIM Training Manual)

DYNMIM käyttää neljää erilaista virtausta kuvatessaan prosessia ja laitemallien vaikutusta systeemiin. Virtaukset ovat: prosessi-, lämpö-, mekaanisia ja sähkövirtauksia. Laitemallit muokkaavat ohjelmiston kuvaamaa virtausta asetetuilla parametreilla ja asetuksilla. Ohjelmistossa prosessivirtaus kuvaa aineen liikettä ja sen ominaisuuksia systeemissä. Simulaatiossa prosessivirtaus saa alkunsa, kun komponentti, esimerkiksi syötesäiliö, tuottaa paineen systeemiin ja virtausta kuvaava komponentti, kuten venttiili tai putkisto reagoi siihen. Laitemallit kuvaavat systeemiin ja prosessivirtaukseen kohdistuvia muutoksia paineen muutoksina, termodynaamisina muutoksina, virtauksen muutoksina tai virtauksessa olevien partikkelien ominaisuuksien muutoksina. Laitemallit mallintavat myös kemiallisia reaktioita. Ohjelmiston lämpövirtaus kuvaa lämpöenergian siirtoa, esimerkiksi lämmönvaihtimesta tislauskolonnin syötteeseen. Tämä virtaus vaikuttaa prosessivirtauksen tai komponentin toimintaan ja ominaisuuksiin. Mekaaninen virtaus kuvaa komponentin, esimerkiksi moottorin tekemää työtä toiseen komponenttiin, kuten pumppuun. Mekaanisen virtauksen käyttö ei ole simulaatioissa välttämätöntä, mutta sen käyttö antaa tarkemman kuvan koko systeemistä ja sen heikkouksista. Ohjelmistossa voidaan myös simuloida sähkövirtoja, mikä mahdollistaa mekaanisten virtausten kanssa sähkökatkosten simuloiminn. (DYNMIM Training Manual)

Ohjelmiston laitemallikirjasto sisältää useita kokonaisuuksia, joista tässä työssä käytetään pääasiassa M3-laitemalleja. M3 on lyhenne englanninkielien sanoista mining, metals ja minerals. Vain nämä laitemallit kykenevät mallintamaan ja seuraamaan

kiinteiden komponenttien partikkelikokojakaumaa ja massaosuuksia, jotka ovat välttämättömiä mallinnettaessa rikastusprosessia. M3-laitemallit käyvät yhteen vain virtauksia kuvaavien laitemallien kanssa, kuten venttiilien ja putkien kanssa. M3-laitemallit käyttävät muokattua M3-prosessivirtausta, mikä kykenee seuraamaan partikkelikokojakaumaa ja massaosuuksia. Käytetyille laitemalleille voidaan rakentaa säätö- ja ohjauspiirejä, joille on annettu niiden toimintaa kuvaavat mallit. Säätö- ja ohjauspiirit käyvät yhteen kaikkien laitemallien kanssa. (DYN SIM<sup>®</sup> Dynamic Simulation M3 User Guide)

### 3.2 Ohjelmiston M3 laitemallit

Syötesäiliö (source) kuvaa systeemiin tulevaa materiaalivirtaa. Ohjelmisto kuvaa syötteen systeemiin kohdistettuna paineena. Laitemalli toimii vain, kun sille on määritetty prosessin lähtöaineet. Kiinteiden aineiden mallinnuksessa lähtöaineille täytyy määrittää partikkelikokojakauma sekä niiden osuus kokonaissyötteestä. Syötesäiliö voi toimia myös vastavirtaisena eli materiaali voi kulkea takaisin, jos systeemiin ei kohdistu tarpeeksi korkeaa painetta. Syötesäiliötä voidaan myös käyttää tuotesäiliönä (sink), kun siihen on liitetty vähintään yksi tulovirtaus.

Kokooja (header) kokoaa kaksi tai useampaa virtausta yhdeksi virtaukseksi. Laitemallia voidaan käyttää myös virtauksen jakajana, joka jakaa yhden virtauksen kahdeksi tai useammaksi virtaukseksi, joilla on samat ominaisuudet. Tällä laitemallilla voidaan käsitellä kokoonpuristuvia ja kokoon puristumattomia virtauksia.

