



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# PRIMÄÄRIJAUHATUKSEN HI-LO-VUORAUK- SEN JÄLKEISTEN AJOPARAMETRIEN OPTI- MOINTI

Valtteri Lehtinen



Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2019  
Biotuote- ja prosessiteknikan koulutusohjelma  
Prosessiteknikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Biotuote- ja prosessitekniikan koulutusohjelma  
Prosessitekniikka

LEHTINEN VALTTERI: Primäärijauhatusen Hi-Lo-vuorauksen jälkeisten ajoparametrien optimointi

Opinnäytetyö 52 sivua, joista liitteitä 7 sivua  
Huhtikuu 2019

---

Opinnäytetyön tavoitteena oli Boliden Harjavalta Oy:n kuonarikastamon primäärijauhatuspiirin tutkiminen ja ajotavan kehittäminen Hi-Lo-vuorauksen jälkeen jauhatuspiirin kapasiteetin maksimoimiseksi, sekä jauhatuspiirin tuotteen partikkelikoon optimoimiseksi vaahdotukselle. Kuonarikastamo käsittelee kuparisulaton kuonat jauhatus- ja vaahdotustekniikalla. Kuonarikastamon tehtävä on saada kuonassa oleva sulfidinen kupari, sekä muut kupariyhdisteet vaahdotusrikasteeseen ja palauttaa kuparipitoinen rikaste sulatolle liekkiuunin syöttöseokseen. Onnistuneella jauhatuksella on positiivinen vaikutus kuonarikastamon kapasiteettiin ja kuparisaantoon.

Työn teoriaosuudessa on käsitelty autogeeni- ja semiautogeenijauhatusen, sekä luokituksen teoriaa. Teoriaosuudessa perehdytään jauhatusta kuvaaviin suureisiin, jauhatuksen säätötapoihin, sekä pääpiirteittäin kuonarikastamon prosessiin.

Työn kokeellisessa osuudessa käydään läpi prosessikokeiden tuloksia, sekä prosessimuuttujien vaikutusta kapasiteettiin ja jauhatuksen onnistumiseen. Koeajojen prosessituloksia käsitellään työn kokeellisessa osuudessa. Prosessimuuttujia koeajoissa olivat loh-karemyllyn pumppukaivoon syötettävän veden määrä, loh-karemyllyn syöttöpäähän syötettävän veden määrä, syötettävän murskeen määrä, loh-karemyllyn sähkömoottorin taa-juusmuuttaja ohjaus, loh-karemyllyn tehonotto. Kokeellisen osuuden lopussa selvitettiin prosessimuuttujien vaikutusta myllyn kapasiteettiin ja ylitteen partikkelikokoon.

Jauhatusmyllyt kuonarikastamolla on vuorattu rakenneosien kulumisen välttämiseksi. Primäärijauhatuspiirin vaipan vuoraus, sekä nostopalkit uusitaan säännöllisin väliajoin. Vuorauksen uusimisen jälkeen kuonarikastamolla on esiintynyt primäärisissä jauhatuspiireissä kapasiteetin laskua. Jauhatusen kapasiteetilla ja vaahdotukseen menevän lietteen partikkelikolla on oleellinen vaikutus kuonarikastamon toimintaan.

---

Asiasanat: jauhatus, kuonarikastamo, autogeenijauhatus, semiautogeenijauhatus, kapasiteetti, Hi-Lo-vuoraus, partikkelikoko

## ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Bioproduct and Process Engineering  
Process engineering

LEHTINEN VALTTERI: Optimization of Primary Grinding Process at Slag Concentrator after Hi-Lo Lining

Bachelor's thesis 52 pages, appendices 7 pages  
April 2019

---

The goal for this thesis was to study and improve the process dynamics of the primary grinding mill after Hi-Lo lining to maximize the capacity of the grinding circuit and optimize particle size of grinding circuit's product for flotation at slag concentrator of Boliden Harjavalta Oy. The slag concentrator recovers copper from slag of the copper refining process, by grinding and flotation. The task of the slag concentrator is to get sulfide copper as well as other copper compounds into the slag flotation concentrate and to return the copper-containing concentrate back to the feed of the flash smelting furnace's feed mix. Successful primary grinding has a positive impact on the capacity and copper recovery of a slag concentrator.

The theoretical part of the thesis deals with the theory of autogenous and semi-autogenous grinding, and theory of classification of a hydro cyclone. In the theoretical part, we go through grinding quantities, adjustments of grinding and outlines of slag concentrating process.

The experimental part of the thesis examines the results of the process experiments and the effects of process variables on the capacity and success of the grinding. The process results of the process experiments are discussed at the end of the experimental section. The process variables of the experimental part in the test runs were the amount of water supplied to the pump well of the grinding mill, the amount of water to be fed into the feed section of the grinding mill, the amount of crushed slag fed into the mill, the set value of the frequency changer of grinding mills electric motor, the power of the grinding mill and classification of the grinding circuit.

Grinding mills at the slag concentrator have a lining to avoid wear of structural elements of the mills. The lining of the primary grinding mills is renewed at regular intervals. After the renewal of the lining, the problem has been a decrease of capacity in primary grinding circuits. The capacity of primary grinding and particle size of grinding has a great effect on the operation of slag concentrator.

---

Key words: grinding, slag concentrator, autogenous grinding, semiautogenous grinding, capacity, Hi-Lo lining, particle size

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	BOLIDEN HARJAVALTA OY .....	8
2.1	Kuparisulatto.....	8
3	KUONARIKASTAMO.....	10
3.1	Mineraalien käsittely.....	10
3.1.1	Kuonan jäähditys ja ylösajo .....	10
3.1.2	Murskaus ja seulonta.....	11
3.1.3	Vaahdotus.....	12
3.1.4	Vaahdotusprosessin kemikaalit.....	12
3.1.5	Kuonarikastamon vesikierto.....	13
4	JAUHATUSPROSESSIN TEORIA.....	14
4.1	Jauhatusmyllyt ja energiankulutus.....	14
4.1.1	Autogeeni- ja semiautogeenijauhatu- .....	15
4.1.2	Pyörimisnopeus .....	16
4.1.3	Tehonotto ja täyttöaste .....	17
4.1.4	Jauhatuksen kapasiteetti ja kuulapanos.....	18
4.2	Luokitus .....	19
4.2.1	Jauhatuksen raekokojakauma ja lietetiheys .....	20
5	KUONARIKASTAMON JAUHATUSPIIRI .....	23
5.1	Jauhatuspiirin laitteisto .....	23
5.2	Lohkaremyllyn Hi-Lo-vuoraus .....	24
6	KUONARIKASTAMON JAUHATUSPIIRIN SÄÄTÖ .....	25
6.1	Jauhatusprosessin muuttujat .....	25
6.2	Jauhatuspiirin tuotteen raekoon säätö .....	25
6.3	Jauhatuksen säätäminen tehonoton avulla .....	26
7	JAUHATUSPIIRIN PROSESSIKOKEET .....	27
7.1	Prosessikokeiden suorittaminen.....	27
7.1.1	Prosessikokeiden näytteenotto .....	28
8	PROSESSIKOKEET JA NIIDEN TARKASTELU .....	29
8.1	Prosessikokeiden ensimmäinen koeajo.....	29
8.2	Prosessikokeiden toinen koeajo .....	33
8.3	Prosessikokeiden toteutuneet ajoparametrit.....	37
8.4	Prosessikokeiden tulosten regressioanalyysi .....	39
9	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	42
	LÄHTEET.....	44
	LIITTEET.....	46

Liite 1. Kuparituotannon prosessikaavio .....	46
Liite 2. LM1 Ensimmäisen koeajon partikkelikoot ja lietiheydet .....	47
Liite 3. LM1 Ensimmäisen koeajoviikon ylitteen partikkelikokojakaumat ....	48
Liite 4. LM1 Toisen koeajoviikon ylitteen partikkelikokojakaumat.....	49
Liite 5. LM1 Toisen koeajon partikkelikoot ja lietiheydet.....	50
Liite 6. LM1 Kolmannen koeajoviikon ylitteen partikkelikokojakaumat .....	51
Liite 7. LM1 Neljännen koeajoviikon ylitteen partikkelikokojakaumat .....	52