Erotuskolonne (drum) kuvaa paineen avulla tapahtuvia neste-kaasuerotuksia. Se kykenee kuvaamaan tarkkoja kahden tai kolmen faasin erotuksia. Ohjelmassa kaasu ja neste ovat aina tasapainotilassa ja samassa lämpötilassa. Laitemalli kuvaa aineita kokoonpuristuvina, mutta jos se täytetään nesteellä ohjelma vaihtaa aineiden kuvauksen kokoon puristumattomiksi. Ohjelma kykenee kuvaamaan kolonnissa tapahtuvia termodynaamisia muutoksia.

Jauhatusmylly (mill) kuvaa kuula-, palamalmi-, autogeeni-, ja semiautogeenimyllyjä. Laitemalli mallintaa syötetyn materiaalin rakenteen hajoamista, kun siihen vaikuttaa määritetty jauhinkappale. Laitemalli käsittelee jauhinkappaleet kuulina tai

palamalmeina. Kuulamyllyssä jauhatukseen vaikuttaa vain kuulien ominaisuudet ja palamalmimyllyssä jauhatukseen vaikuttaa vain palamalmien ominaisuudet. Autogeenimyllyssä ei vaikuta kumpikaan ja semiautogeenimyllyssä vaikuttaa molemmat. Tankomyllyt voidaan mallintaa ohjelmassa kuulamyllyinä.

Murskain (crusher) kuvaa annetuilla parametreilla todennäköisyyttä, jolla syötetty materiaali tulee hajoamaan pienemmiksi partikkeleiksi, kun siihen vaikuttaa mekaaninen voima. Se käsittelee materiaaleille määritettyjä murtumisvoimia.

Säiliö (tank) kuvaa painetta syöte- ja tuotesäiliön tavoin. Se pystyy käsittelemään vain nesteitä ja kiinteitä aineita eli systeemissä olevat höyryt ja kaasut häviävät säiliössä. Säiliö käsittelee aineet kokoonpuristumattomina. Simulaatiossa säiliö voi täytyä yli, jolloin ohjelma kuvaa ylitteen paineen ja materiaalin häviöinä. Laitemalli pystyy kuvaamaan säiliössä tapahtuvia termodynaamisia muutoksia.

Hydrosykloni (hydrocyclone) kuvaa suspensiossa tapahtuvia aineen erotuksia, kun suspensioon vaikuttaa keskipakovoima.

Vaahdotusallas (flotation) kuvaa monimutkaista yksikköprosessia kahdella eri mallilla: vaahdotuksen suhdemallilla ja vaahdotuksen faasimallilla. Vaahdotuksen suhdemalli kuvaa vaahdotusta partikkelipitoisuuden ( $N$ ) ja vaahdotus suhteen ( $k$ ) funktiona. Faasimallissa käytetään neljää eri faasia: kaasu, vaahdon kuplat, vaahdon sisältämä neste ja liete. Laitemalli laskee faasien pitoisuudet annetulla syötteellä. Faasimalli käy läpi vaahdotuksen eri vaiheet ja laskee faasien muutokset ja faasien sisältämät partikkelijaot. Tähän laitemalliin on syytä tutustua tarkemmin DYNOSIM:in sisäisestä oppaasta.

Seula (screen) kuvaa syötetyn materiaalin käyttäytymistä määritetyssä seulassa. Seula voi olla liikkumaton tai tärisevä. Horisontaalinen, kaartuva tai kalteva. Se voi käsitellä märkää tai kuivaa syötettä.

Kuljetin (conveyor) kuvaa yleisesti käytettyjä kuljetuslaitteita, hihna-, ruuvi-, palautus-, nosto- ja jakokuljettimia. Laitemalli voidaan asettaa toimimaan muuttuvalla tai vakio nopeudella.

Venttiili (valve) kuvaa virtaukseen tapahtuvia muutoksia riippuen venttiilin simuloidusta asennosta. Se pystyy kuvaamaan kokoonpuristuvia ja kokoonpuristumattomia virtauksia.

Vapautusventtiili (relief valve) toimii normaalin venttiilin tavoin, mutta sille voidaan asettaa tietty paineen arvo, jolla komponentti kuvaa paineen laskua systeemissä. Komponentti voidaan liittää esimerkiksi säiliön yhteyteen.

Putki (pipe) kuvaa materiaalivirtaa putkistossa ja sen vaikutuksia virtauksen ominaisuuksiin. Ohjelmisto pystyy laskemaan putkistossa tapahtuvia kemiallisia reaktioita.

Pumppu (pump) toimii virtauslaitteena, jolle voidaan määrittää tarkka pumppukäyrä. Laitemallilla on kolme toimintatapaa: normaalipumppu, vesiturbiini ja käänteinen virtaus. Käänteisellä virtauksella tarkoitetaan tilannetta, jossa pumpulla ei ole tarpeeksi tehoa liikuttaa materiaalia painetta vastaan. Pumppua käytetään ohjelmistossa, jos systeemin simulaatio sisältää putkistoja, jossa materiaali tarvitsee painetta liikkuaan.

Kompressori (compressor) kuvaa keskipakokompressoria. Komponentille voidaan määrittää tarkka toimintakäyrä, kuten pumpulle. Se toimii neljällä eri alueella, normaali, suihkuvirtaus, massavirtaus ja vastavirtaus.

Lämmönvaihdin (heat exchanger) kuvaa yksiseinäistä kaksiputkilämmönvaihdinta, jossa liikkuu kaksi virtaa. Laitemalli vaikuttaa vain ohjelmiston lämpövirtoihin.

(DYNSIM<sup>®</sup> Dynamic Simulation M3 User Guide)

## 4 MALLINNETTAVAT LAITTEET JA PARAMETRIT

Mallinnuksessa käytetään vain kiinteiden aineiden käsittelyyn sopivia laitemalleja, jotka ovat M3-kirjastosta. Näiden laitemallien kanssa voidaan käyttää lisäksi vain virtausta kuvaavia ja siihen vaikuttavia komponentteja. OMS minipilot-rikastamon toimintaa simuloidaan ilman murskausta, jolloin syöteen partikkelikokojakauma täytyy määrittää murskatusta materiaalista ennen jauhatuspiiriä. Jos murskausta simuloidaan, käytetään M3-murskainta ja sille määritetään tarvittavat parametrit.

Luotuun simulaatioon tulee määrittää lähtöainekirjasto, josta ohjelmisto lukee mitä aineita on käytettävissä, sekä millä matemaattisilla malleilla niitä käsitellään. Simulaatioon tulee määrittää myös käytetyt yksiköt. M3-laitemalleille täytyy määrittää kiinteiden lähtöaineiden partikkelikokojakauma, jotta laitemallit kykenevät seuraamaan niiden muutosta systeemissä. Partikkelikokojakauma luodaan ohjelmaan pistevektoriksi (pointvector). Pistevektoreiden toimintaan tulee tutustua DYNMIM:in sisäisestä oppaasta. Lähtöainekirjasto ja partikkelikokojakauma ovat muuttuvia kokonaisuuksia riippuen minipilotilla prosessoidusta malmista, joten ne täytyy määrittää aina käytettyä malmia vastaavaksi.

Seuraavissa kappaleissa on esitetty laitemallien vaatimat parametrit. Kappaleiden taulukoihin on merkitty työssä löydetty parametrit sekä suositellut asetukset.

### 4.1 Syöte- ja tuotesäiliö

Prosessin syötesäiliöä mallinnetaan M3-syötesäiliöllä. Partikkelikokojakauma tulee määrittää aina laitemallia käytettäessä. Jos M3-syötesäiliöön on yksikin syötevirtaus, se toimii tuote- tai välisäiliönä. Säiliöiden jälkeen prosessivirtaukseen on asetettava venttiili tai virtauksen asetin (stream set), jotka voidaan säätää manuaalisesti haluttuun asentoon tai liittää säätöpiiriin. Tuotesäiliölle voidaan käyttää samoja parametrejä ja asetuksia kuin syötesäiliölle.