## LYHENTEET JA TERMIT

AG	autogeeninen
D	jauhatusmyllyn sisähalkaisija (m)
d80	materiaalin raekoko, 80 % näytteen rakeista läpäisee
d <sub>50c</sub>	luokittimen erotusraja
D <sub>c</sub>	luokittimen halkaisija
D <sub>o</sub>	luokittimen pyörreputken halkaisija
D <sub>u</sub>	luokittimen aliteaukon halkaisija
E	luokituksen terävyys (%)
kW	teho, kilowatti
kWh	energiayksikkö, kilowattitunti
Hz	taajuuden yksikkö, hertsi
L	jauhatusmyllyn pituus (m)
m	massa (kg)
n <sub>c</sub>	kriittinen nopeus (rpm)
p-%	painoprosentti
$\rho_s$	kiintoaineen tiheys (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_1$	väliaineen tiheys (kg/m <sup>3</sup> )
Q	luokittimen kapasiteetti (l/min)
SAG	semiautogeeninen
V <sub>k</sub>	jauhinkappaleiden tilavuus
V <sub>m</sub>	jauhatusmyllyn tilavuus
W <sub>i</sub>	Work Index (kWh/t)

## 1 JOHDANTO

Boliden Harjavalta Oy tuottaa kuparia ja nikkeliä sulfidirikasteista käyttämällä liekki-sulatusmenetelmää. Kuonarikastamo on osa yhtiön kuparisulattoa. Kuonarikastamon tehtävä on talteenottaa liekkisulatusuunin kuonaan sekä konvertterikuonaan jäänyt kupari.

Kuonarikastamolla kuonaa käsitellään jauhamalla ja vaahdottamalla. Jauhatusprosessi erottaa arvojakeet sivuaineksesta, ja tuottaa seuraavaan prosessivaiheeseen optimaalista partikkelikokoja. Kuonarikastamon jauhatusta tapahtuu primääri- ja sekundäärijauhatuspiireissä. Kuonarikastamon jauhatusmyllyt ovat suljetussa piirissä.

Primäärinen myllyjen vuoraus koostuu kahdentyyppisistä nostopalkkeista. Jokaisen nostopalkin välissä on tasainen vaippalevy. Nostopalkit ovat high- ja low-palkkeja, eli profiililtaan korkeita ja matalia. High- ja low-nostopalkkirivejä on jauhatusmyllyssä neljä. Nostopalkkien tehtävä jauhatusmyllyssä on aiheuttaa isku- ja hiehojauhaantumista. Onnistunut jauhatusta parantaa kuonarikastamon kuparin talteen saantia. Jauhatusprosessin tehtävä on hienontaa malmin raekokoja.

Tutkimuksen tavoitteena oli parantaa primäärijauhatuspiirin toimintaa tutkimalla, miten prosessiparametreja muuttamalla pystyttäisiin vaikuttamaan jauhatuspiirin kapasiteettiin jauhatuspiirin high-low-vuorauksen uusimisen jälkeen. Työn toisena tavoitteena oli selvittää prosessimuuttujien vaikutusta jauhatuspiirin tuotteen, eli vaahdotuspiirille tuotettavan jauheen partikkelikokoon. Työssä tutkittiin primäärisen jauhatusmyllyn kapasiteetin maksimointia samalla pitäen jauhatuksen partikkelikoko vaahdotukselle optimaalisena. Työn teoriaosuudessa käsitellään jauhatuksen teoriaa sekä kuonarikastamon prosessia. Työn kokeellisessa osuudessa käsitellään prosessikokeita, prosessimuuttujien vaikutusta jauhatuspiirin kapasiteettiin, sekä jauhatuspiirin tuottamaan partikkelikokoja-kaumaan.

## 2 BOLIDEN HARJAVALTA OY

Boliden Harjavallan päätuote on kuparikatodi ja nikkelikivi. Boliden Harjavalta sulattaa kupari- ja nikkelikasteita. Harjavallan sulatto tuottaa sivutuotteena rikkihappoa, jota valmistetaan sulattojen rikkidioksidipitoisista poistokaasuista rikkihappotehtailla. Bolidenin konserni on tehnyt viime vuosina merkittäviä investointeja Harjavallan sekä Porin kuparielektrolyysin tuotannon kapasiteetin kasvattamiseksi. Yhtiön tavoitteena on kasvattaa katodintuotanto 170 000 tonniin vuodessa. Boliden Harjavallan nikkelisulatto on Länsi-Euroopan ainoa.

Boliden Harjavalta tuotti 133 000 tonnia kuparia, 25 000 tonnia nikkeliä ja 677 000 tonnia rikkihappoa vuonna 2017. Kuparintuotannon prosessit ovat Harjavallassa sijaitseva kuparisulatto, kuonarikastamo, sekä rikkihappotehtaat. Harjavallan kuparisulatto tuottaa kuparianodeja. Kuparikatodin tuotantoon kuuluu oleellisena osana Porin kuparielektrolyysi.

### 2.1 Kuparisulatto

Kuparin tuotannon raaka-aineina käytetään kuparirikasteita ja kierrätysmetalleja. Kuparirikasteet ovat peräisin Bolidenin omilta kaivoksilta Kylylahdesta ja Kevitsasta. Näiden lisäksi rikasteita hankitaan konsernin ulkopuolisilta kaivoksilta. Kuparintuotannon pääprosessivaiheet esitetty liitteessä 1.

Harjavallassa liekkisulatusmenetelmää käytetään, sekä kupari-, että nikkelikasteiden sulatukseen. Kuparintuotannon prosessi aloitetaan valmistamalla syöttöseos, joka sisältää kuparirikasteiden lisäksi mm. kuonanmuodostajaksi lisättävää hiekkaa. Syöttöseos kuivataan rumpukuivaimella kosteuden poistamiseksi. Kuivattu syöttöseos, sekä happirikastettu ilma syötetään liekkisulatusuuniin. Liekkisulatusmenetelmässä tarvittava energia tuotetaan rikasteen sisältämien sulfidien hapetusreaktioissa. Kupariliekkisuunin kuparikivi lasketaan liekkisulatusuunista kivipatoihin ja kuljetetaan konverttereihin. Konvertointi on kaksivaiheinen prosessi, jossa ensin poistetaan rauta, ja tämän jälkeen kuparikivi konvertoidaan raakakupariksi. Konvertoinnin jälkeen sula siirretään anodiunikäsitteilyyn, jossa

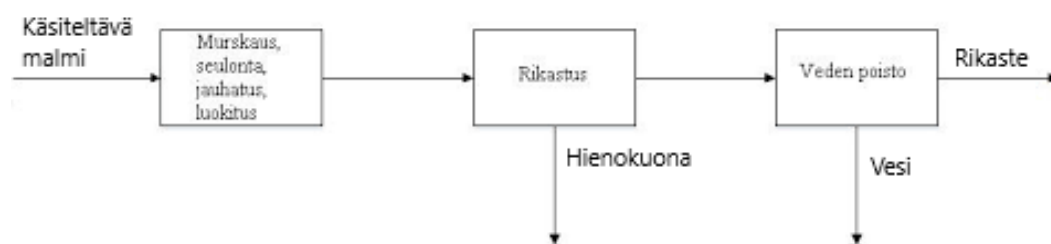


raakakuparia raffinoidaan poistamalla rikkiä ja pelkistämällä. Anodiunikäsitteilyn jälkeen sula kupari valetaan muotteihin anodikuparilevyksi, joka on Harjavallan kuparisulaton lopputuote.

### 3 KUONARIKASTAMO

Laitosta, jossa malmia rikastetaan, kutsutaan rikastamoksi. Rikastamon toimintaan kuuluu myös raaka-aineen hienontaminen. Rikastuspiirin muodostavat koneet ja laitteet, joilla tuotetaan rikastetta. (Lukkarinen 1987, 2-5.)

Kuonarikastamon tehtävä on ottaa talteen kupari liekkisulatuksessa sekä kuparin konvertoinnissa syntyneestä kuonasta. Kuonarikastamo tuottaa kuparisulatolle kuparipitoista rikastetta, jota tuottaessa syntyy myös rikastushiekkaa. Rikastushiekka läjitetään läjitysalueelle. Liekkisulatusuunin kuonan kuparipitoisuus vaihtelee normaalisti 2-4 % välillä ja konvertterikuonan kuparipitoisuus vaihtelee tyypillisesti 4-15 % välillä. Kuonarikastamon pääprosessivaiheet ovat kuonan jäähtyminen, murskaus, seulonta, jauhatus ja vaahdotus.