Syöte- ja tuotesäiliön parametrit	Arvo	Yksikkö
Lähtötiedot:		
Raja-arvot	Pressure-Temperature	

Arvo 1 (paine)	101,32	[kPa]
Arvo 2 (lämpötila)	298	K
Komponentti konfiguraatio	CALC_PSD_COMP	
Komponenttien yksikkö	Mass	
Lähtöaine luettelo		[kg]
Säiliön suhteellinen korkeus	0	[m]
Partikkelien ominaisuudet:		
Partikkelikoko määrä		
Kiinteiden aineiden määrä		
Partikkelikokojakauma	Viittaus luotuun pistevektoriin	
Partikkelien määrittäminen:	PSD_00_[0] ...	
	PSD_nn_[n]	
Termodynaamiset valinnat:		
Komponentti taso	Luotu COMPONENT SLATE	
Menetelmä	DEFAULT	
Paikalliset termodynaamiset valinnat	DEFAULT	
Paikalliset paisuntahaihdutus valinnat	DEFAULT	

## 4.2 Tanko- ja kuulamyly

Jauhatuspiirin tankomylyä ja kuulamylyä mallinnetaan samalla monimuotoisella M3-jauhatusmyllyllä. Tämä laitemalli on suunniteltu tukemaan kuula-, palamalmi-, autogeeni- ja semiautogeenimylyjä. Parametreilla ja asetuksilla laitemalli saadaan haluttua yksikköprosessia vastaavaksi. M3-jauhatusmylly vaatii prosessoidun materiaalin hajoamisfunktion arvot. Ohjelmistossa käytettyyn hajoamisfunktiioon voi tutustua DYNMIM:in sisäisestä oppaasta. Hajoamisfunktion arvot on materiaalista riippuvaisia, joten niitä ei ole tässä työssä määritetty. Suositeltavaa on kuitenkin kokeilla DYNMIM:in antamia asetusarvoja hajoamisfunktiolle.

Koska M3-jauhatusmylyä ei ole suunniteltu simuloimaan tankomylyä, sen simulointi pitää suorittaa kuulamylyn asetuksilla. Tämä johtaa simuloinnissa kokeiluun, jotta löydetään sopivat parametrit kuvaamaan tankomylyn jauhatuseriaalia.

Kuulamylyn vaatimat ja työssä saadut parametrit on esitetty seuraavassa taulukossa. Samat parametrit sopivat tankomylylle, lukuun ottamatta jauhatuseriaalin

dimensioita. Saadut arvot valittiin (Pirjo Seppälä *etal.* 2014) artikkelin, sekä minipilot-rikastamolta kerättyjen tietojen mukaan.

Kuulamylyn parametrit	Arvo	Yksikkö
Geometria:		
Myllyn sisähalkaisija	0,5	[m]
Päätyjen aukon halkaisija		[m]
Myllyn sylinterin pituus	0,635	[m]
Myllyn keskilinjan pituus	0,635	[m]
Lähtötiedot:		
Myllytyyppi	Ball Mill Type	
Tuotteen ulostulo	Overflow Exit Type	
Rajapaine	101,32	[kPa]
Lämmönsiirtokerroin ympäristöön	1	[kW/m <sup>2</sup> *K]
Myllyn suhteellinen korkeus	0	[m]
Staattiset hajoamisfunktion arvot:		
Empiirinen hajoamisarvo (Alpha)	DEFAULT	
Empiirinen parametri (Lambda)	DEFAULT	
Materiaalin itsehajoamis arvo (Ks)	DEFAULT	
Syötteen kovuuskerroin (Kh)	DEFAULT	
Materiaalin hajoamiseen vaadittava työ	DEFAULT	[kW- hr / ton]
Jauhatusmateriaalin tilavuusosuus lietteestä	DEFAULT	
Parametri jauhatusmateriaalille (K0, K1)	DEFAULT	
Empiirinen arvo hajoamiskertoimelle (Mu0, Mu1)	DEFAULT	
Empiirinen parametri (N1, N2)	DEFAULT	
Ulosvirtauksen arvot:		
Ritilän kokonaispinta-ala (ApArea)		[m <sup>2</sup> ]
Ritilöiden suhteellinen säteen suuntainen sijoitus (Gamma)		
Ulosvirtaamattoman lietteen osuus (JfracDead)		
Ulosvirtauksen skaalausarvo, ilman jauhatusmateriaalia (KAG)		
Skaalausarvo kokonaisulosvirtaukselle ritilän kanssa (Kgrate)		
Ritilän määrittäminen:		
Teoreettinen jauhatusmateriaalin (1) syötön avoin alue (KFP)		[m <sup>2</sup> ]
Lietteen partikkelikoon maksimi (KXM)		[m]
Ritilöiden aukon koko (KXG)		[m]
Palamalmien syötön aukon koko (KXP)		[m]