Kuva 1. Malmin rikastusprosessi

#### 3.1 Mineraalien käsittely

Malmin rikastaminen riippuu oleellisesti malmin mineralogisista ominaisuuksista, kuten koostumuksesta ja rakenteesta. Rikastusprosessi on mahdollinen vain sellaisille mineraaleille, jotka voidaan erottaa toisistaan. Materiaalin hienonnutta voidaan jakaa murskaukseen, sekä jauhatukseen. Rikastusprosessi alkaa materiaalin seulonnalla ja murskauksella jauhatuspiirille ominaiseksi.

##### 3.1.1 Kuonan jäähtyminen ja ylösajo

Liekkisulatuksessa sekä konvertoinnissa syntyneet kuonat kuljetetaan padoissa sulatolta patajäähdytysalueelle patatruckilla. Patajäähdytysalueella kuonapatoja jäähdytetään vesisuihkun alla vähintään 48 tuntia. Kuonan jäähtymisessä muodostuu suuria kiteitä, jotka

helpottavat kuparin erottamista kuonasta vaahdotusprosessin avulla. Isoimmat kiteet painuvat padan pohjalle muodostaen korkeakuparisen faasin, mikä palautetaan takaisin konvertointiin. Jäähdytyksen jälkeen kuonapadat kipataan maahan ja kuona murskataan pienemmäksi, kuonarikastamolle syöttöä varten. Kuona syötetään kuonarikastamon siiloihin kuonankaatosuppilosta rikotusrilöiden läpi patahihnalla.

### 3.1.2 Murskaus ja seulonta

Kuonarikastamon patahihnalla kuljettaa kuonan kaksitasotäryseulalle, joka seuloo kuonan lohkar-, pala-, sekä murskesiiloihin. Lohkareet ovat kooltaan 120-400 mm, palat ovat kooltaan 35-120 mm, sekä murske on kooltaan alle 35 mm. Yleisesti kuonarikastamolle palatavaraa tulee suhteessa enemmän kuin lohkarkeitä. Mursketta syntyy normaalisti vain pieniä määriä, mutta palatavarasta tehdään mursketta kuonarikastamon kartiomurskaimella. Kartiomurskainta käytetään kuonan ylösajon yhteydessä, sillä murskaimen syöttö tulee kuonarikastamon palatavarsiilosta. Lohkarsiiloja rikastamolla on kaksi kappaletta ja pala-, sekä murskesiiloja on yksi kumpaakin. Palatavaraa ei syötetä muualle, kuin kartiomurskaimelle. Siilon täyttyessä palatavara pääsee vapaasti kulkemaan taempana olevaan lohkarsiiloon. Kartiomurskaimen tuottama murske kuljetetaan kahden hihnakuljettimen avulla samaan siiloon, johon kaksitasoseula tuottaa ylösajon murskeen. Täynnä olevat siilot riittävät kuonarikastamolla normaaliajossa yli kahdeksaksi tunniksi, joten kuonaa ajetaan rikastamon siiloihin viisi kertaa vuorokauden aikana normaalitilanteessa.

Rikastamon primäärisiin jauhinmyllyihin syötetään siiloista kuonaa hihnakuljettimien avulla. Kummallekin lohkarsiilolle on oma tärysyöttimensä, joka syöttää kuonaa lohkarsiiloista hihnakuljettimelle numero yksi (HK1). Lohkareiden lisäksi primäärisiin jauhinmyllyihin syötetään mursketta murskesiilosta kahden hihnakuljettimen avulla samalle hihnakuljettimelle kuin lohkaesyöttimet syöttävät kuonaa (HK1). Hihnakuljetin yksi kuljettaa kuonan pudotussuppilon kautta seuraavalle hihnakuljettimelle (HK2), joka taas kuljettaa pudotussuppilon kautta kuonan jakokuljettimelle, joka jakaa kuonansyöttöä kahden primäärimylyn kesken myllyjen tehonsäädön mukaan. Myllyihin syötettävä 35-100 mm kokoinen palatavara, ei sovellu hyvin primäärijauhatuksen syötöksi ja täten heikentää primääristen jauhinpiirien toimintaa, joten kaikesta palatavarasta pyritään tekemään mursketta.

### 3.1.3 Vaahdotus

Kuparin rikastus kuonasta tapahtuu vaahdotusprosessin avulla, jonka tavoitteena on rikastaa kupari kuonarikasteen joukkoon flotaation avulla erottamalla rikasteesta arvoton sivukiviaines rikastushiekaksi eli hienokuonaksi. Hienokuona koostuu pääasiassa raudasta, kuonanmuodostajaksi lisätystä kvartsihiekasta ja pienistä määristä muita metalleja. Yksi kuonarikastamon tavoitteista on pitää rikastushiekan arvoainepitoisuus mahdollisimman pienenä.

Flotaatio vaahdotuskennoissa tapahtuu ilman ja sekoittimien avulla. Lohkaremyllyjen jälkeen liete luokitellaan hydrosyklonilla. Sykloneiden ylite syötetään vaahdotukseen ja alite palautetaan takaisin lohkaremyllyyn. Kuonarikastamon lohkaremyllyjen, eli primäärimyllyjen hydrosyklonin ylite syötetään primäärivaahdotukseen, joka on nimensä mukaisesti ensimmäinen vaahdotusvaihe. Kuonarikastamolla on kolme primäärivaahdotuskennoa, joista tyypillisesti ajetaan kahta kerrallaan. Primäärivaahdotuskennojen ylite on valmista rikastetta, joka pumpataan rikastekaivoon. Primäärivaahdotuskennojen alite pumpataan välijätekaivon kautta yhteiseen kaivoon, josta se pumpataan palamylyjen sykloneille sekundäärijauhatus varten. Sekundäärijauhatus hydrosyklonin ylite pumpataan takaisin vaahdotukseen, jossa se kulkee kolmen vaahdotuskennon läpi tuottaen kuparipitoista rikastetta. Jäljelle jää hienokuonaa, missä ei ole enää vaahdottuvia mineraaleja.

### 3.1.4 Vaahdotusprosessin kemikaalit

Vaahdotuskemikaalit jaetaan tyypillisesti kokoojakemikaaleihin, vaahdotteisiin ja säännöstelijöihin. Kokoojan avulla talteenotettavan arvoaineksen pinta tehdään selektiivisesti hydrofobiseksi. Vaahdotteen tehtävä on aikaansaada vaahto, jonka pinnalle kuparipartikkelit kiinnittyy. Vaahdotuskemikaalin tulee tuottaa sellainen vaahto, joka pysyy koossa siihen saakka, kunnes rikaste on päässyt vaahdotuskennon rikasteränniin. (Lukkarinen 1987, 48-68)

Kuonarikastamon vaahdotusprosessissa käytetään kahta kemikaalia flotaation aikaansäämiseksi. Koska kuonarikastamon lietteen pH on noin 8, rikastamon vaahdotusprosessissa ei ole tarvetta pH:n säätämiseksi. Kuonarikastamon kokoojakemikaalina käytetään Na-

isobutyliksantaattia ja vaahdotteena toimii polypropyleeniglykoli-metyylieetteri (kauppanimeltään Dowfroth).

### **3.1.5 Kuonarikastamon vesikierto**

Kuonarikastamon tuottama kuparirikaste pumpataan kuparisulaton sakeuttimeen, jossa kiintoaine laskeutuu painovoiman ja flokkulantin avulla sakeuttimen pohjalle. Sakeuttimen rikaste suodatetaan kuparikuivaamon painesuotimella kakuiksi ja kuivataan liekkiuuniin syötettävän rikasteen mukana. Painesuodatuksessa kiintoaineesta erotettu vesi pumpataan takaisin kuonarikastamon selkeyttimeen. Kuonarikastamolla on myös oma sakeutin, johon rikastetta voidaan pumpata, sekä oma painesuodin veden poistamiseksi rikasteesta tarvittaessa. Pääsääntöisesti kuonarikastamon tuottama rikaste pumpataan kuparikuivaamoon.

Kuonarikastamolla on kaksi läjitysalueita, joihin rikastetta tuotettaessa syntyvää hienokuonaa läjitetään. Rikastamon läjitysmaat sijaitsevat Lammaisissa ja Sievarissa tehdasalueen läheisyydessä. Läjitysmailla hienokuona laskeutuu läjitysmaiden pohjalle ja altaan pintavesi pumpataan takaisin rikastamolle selkeytykseen ja siitä edelleen rikastamon prosessivedeksi.