Myllyn käyttämä voima:		
Voiman laskennan kalibrointi vakio (KMW)		
Jauhatusmateriaali määritys kuulille (0) ja palamalmille (1):		
Syötetyn materiaalin halkaisija (0) D0	0,0336	[m]
Massa tiheys jauhatusmateriaalille (0) (Rmass0)	7,8	[kg/m <sup>3</sup> ]
Vakio jahautusmateriaalin kulumiselle (0) (Kwear0)		[kWh/to n]
Myllystä poistuvan jauhatinmateriaalin koon keskiarvo (0) (D0Scrap)		[m]
Syötetyn materiaalin halkaisija (1) (D1)	0	[m]
Massa tiheys jauhatusmateriaalille (1) (Rmass1)	0	[kg/m <sup>3</sup> ]
Vakio jauhatusmateriaalin kulumiselle (1) (Kconsume1)	0	[1/s]
Referenssiasteikko:		
Akselin pyörimisnopeus (SpeedRef)		[rpm]
Myllyn täytön tilavuusosuus (JfracRef)		
Kappaleiden välien täytön osuus (UfracRef)		
Referenssi halkaisija jauhatinmateriaalille (0) (D0Ref)		[m]
Referenssi halkaisija jauhatinmateriaalille (1) (D1Ref)		[m]
Testimyllyn parametrit:		
Myllyn sisähalkaisija	0	[m]
Jauhatinmateriaalin (0) halkaisija	0	[m]
Jauhatinmateriaalin (1) halkaisija	0	[m]
Kuormitus osuus	0	
Testimyllyltä saadun tiedon nopeus	0	[rpm]
Testimyllyn nopeus	0	[rpm]
Malmin työ indeksi	0	[kW hr /ton]
Partikkelien ominaisuudet:		
Partikkelikoko määrä		
Kiinteiden aineiden määrä		
Partikkelikokojakauma	Viittaus pistevektoriin	
Partikkelien määritys:	PSD_00_[0] ...	
	PSD_nn_[n]	
Termodynaamiset valinnat:		
Komponentti taso	Viittaus luotuun tasoon	
Menetelmä	DEFAULT	
Paikalliset termodynaamiset valinnat	DEFAULT	
Paikalliset paisuntahaihdutus valinnat	DEFAULT	

### 4.3 Ruuviluokitin

Ruuviluokitinta mallinnetaan M3-seulalla. Jos luokittimessa olevan materiaalin viivettä ennen seuraavaa yksikköprosessia mallinnetaan, luokittimen eteen on liitettävä M3-kuljetin. Ruuviluokittimen mallin ominaisuudet täytyy määrittää aina halutun raekoon mukaan. Tässä työssä saadut arvot valittiin (Pirjo Seppälä *et al.* 2014) artikkelin, sekä minipilot-rikastamolta kerättyjen tietojen mukaan.

Laitemallin vaatimien Karra-mallin ja Plitt'in yhtälön sovitus parametreihin voi tutustua paremmin DYNM:n sisäisessä oppaassa. Niiden arvoina voi käyttää ohjelmiston asetusarvoja. Jos asetusarvot eivät ole simulaatioon sopivia, ne täytyy määrittää laskemalla tai kokeilemalla. Luokittimen pinta-alan ja tilavuuden arvot ovat suosituksia, joten niitä tulee säätää tarpeen mukaan.