## 4 JAUHATUSPROSESSIN TEORIA

### 4.1 Jauhatusmyllyt ja energiankulutus

Jauhatusprosessin päämääränä on hienontaa käsiteltävän malmin partikkelikokoa niin, että malmin sisältämät arvomineraalit saadaan talteen. Jauhatusessa malmin hienonnus tapahtuu iskuja ja hankausta hyväksikäyttäen joko kuivajauhatuspiirissä tai märkäjauhatuspiirissä. Jauhatus toteutetaan yleisesti pyörivissä lieriömäisissä teräsmyllyissä, joissa malminkappaleet pääsevät liikkumaan, ja täten aiheuttavat iskuja, sekä hankausta toisiin malminkappaleisiin jauhinmyllyn sisällä. Jokaiselle jauhatusprosessille on ominainen partikkelikoko jatkokäsittelyä varten talteen otettavasta arvoaineksesta ja prosessista riippuen.

Jauhatusprosessissa malmin alijauhaminen johtaa siihen, että tuotetaan liian karkeaa tuotetta seuraavaan prosessivaiheeseen, jolloin myös arvoaineksen talteen saanti heikkenee. Liiallinen jauhatus aiheuttaa turhaa energiankulutusta, sekä partikkelikoon hienontumisen liian pieneksi, jolloin arvoaineksen talteen saanti ei ole myöskään paras mahdollinen. Jauhatus on eniten energiaa kuluttava prosessivaihe malmin rikastuksessa. Jauhatusprosessin kuluttama energia voidaan ilmaista esimerkiksi Bondin yhtälöllä. (Gupta & Yan 2006, 234-235)

$$E = 10 \cdot W_i \left( \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)$$

missä  $E$  on jauhatuskseen vaadittava energia, (kWh/t)

$W_i$  on jauhettavan materiaalille ominainen Work Index-arvo, (kWh/t)

$P$  on tuotteen 80 % läpäisyä vastaava hiukkaskoko ( $\mu\text{m}$ )

$F$  on syötteen 80 % läpäisyä vastaava hiukkaskoko ( $\mu\text{m}$ )

Rikastusprosessin jauhinmyllyt voidaan tyypillisesti jakaa neljään kategoriaan: tankomyllyt, kuulamylyt, autogeenimylyt ja semiautogeenimylyt. Rikastuksessa myllyt toimivat yleisesti suljetussa piirissä luokituslaitteen kanssa, jonka tehtävä on palauttaa karkeat rakeet takaisin jauhatuspiiriin, sekä varmistaa, että jauhatuskseen saadaan haluttua raekokojakaumaa seuraavaan prosessivaiheeseen. (Kauppila, Myllyoja, Räisänen 2001, 24)

#### 4.1.1 Autogeeni- ja semiautogeenijauhatus

Autogeenimyllyt ovat nimensä mukaisesti myllyjä, jotka jauhavat materiaalia itse itsellään, eli jauhatuksessa käytetään hyväksi jauhettavan materiaalin aiheuttamia iskuja, kitkaa ja hiertoa. Autogeenijauhatus on taloudellinen tapa jauhaa materiaalia, sillä siinä säästetään investointi jauhakappaleissa, jotka esimerkiksi kuulajauhatuksessa vaaditaan. Myös autogeenimyllyssä voidaan käyttää jauhatuksen tehostamiseksi pientä kuulapanosta joka on n. 3-5 % myllyn kokonaistilavuudesta. Autogeenimyllyjä käytetään yleisesti primäärijauhatuksessa, jossa jauhettavan materiaali on isoja lohkkareita (>100 mm). Kun jauhatuksessa käytettävä kuulakuorma myllyn kokonaistilavuudesta on välillä 5-15 %, kutsutaan myllyä semiautogeenimyllyksi. Semiautogeenimylly on autogeenimyllyn ja kuulamyllyn yhdistelmä, jossa kuulapanosta käytetään tehostamaan jauhatusta. Kuulapanosta jauhinyllyssä kasvatettaessa myllyn tuote muuttuu karkeammaksi, mutta tehonkulutus suhteessa jauhettua tonnia kohti vähenee. Tällöin myös jauhatuspiirin Work Index-arvo pienenee. (Cleary W. Paul 1998, 19; Putland Brian 2005, 4-11)

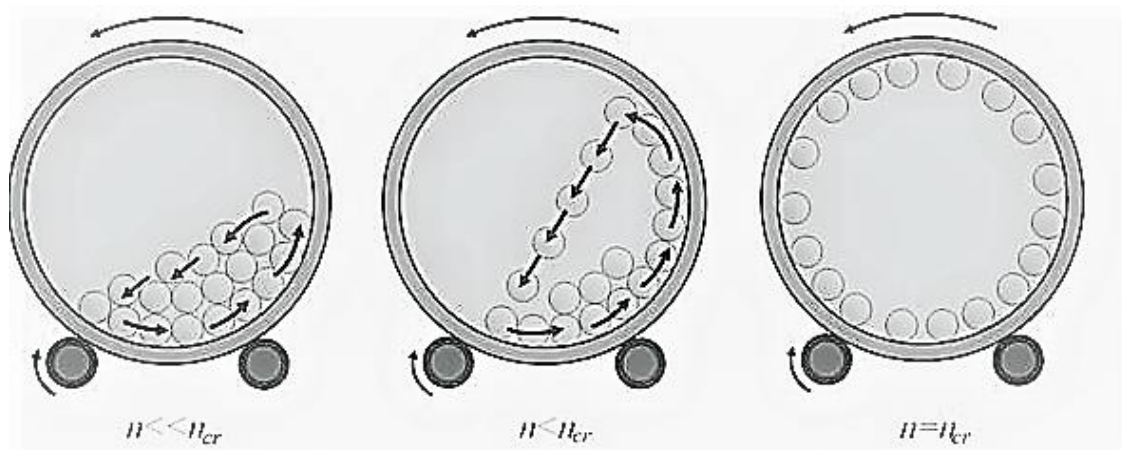
Avoin jauhatuspiiri seulan kanssa, suljettu jauhatuspiiri hydro syklonin kanssa, avoin jauhatuspiiri suljetussa jauhatuspiirissä kuulamyllyn kanssa ja avoin jauhatuspiiri sekundäärimurskaimen ja kuulamyllyn kanssa ovat yleisimmät jauhatuspiirin vaihtoehdot autogeeni- ja semiautogeenimyllyille. Näistä kaksi ensimmäistä ovat niin sanotusti yksivaiheisia prosesseja ja kaksi viimeistä kaksivaiheisia. Avoimessa piirissä jauhettaessa kyseisillä myllytyypeillä jauhatuspiirin tuotteen partikkeliko jää usein karkeaksi. Tämä voidaan välttää suljetussa piirissä hydro syklonin avulla, joka siis palauttaa karkean partikkelin takaisin jauhatuspiiriin. (Gupta & Yan 2006, 236-243)

Suurin ongelma autogeeni- ja semiautogeenijauhatuksessa on usein materiaalin raekoon, sekä jauhettavan materiaalin ominaisuuksien vaihtelu. Varsinkin autogeenijauhatuksessa suuria lohkkareita tarvitaan rikkomaan keskikokoisia ja pieniä malminkappaleita. Jos suuria lohkkareita ei ole riittävä määrä jauhatuspiirissä, syntyy kriittistä materiaalia, joka rajoittaa myllyn kapasiteettia. Kriittinen materiaali on kooltaan noin 30-60 mm. Kriittisen materiaalin pääsy jauhatuspiiriin tulisi minimoida murskaamalla materiaali pienemmäksi, ennen jauhatusprosessiin syöttöä. (Morrell S & Valery W 2001, 4-9)

#### 4.1.2 Pyörimisnopeus

Jauhatusprosesseista puhuttaessa myllyn nopeus ilmaistaan useimmiten prosenttiosuutena kriittisestä nopeudesta, sillä usein erikokoisissa myllyissä jauhatus tapahtuu kuitenkin samalla kriittisellä nopeudella. Kriittinen kierrosnopeus on se nopeus, jolloin myllyn kuorma pysyy myllyn kehällä keskipakovoiman avulla irtautumatta.

Tehonotto ja myllyn kehänopeus riippuvat toisistaan ja yhdessä nämä vaikuttavat myllyn kapasiteettiin. Pyörimisnopeutta liikaa kasvatettaessa jauhinmylly alkaa käyttäytyä kuin linko, jolloin myllyn kuorma ei irtoa sen seinämältä, jolloin puhutaan ylikriittisestä kierrosnopeudesta.



Kuva 2. Myllyn kuorman käyttäytyminen kierrosnopeutta kasvatettaessa. (Dévay 2013)

Kun myllyn kuormaan saadaan maksimaalinen noste, niin tällöin iskuenergiaa hyödyntävä jauhatusmekanismi toimii parhaiten. Kuitenkin paras kapasiteetti jauhatuspiirille saavutetaan, kun hienonnustaajuus on kaikkein suurin, eli kun kaikkia jauhatuksen mekanismeja hyödynnetään.

Myllyn nopeuden kasvattaminen lisää jauhatuksen mekanismien hyödyntämistä tiettyyn pisteeseen asti, kunnes mylly alkaa sentrifugoida. Pyörimisnopeus vaikuttaa lietteen määrään myllyn sisällä, sillä myllyyn mahtuu enemmän lietettä pyörimisnopeutta nostettaessa. (Napier-Munn, Morrell, Morrison & Kojovic 1999)

Jauhatuksessa käytettyjen myllyjen nopeudet ovat tyypillisesti 60-90 % kriittisestä nopeudesta. Myllyn kriittistä kierrosnopeutta voidaan arvioida myllyn sisäläpimitan avulla



tai jauhinkappaleiden koon ja myllyn sisäläpimitan avulla. Myllyn kriittinen kierrosnopeus voidaan määrittää seuraavasti

$$n_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}}$$

missä  $n_c$  on myllyn kriittinen kierrosnopeus (rpm)  
 $D$  on myllyn sisäläpimitta (m)

Myllyn kriittinen kierrosnopeus pienenee jauhinyllyn läpimittaa kasvatettaessa. Kun halutaan ottaa huomioon jauhinkappaleiden tilavuus myllyssä, määritetään kriittinen kierrosnopeus myllylle seuraavasti

$$n_c = \frac{42.3}{\sqrt{D - d}}$$

missä  $D$  on myllyn sisäläpimitta (m)  
 $d$  on jauhinkappaleiden halkaisija (m)

#### 4.1.3 Tehonotto ja täyttöaste

Myllyn syötettävän materiaalin määrän ohjauksessa käytetään yleensä täyttöastetta tai tehonottoa, joka osittain kuvaa täyttöastetta. Jauhatusmyllyn tehonottoon vaikuttavat myllyn täyttöaste, sekä jauhettavan kiintoaineen ja jauhatusprosessissa käytettävän veden määrän suhde. Myllyn tehonotto kasvaa täyttöastetta kasvatettaessa tiettyyn pisteeseen saakka, jonka jälkeen tehonoton kasvu hidastuu. Jos täyttöaste kasvaa liian suureksi, niin tällöin myös tehonotto lähtee laskuun. Jauhatusmyllyn parasta mahdollista kapasiteettia ei saavuteta myllyn tehonoton maksimiarvolla. Tähän vaikuttaa kuitenkin jauhettavan materiaalin kovuus.

Jauhatusmyllyn täyttöaste ilmaisee jauhatusmyllyn panoksen osuutta myllyn tilavuudesta. Jauhatusmyllyn täyttöaste voidaan määrittää, kun tunnetaan myllyssä olevien jauhinkappaleiden tilavuus, sekä myllyn tilavuus.

$$\text{Täyttöaste} = \frac{V_k}{0,62 \cdot V_m}$$

missä  $V_k$  on jauhinkappaleiden tilavuus  
 $V_m$  on jauhatusmyllyn tilavuus

Myllyn täyttöasteen muutos vaikuttaa suoraan myös jauhatuspiirin energiankulutukseen. Täyttöasteen pienentyessä energiankulutus vähenee. Kun jauhatuspiirin täyttöaste vähenee, suurin muutos tapahtuu malmin vapaassa pudotuksessa jauhatusmyllyn sisällä. Tällä ilmiöllä tapahtuvaa jauhatusta kutsutaan iskujauhatukseksi. (Cleary 2001, 80-91)

#### 4.1.4 Jauhatuksen kapasiteetti ja kuulapanos

Jauhatuksen kapasiteetti ilmaisee jauhatuspiirin käsittelemän materiaalin aikayksikössä (t/h). Jauhatusmyllyn käsittelemään malmin määrään vaikuttavat jauhatusmyllyn fyysisten mittojen lisäksi seuraavat asiat: pyörimisnopeus, täyttöaste, jauhettava materiaali, sekä jauhatusmyllyn kiertokuorma. Myllyn pyörimisnopeutta nostettaessa myllyn kapasiteetti kasvaa, myllyn sisähalkaisijaa kasvatettaessa kapasiteetti kasvaa, sekä jauhettavan materiaalin tiheyttä nostettaessa myös myllyn kapasiteetti kasvaa. Samalla tehonoton arvolla jauhatusmyllyn kapasiteetti saattaa vaihdella jopa kaksinkertaisesti.

Autogeenijauhatuksessa, kuten myös semiautogeenimyllyissä suuri kapasiteetti ja hieno tuote ovat toistensa vastakohdat. Tämä johtaa siihen, että pitää valita kumpi näistä muutujasta on tärkeämpi koko prosessin kannalta ja operoida jauhatuspiiriä sen mukaan. Tarkan kapasiteetin määrittäminen autogeeni- ja semiautogeenimyllyille on vaikeaa syötteen epähomogeenisuuden vuoksi. (Pasma 2010, 20)

Jauhatuksessa kuulapanosta käytetään nostamaan jauhatuksen kapasiteettia. Kuulapanos auttaa tuottamaan hienompaa tuotteen partikkelikokoa. Kuulapanoksen tehtävänä on käyttää hyväksi kolmea eri jauhatusmekanismia, jotka ovat isku-, hierto- ja kitkajauhatus. Jauhatuksessa käytettävien kuulien tiheys tulee olla korkeampi, kuin jauhettavan materiaalin. Kovemmat malmit tarvitsevat enemmän iskuenergiaa hienonnuksessa. Kuulapanos tuo aina kustannuksia kuulien hinnan, kulumisen ja niiden lisäämistarpeen vuoksi. Mitä hienompaa tuotteen partikkelikokoa halutaan tuottaa, sitä pienempiä kuulien halkaisijan tulee olla. Kuulapanosta kasvatettaessa tulee ottaa huomioon myllyn tehonoton alue, joka kasvaa, jos kuulat ovat liian pieniä. Oikea kuulapanos riippuu täysin käytössä olevasta prosessista. Kuulapanoksen lisäyksellä pyritään myös jauhamaan kriittistä materiaalia, eli keskikokoista materiaali, joka on halkaisijaltaan noin 20-60 mm.

## 4.2 Luokitus

Luokitus on yleensä hienojakoisen materiaalinvirran erottamista karkeaksi ja hienoksi materiaalivirraksi. Luokitus tapahtuu materiaalin vajoamisnopeuden perusteella. Luokittimet voidaan jakaa tyypillisesti hydraulisiin ja pneumaattisiin luokittimiin käytetyn väliaineen mukaan. Luokitus on merkittävässä roolissa jauhatuspiirin toiminnan optimoinnissa, jonka vuoksi jauhatuksen luokituksen toimintakuntoon on syytä kiinnittää huomiota. Luokittimet voidaan jaotella myös toimintavoiman mukaan keskipakovoimatoimiin luokittimiin ja painovoimatoimisiin luokittimiin.

Suljetussa piirissä luokittimelta jauhatukseen palaavaa lietemäärää kutsutaan jauhatuspiirin kiertokuormaksi. Kiertokuorman käsitteeseen liittyvät luokittimelta palaavan karkean jakeen ja luokittimelta lähtevän hienon jakeen suhde, sekä luokittimelta palaavan karkean jakeen ja syötteen suhde. Luokittimen karkeaa jaetta kutsutaan alitteeksi ja hienoa jaetta kutsutaan ylitteeksi.