Ruuviluokittimen vaatimat ja työssä saadut parametrit on esitetty seuraavassa taulukossa:

Ruuviluokittimen parametrit	Arvo	Yksikkö
Geometria:		
Pinta-ala	1	[m <sup>2</sup> ]
Tilavuus	1	[m <sup>3</sup> ]
Seulan aukon koko	8,0×10 <sup>-5</sup>	[m]
Määrittely:		
Perus tilavuus	1	[m <sup>3</sup> ]
Tyhjä osuus pakatusta pedistä	0,05	
Nesteen osuus ylitteestä	n.80	vol-%
Parametrejä:		
Karra mallin sovitus parametri		
Plitt'in yhtälön sovitus parametri		
Paineen laskenta:		
	Explicit	
Raja-arvot:		
Paine	101,32	[kPa]
Suhteellinen korkeus	0	[m]
Partikkelien ominaisuudet:		
Partikkelikoko määrä		

Kiinteiden aineiden määrä		
Partikkelikokojakauma	Viittaus luotuun pistevektoriin.	
Termodynaamiset valinnat:		
Komponentti taso	Viittaus luotuun tasoon	
Menetelmä	DEFAULT	
Paikalliset termodynaamiset valinnat	DEFAULT	
Paikalliset paisuntahaihdutus valinnat	DEFAULT	

#### 4.4 Kokooja

Veden syöttö prosessin eri vaiheisiin mallinetaan erillisellä M3-syötesäiliöllä, josta vesivirtaus johdetaan M3-kokoojaan pääprosessivirtauksen kanssa. Kokoojasta yhdistetty virtaus liitetään haluttuun yksikköprosessiin. Kokoojan geometrian määrittämisessä käytetään lähtökohtaisesti DYNMIM:in asetusarvoja. Kokoojan parametrit on syytä pitää mahdollisimman yksinkertaisina, koska siinä liitetään prosessiin vain vettä ja prosessissa ei ole kemiallisia reaktioita. Jos asetusarvoilla luotu simulaatio ei kuvaa prosessia tarpeeksi hyvin, uudet arvot määritetään kokeilemalla. Kokeilu on välttämätöntä, koska minipilot-rikastamon prosessissa ei ole tämänkaltaista kokoojaa.

Kokoojan parametrit	Arvo	Yksikkö
Geometria:		
Geometrian määrittely	Derived	
Tilavuus	1	[m <sup>3</sup> ]
Lämmönsiirto pinta-ala	25	[m <sup>2</sup> ]
Metalli massa	1000	[kg]
Suhteellinen korkeus		
	0	[m]
Lämmönsiirto:		
Lämmönsiirtokerroin	0	
Luonnollisen konvektion lämmönsiirtokerroin	0	[kW/m <sup>2</sup> *K]
Pakotetun konvektion lämmönsiirtokerroin	0	[kW/m <sup>2</sup> *K]
Pakotetun konvektion aineen siirtyminen	0	[kg/sec]
Reaktioiden laskeminen		
	Disable	

Ratkaisujen valinnat:		
Paineen laskenta	Simultaneous	
Nesteiden käsittely	Default	
Tasapaino valinta	Mass	
Raja-arvojen määrittely:		
Raja-arvot	None	
Arvo 1 (paine)	101,32	[kPa]
Arvo 2 (lämpötila)	298	[K]
Käyttöönotto:		
Määritä syötesäiliö		
Ulkoiset vaikuttavat voimat:		
Nesteeseen vaikuttava lämpö	0	[kJ/sec]
Ulkoinen lämpötila	TAMBIENT	
Partikkelien ominaisuudet:		
Partikkelikoko määrä		
Kiinteiden aineiden määrä		
Partikkelikokojakauma	Viittaus luotuun partikkelikokojakaumaan	
Termodynaamiset valinnat:		
Komponentti taso		
Menetelmä	DEFAULT	
Paikalliset termodynaamiset valinnat	DEFAULT	
Paikalliset paisuntahaihdutus valinnat	DEFAULT	

## 5 YHTEENVETO JA POHDINTA

Kandidaatintyön aiheena oli selvittää OMS minipilot-rikastamon jauhatuspiirin dynaamiseen mallinnukseen vaadittavat parametrit. Työssä tutustuttiin Aveva DYNOSIM-ohjelmistoon, sen laitemalleihin ja kuinka niillä kyetään simuloimaan minipilot-rikastamon prosessia. Työssä pyrittiin löytämään mahdollisimman monta laitemallien vaatimaa parametriä käymällä läpi minipilotilla käytettyä laitteistoa ja aikaisempien koeajojen tuloksia. Mallinnettavat laitemallit listattiin ja niiden vaatimista parametreista luotiin taulukot, joihin merkattiin työssä löydetty parametrit.

Tutkittavaa prosessia kyetään mallintamaan vain ohjelmiston M3-laitemalleilla, jotka ovat luotu mallintamaan mineraalien rikastusprosesseja. Ohjelmiston laitemalleilla ei kuitenkaan pysty suoraan mallintamaan kaikkia prosessissa käytettyjä laitteita, kuten tankomyllyä ja ruuviluokitinta. Näiden laitteiden toimiva mallintaminen vaatii ohjelmiston parametrien soveltamista ja kokeilua, jotta ne saadaan oikeaa prosessia vastaavaksi. Kiinteiden aineiden simulointi vaatii käytettyjen materiaalien alkuaineet ja niiden pitoisuudet. M3-laitemallit vaativat myös prosessissa käytetyn materiaalin partikkelikokojakauman, mikä tulee määrittää murskatusta malmista ennen jauhatuspiiriä. Prosessin lähtöaineet ja partikkelikokojakauma on määritettävä aina käytetyn malmin mukaan, joten niille ei määritetty tässä työssä arvoja. Ohjelmistolla kyetään jauhatuspiirin lisäksi mallintamaan murskausta sekä vaahdotusta.

Tämä kandidaatintyö antaa perusteet dynaamisen mallin luomiselle, mutta sen rakentamisen aikana on hyvin mahdollista, että jotkin tässä työssä luetellut asiat eivät käytännössä toimi ja parametrejä täytyy määrittää uudelleen. Yleensäkin simuloinnit eivät toimi niin kuin pitäisi ensimmäisellä yrityksellä, vaan ne vaativat useita yrityksiä ja virheitä. Mutta tällä ohjelmistolla OMS minipilot-rikastamon dynaaminen malli on saavutettavissa.

## LÄHDELUETTELO

Birta, L. G., Arbez, G. (2013). Modelling and simulation: Exploring dynamic system behaviour (2. painos). London: Springer-Verlag. 448 s. ISBN: 9781447127826

King, R. P. (2001). Modeling and simulation of mineral processing systems. Boston: Butterworth-Heinemann. 404 s. ISBN: 9780750648844

Luyben, W. L. (1973). Process modeling, simulation, and control for chemical engineers. (2. painos) New York: McGraw-Hill. 725 s. ISBN: 9780070391598

Ruuska, J., Lamberg, P., Leiviskä, K. (2012) Flotation model based on floatability component approach – PGE minerals case. IFAC Proceedings Volumes, 45 (23) S. 19-24

Seppälä P., Sorsa A., Paavola M., Remes A., Ruuska J., Leiviskä K. (2014) Pilot Plant Simulation as a Tool for More Efficient Mineral Processing. IFAC Proceedings Volumes, 47 (3), S. 11506-11511

Seppälä P., Sorsa A., Paavola M., Remes A., Ruuska J., Leiviskä K., Haresh K., Pertti Lamberg (2016) Development and calibration of a dynamic flotation circuit model. Minerals Engineering, 96-97. S.168-176

Veijola, H. (2014). Start-up tests of OMS's minipilot beneficiation plant and its applicability on the research use. Oulun yliopisto. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201402121091>.

Wills, B. A., Finch, J. A., Napier-Munn, T. & Wills, B. A. (2005). Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Burlington: Butterworth-Heinemann. 437s. ISBN: 9786611051341

DYNSIM® Dynamic Simulation M3 User Guide. Saatavissa: DYNSIM sisäinen ohjekirja. Luettu 20.10.2019

DYNSIM Training Manual. DYNSIM-ohjelmiston harjoitus opas.