Luokitukselle voidaan määrittää luokituksen terävyys, joka ilmaisee luokittimen tehokkuuden. Luokittimen terävyys ilmoitetaan prosenttilukuna ja se ilmaisee syötteen osuuden sisältämästä tietyin raekoon hienommasta kiintoaineesta, joka kulkeutuu ylitteeseen.

$$E = \frac{y \cdot (s - h)}{s \cdot (y - h)} \cdot 100 \%$$

missä E on luokituksen terävyys (%)  
 y on ylitteen sisältämä –x koon jae (%)  
 s on syötteen sisältämä –x koon jae (%)  
 h on alitteen sisältämä –x koon jae (%)

Hydro syklonin kapasiteetilla ja painehäviöllä on riippuvuus, johon vaikuttavat syklonin geometria ja optimaaliset toimintaolosuhteet luokittimelle. Kun luokittimessa rakeeseen kohdistuva keskipakovoima ja luokittimen säteen suuntaisesta nopeudesta aiheuvat voimat yhtä suuret, niin jakeella on tällöin yhtä suuri todennäköisyys joutua ylitteeseen kuin alitteeseen. Tätä kutsutaan myös syklonin erotusrajaksi. Syklonin erotusrajaa voidaan määrittää seuraavalla kaavalla. (Nageswararao, Wiseman & Napier-Munn 2004)

$$d_{50c} = \frac{50.5 \cdot D_c^{0.46} \cdot D_i^{0.6} \cdot D_o^{1.21} \cdot e^{0.09c \frac{P}{V}}}{D_u^{0.71} \cdot h^{0.38} \cdot Q^{0.45} \cdot (\rho_s - \rho_1)^{0.5}}$$

- missä
- $d_{50c}$  on luokituksen erotusraja
  - $D_c$  on luokittimen halkaisija
  - $D_i$  on luokittimen syöttöputken halkaisija
  - $D_o$  on luokittimen pyörreputken halkaisija
  - $D_u$  on luokittimen aliteaukon halkaisija
  - $h$  on luokittimen pyörreputken korkeus
  - $Q$  on luokittimen kapasiteetti (l/min)
  - $\rho_s$  on kiintoaineen tiheys
  - $\rho_1$  on väliaineen tiheys

Hydrosyklonin luokitusominaisuuksiin ja kapasiteettiin voidaan vaikuttaa luokittimen mittasuhteita muuttamalla. Syklonin läpimittaa, yliteaukon kokoa, kartiokulmaa kasvatettaessa, sekä syötteen kiintoainepitoisuutta kasvatettaessa luokittimen tuottama ylite karkenee, kun taas aliteaukkoa, syöttöaukkoa tai luokittimen painetta kasvatettaessa luokitin tuottaa hienompaa ylitettä.

Paras luokitustehokkuus syklonille saadaan, kun syklonia ajetaan lähellä roping-tilaa, mutta ei kuitenkaan sen rajaan asti. Roping-ilmiötä on tutkittu varsinkin jatkuvatoimisissa suljetuissa jauhatuspiireissä, jollainen löytyy myös Harjavallan rikastamolta. Hydrosyklonissa nopeat paineenvaihtelut, sekä korkea paine saattavat ajaa luokittimen niin sanottuun roping-tilaan, jolloin luokitin yrittää pitää jauhatuspiirin kiertokuorman rajallisena, mutta päästää kuitenkin luokittimen ylitteen partikkelikoon karkeaksi. Roping-tilan välttämiseksi sykloni tulee mitoittaa oikein. Eräässä tutkimuksessa havaittiin luokittimen pyörreputken halkaisijan ja luokittimen aliteaukon halkaisijoiden suhteen ollessa alle 0,5 olevan todennäköistä, että roping-ilmiötä esiintyy useammin. Yli- ja alivirtausta ei voida käyttää ilmiön indikaattoreina, mutta syötön partikkelikokojakauman jyrkillä vaihteluilla on todettu olevan vaikutusta ropingiin. (Heiskanen 2000)

#### 4.2.1 Jauhatuksen raekokojakauma ja lietetiheys

Jauhatusprosessin tuotteessa olevat partikkelit eivät aina ole kaikki samankokoisia (vaan tuotteen partikkelit muodostavat). Jauhinmyllyn erikokoisten rakeiden osuus voidaan määrittää partikkelikokojakauman avulla. Jauhatuksen partikkelikokojakauman selviää

jauhatuspiirin hienoksi jauhatusaste. Jauhatusprosessin tehtävä on tuottaa optimaalista partikkelikokoa vaahdotukselle, sillä vaahdotukselle suurimmat häviöt syntyvät liian ras-kaista jakeista, jotka eivät kulkeudu vaahdotuksen rikasteeseen. Tuotteen raekokoja-kauma voidaan määrittää seula-analyysillä, jossa jauhatuksen tuotenäytettä seulotaan eri-kokoisilla seuloilla (raekokojakauman d80-arvo selvittää minkä kokoista partikkelia ja-kauma sisältää). Partikkelikokojakauma ilmaisee jauhetu materiaalin hienouden ts. sen että jauhatuksen lopputulos olisi oltava 80 % alle halutun raekoon.

Vaahdotukselle optimaalinen partikkelikoko on riippuvainen käsiteltävästä malmista ja prosessilaitteistoista. Harjavallan kuonarikastamolla hienommalla vaahdotuksen syöt-teellä saavutetaan parempi rikastesänto. Lukkarinen arvioi vuonna 1987, että kuonari-kastamon syöte tulisi jauhaa 98 % alle 53  $\mu\text{m}$ . (Lukkarinen 1987, 144-146)

Aiemmissä tutkimuksissa on myös osoitettu syötteen kuparioksidoilla olevan negatiivi-nen vaikutus jauhatuksen hienon partikkelikoon tuottamiseen. Toisilla kuonarikasta-moilla vaahdotuksen syötteen partikkelikokoon optimiarvon on todettu olevan alle 70  $\mu\text{m}$ . (Dimitrijevic, Urosevic, Jankovic & Antic 2004; Aslani, Shamsi, Noparast, Shafaie & Gharabaghi 2015)

Harjavallan kuonarikastamon primäärisillä liian hienoksi jauhaantuminen on epätoden-näköistä suuren kapasiteetin vuoksi. Rikastamon sekundäärijauhatus jauhaa kuonan n. 40  $\mu\text{m}$ . Kuonarikastamon jauhatuspiirien tuottamaa partikkelikokoa voidaan seurata reaali-aikaisesti PSI-500 raekokoanalysointorin avulla.

Eräessä tutkimuksessa havaittiin, että jauhatuspiiriin tuottaessa karkeaa tuotetta ja jauha-tuspiirin kiertokuorman ollessa korkea, tällöin jauhettava materiaali on suhteellisen ko-va. Jauhatuspiirin tuottaman lietteen kiintoainepitoisuuden ja partikkelikoon avulla voi-daan määrittää jauhettavan materiaalin kovuutta. Jos kiintoainepitoisuus on matala ja tuo-tettu partikkeli on karkeaa, niin jauhettava materiaali on tällöin myös kovaa. (Chen Xi-song, Li Shi-Hua, Zhai Jun-yong, Li Qi 2007, 720)

Jauhatusmyllyn sisäisen lietetiheyden kasvattaminen lisää kitkajauhatuksen osuutta ja täl-löin hiertojauhatus vähenee. Lietetiheyden kasvattaminen nostaa kuitenkin jauhatusmyl-lyn kiertokuormaa. Lietetiheyden ollessa korkea jauhatusmyllyn sisällä nestettä on pal-

jon, joka puolestaan keventää malminkappaleita heikentäen iskujauhatuksen osuutta. Jauhatusprosessiin syötetään vettä lietetiheyden nostamiseksi seuraavaa prosessivaihetta, vaahdotusta varten. Optimaalinen vaahdotuksen lietetiheys on riippuvainen vaahdotuksen laitteistoista, sekä vaahdotettavan malmin mineralogiasta.

## 5 KUONARIKASTAMON JAUHATUSPIIRI

### 5.1 Jauhatuspiirin laitteisto

Harjavallan kuonarikastamolla on neljä myllyä, joista kaksi on primäärijauhatusmyllyä ja kaksi on sekundäärijauhatusmyllyä. Kuonarikastamon myllyt toimivat omissa suljetuissa piireissään luokittimien kanssa. Kummallakin rikastamon primäärinmyllyllä on oma pumppukaivonsa, johon myllyn arinan läpäissyt liete päätyy. Pumppukaivoon ajetaan prosessivettä, joka kulkeutuu pumppukaivon pumpun avulla jauhatuksiin syklonille, josta edelleen joko ylitteenä vaahdotukseen tai alitteena takaisin myllyyn. Pumppukaivon pumpuna kuonarikastamolla käytetään keskipakopumppua, joka saa voimansa oikosulkumoottorista. Jauhatusprosessiin syötetään myös lisävetä, ns. etupäänvettä myllyn syötönpäästä.

Tässä työssä tarkasteltava mylly on primäärinmylly ja tyypiltään lohkarinmylly 1 (LM1), joka on autogeeninmylly, vaikkakin myllyssä käytetään pientä kuulakuormaa tehostamaan kapasiteettia. Lohkarinmyllyssä käytetään halkaisijaltaan 60 mm ja 100 mm teräskuulia. Kuulia syötetään noin kerran kuukaudessa kumpaakin kokoluokkaa kerrallaan yleensä 2 tynnyrillistä, joka vastaa n. 460 dm<sup>3</sup> tilavuutta.

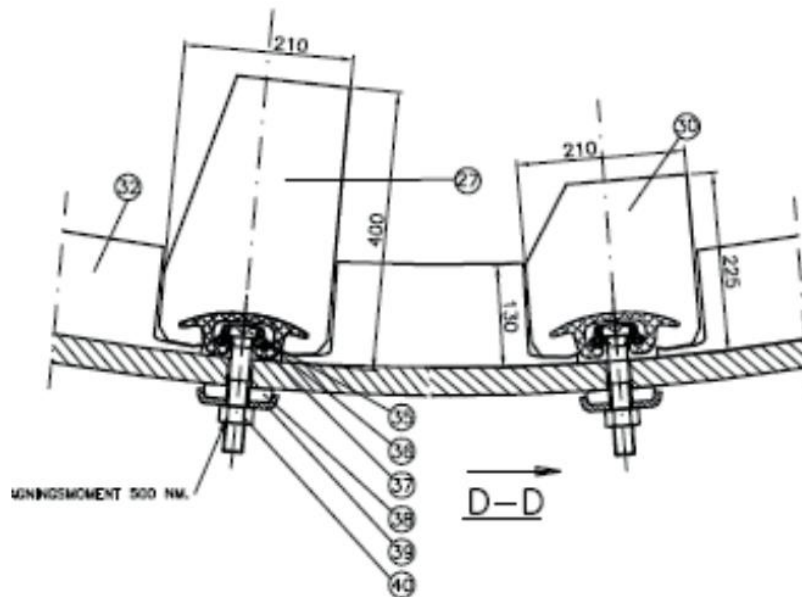
Rikastamon kummankin primäärinmyllyn jauhatuksiin on kaksi luokitinta, joista ajetaan yhtä kerrallaan. Luokittimet ovat tyypiltään 250CVX ja 400CVX, joista jälkimmäinen on pidempi ja sen halkaisija on suurempi. Isompi luokitin mahdollistaa suuremman kapasiteetin. Luokittimen vaihto tapahtuu ajettavaa kaivopumppua vaihtamalla. Luokittimissa käytetään myös erikokoisia ylite- ja aliteholkkeja. Cavex 250 sykloneissa aliteholkki on kooltaan 60 mm ja yliteholkki 100 mm, Cavex 400 sykloneissa aliteholkki on 60 mm ja yliteholkki 120 mm. LM1 tuottaman ylitteen partikkelikokoa seurataan on-line mittauksena PSI-500 analysaattorin avulla, jonka perusteella operaattorit tekevät muutoksia jauhatuksiin ajoparametreihin.

LM1 saa liike-energiansa oikosulkusähkömoottorista vaihteen ja hammaskehän välityksellä. Myllyn käyttö on toteutettu 1575 kW sähkömoottorilla ja 690 V taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttajan avulla myllyn pyörimisnopeutta voidaan säätää oikosulkumoottorin ohjauksella asettamalla manuaalisesti ns. TM-OHJE haluttuun arvoon. Tyypillisesti TM-OHJE-arvoa on pidetty lukemassa 90 %, jolloin sähkömoottorin nimellistaajuus on 45

Hz. TM-OHJE-arvo on yksi työssä tutkituista jauhatusprosessin muuttujista. TM-OHJE-arvon maksimi asetus on 104 %, joka vastaa taajuusarvoa 52 Hz. LM1 TM-OHJE-arvo 104 % vastaa noin 77,6 % kriittisestä pyörimisnopeusta. Minimitaajuutta sähkömoottorin ohjaukselle ei ole asetettu. (Helkala 2008, 36)

## 5.2 Lohkaremyllyn Hi-Lo-vuoraus

Vuorauksen tarkoitus myllyssä on suojata jauhinmyllyn runkoa iskulta ja estää rakennesien kulumista, sekä välittää liikettä myllyn sisällä olevaan kuormaan. Vuorauksen kulumiseen vaikuttavat monet eri tekijät, kuten vuorauslaattojen ja palkkien määrä, myllyn kierrosnopeus, lietetiheys, materiaalin syöttönopeus ja partikkelikoko. Nostopalkkien muoto, sekä palkkien profiili vaikuttavat kuorman liikkeeseen myllyssä. Pelkkä tasainen vuoraus jauhinmyllyssä johtaisi energianhukkaan ja vuorauksen nopeaan kulumiseen, joka on ei toivottua. (Powell 1990, 22)



Kuva 3. High ja Low nostopalkit (Dandotiya 2011, 3)

Myllyn toiminta muuttuu vuorauksen kuluessa, sillä kuorman kohtauskulma (Toe) myllyssä kasvaa myllyn kierrosnopeutta kasvatettaessa ja pienenee nostopalkin kuluessa. Jauhettavan malmin mineralogialla on suurin vaikutus vuorauksen kulumiseen. AG- ja SAG-myllyjen vuorauksella tuleekin olla hyvä iskun- ja hankautumisenkesto. Useissa tutkimuksissa on todettu erilaisten metalliseosten parantavan edellä mainittuja ominaisuuksia vuorauksen kulumisen suhteen. (Saghafian, Shabestari & Shaeri 2010; Abbasi & Eshghian 2017)



## 6 KUONARIKASTAMON JAUHATUSPIIRIN SÄÄTÖ

### 6.1 Jauhatusprosessin muuttujat

Jauhatusprosessit sisältävät usein monia muuttujia, joiden välillä on lineaarisia riippuvuuksia toistensa suhteen. Eniten jauhatustehon dynaamiseen käyttäytymiseen, sekä operointiin vaikuttavat kuitenkin syötteen mineralogia, kuten kovuus. Mitä kovempaa syötettävä malmi on sitä kauemmin jauhatusta kestää. Tämä voidaan huomata, kun jauhatustehoon syötetään enemmän konvertterikuonaa syötteen kuparipitoisuuden noustessa, jolloin kapasiteetti jauhatustehossa laskee. Toinen jauhatustehon kannalta tärkeä syötteeseen liittyvä muuttuja on raekokojakauma. Harjavallan kuonarikastamolla syötettävän materiaalin raekoosta ei ole mittaustietoa. Myllyyn syötettävän materiaalin raekokoon vaikutetaan seulomalla materiaalia ja murskaamalla palatavaraa kartiomurskaimella.

Kuonarikastamon jauhatustehossa muita muuttujia ovat tuotteen partikkelikoko, myllyn täyttöaste, etupäänvesi, kaivovesi, myllyn kierrosnopeus, myllyn teho, murskeensyöttö, kiertokuorma ja lietetiheys, joista kahta jälkimmäistä voidaan operoida myllypiiriin syötettävän vesimäärän avulla. Käyttöhenkilökunta operoi jauhatustehoa pitämällä tuotteen partikkelikoon tarpeeksi hienona ja lietetiheyden vaahdotukselle optimina, eikä operoimalla kapasiteetin mukaan.

### 6.2 Jauhatuspiirin tuotteen raekoon säätö

Jauhatuspiirin tuotteen raekokoa voidaan säätää myllyn syötettävän veden määrän, loh-kare-murskeensyötön suhteella, sekä luokittimen erotusrajan avulla. Jauhatuspiirin syklonin paineella on myös vaikutus ylitteen raekokoon. Harjavallan kuonarikastamolla jauhatustehoon pumppukaivoa ohjataan säätöpiirillä pitämällä pinnankorkeus kaivossa vakiona kaivopumpun ohjauksen avulla. Tämä aiheuttaa vaihtelua sykloniin syötettävän lietteen tilavuusvirrassa ja paineessa. Lietetiheyden vaikutetaan kaivon syötettävän veden määrällä. Stabiili kiertokuorma vaikuttaa positiivisesti syklonin toimintaan.

Murskeensyöttöä lisättäessä jauhatusteho tuottaa karkeampaa tuotetta käyttöhenkilökunnan mukaan. Murskeen määrällä ei ole suurta vaikutusta myllyn tehonottoon, eikä täyttöasteeseen. Kuitenkin murskeen syöttöä kasvatettaessa jauhatustehoon tulee syöttää enem-

män vettä, jotta lietetiheys saadaan pidettyä optimissa, jolloin myös jauhatuspiirin kiertokuorma kasvaa. Murskeensyöttöä säädetään rikastamalla ohjaamalla murskesyöttimien hihnojen nopeutta. Näin tietyllä hihnanopeudella saadaan syöttöä tietty määrä tonneja tunnissa. Murskeen määrää ei enää erikseen määritetä vaa'alla. AG-myllyn syötteen rae-  
kokojakauman on todettu ennustavan hyvin myllyn kapasiteettia. Hienon syötteen lisäys nostaa kapasiteettia, mutta vain tiettyyn pisteeseen asti.

### **6.3 Jauhatuksen säätäminen tehonoton avulla**

Kuonarikastamalla lohkaremyllyjen syötön määrää säädetään myllyn tehonoton mukaan kappaleessa 3.1.2 mainitulla tavalla. Kahden primäärimyllyn kuonan syöttöä jakaa jakohihna, joten vain toiseen myllyyn voidaan syöttää kuonaa kerrallaan. Myllyn tehon laskiessa ala-arvorajan alle ohjauspiiri pyytää syöttöä ja jakohihna syöttää kuonaa myllyyn kunnes haluttu tehoasetus saavutetaan, tai vaihtoehtoisesti, jos kummatkin myllyt pyytävät syöttöä, kuonaa syötetään operaattorin määrittelemän ajan. Yleisesti tämän asetuksen arvona pidetään 90 sekuntia. Myllyihin syötettävän kuonan massa määritetään HK2 hihnakuuljettimella olevalla säteilevän hihnavaa'an avulla, josta kulkee yhtäaikaaisesti myös myllyihin syötettävä murske.

Jauhatuspiirin kuonan syötön määrän ohjaukseen käytettävä tehonotto ei ole paras mahdollinen tapa, sillä tehonoton avulla myllyn kuormaa ohjattaessa myllyn täyttöastetta ei huomioida lainkaan. Jauhatuspiirin kannalta on tärkeää pitää täyttöaste stabiilina. LM1 pyörimisnopeuden muutoksella voidaan vaikuttaa myllyn täyttöasteeseen. Myllyn tehon ollessa vakio kierrosnopeutta laskettaessa täyttöaste kasvaa, sillä saavuttaakseen saman tehon pienemmällä kierrosnopeudella myllyn kuorma on suurempi, päinvastainen ilmiö tapahtuu kierrosnopeutta nostettaessa.

## 7 JAUHATUSPIIRIN PROSESSIKOKEET

Jauhatuspiirin prosessitutkimuksen tavoitteena oli optimoida Hi-Lo-vuorauksen vaihtamisen jälkeisiä ajoparametreja. Prosessikokeissa selvitettiin primäärisen jauhatuksiin eri tekijöiden vaikutusta lopputulokseen. Prosessikokeiden tavoitteena oli nostaa jauhatuksiin kapasiteettia, sekä pitää jauhatuksiin tuotteen raekoko vaahdotuksiin optimaalisena. Jauhatuspiirin raekokoa seurattiin raekokoanalysointilaitteen (PSI-500) avulla sekä prosessinäytteillä. Raekokoanalysointilaitteella mitataan jauhatuksiin tuotteen raekokoa jatkuvatoimisesti. Jauhatuspiirin kapasiteetin analysointiin käytettiin DNA-automaatiojärjestelmän prosessidataa. Prosessikokeissa tutkitut muuttujat olivat: lohkaremyllyn sähkömoottorin taajuusmuuttajan ohjausarvo, myllyyn syötettävän murskeen määrä, myllyn tehoarvo, myllyyn syötettävän etupäänveden määrä, myllyn kaivon syötettävän veden määrä, sekä murskeen syötön vaikutus partikkelikokoon sekä jauhatuksen kapasiteettiin. Koeajojen aikana myllyyn ei lisätty kuulapanosta.

### 7.1 Prosessikokeiden suorittaminen

Prosessikokeet suoritettiin neljän viikon sykleissä, siten, että jokaisessa prosessikokeessa tehtiin muutoksia lohkaremylly 1 ajoparametreihin edellisen koeajon ja prosessidatan perusteella (Neljänä viikon mittaisena koeajona). Ensimmäinen viikon koeajo oli aikavälillä 17.10.2018-24.10.2018, toinen koeajoviikko 24.10.2018-31.10.2018, kolmas koeajoviikko 31.10.2018-7.11.2018 sekä neljäs koeajoviikko 7.11.2018-14.11.2018. Koeajojen aikana jauhatuksiin käyttöaste pyrittiin pitämään mahdollisimman tasaisena vertailukelpoisen mittausdatan tuottamiseksi. Taulukossa yksi on esitetty koeajoviikkojen suunnitellut ajoparametrit jauhatuksiin.

Taulukko 1. Prosessikokeiden ajoparametrit

	Murskesyöttö (t/h)	Teho (kW)	TM-Ohjaus (%)	Kaivovesi (m <sup>3</sup> /h)	Etupäänvesi (m <sup>3</sup> /h)
<b>17.10-24.10</b>	20,00	900-800	86,00	10,0-20,0	4,50
<b>24.10-31.10</b>	18,00	800,00	88,00	10,0-20,0	5,00
<b>31.10-7.11</b>	24,00	800-850	92,00	10,0-20,0	4,50
<b>7.11-14.11</b>	26,00	800-850	94,00	10,0-20,0	4,00

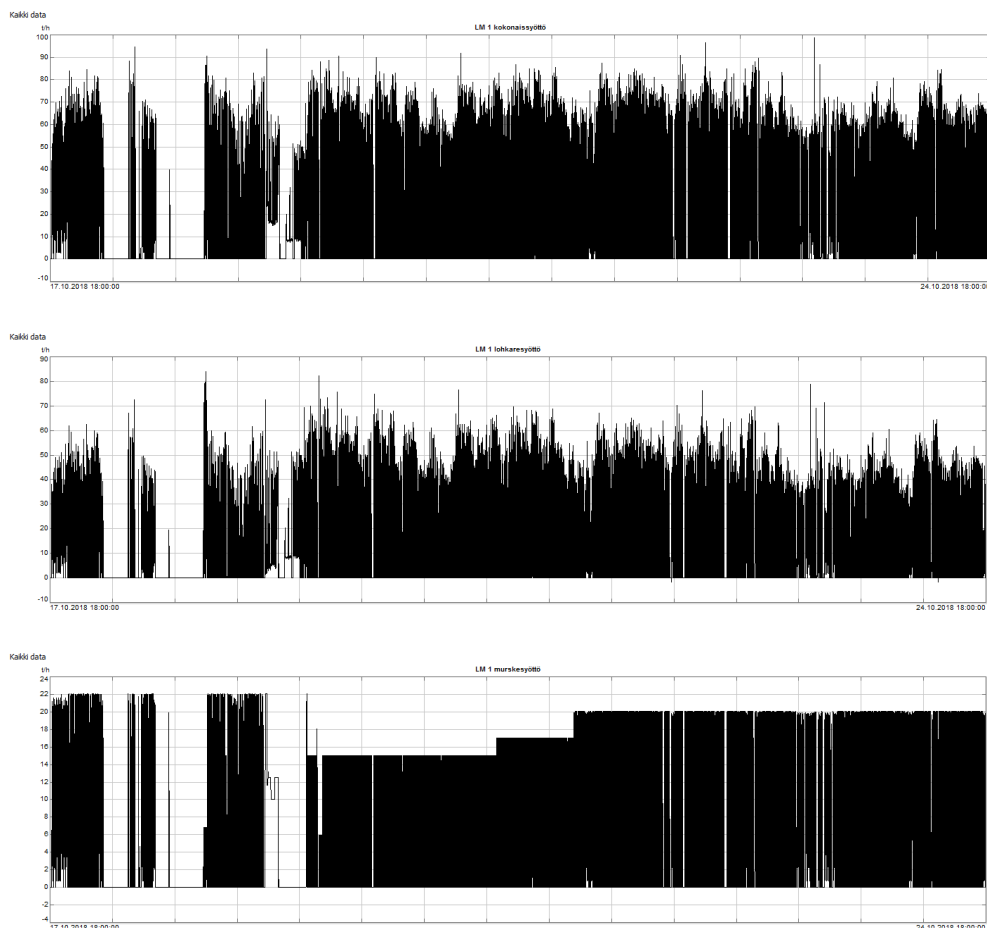
### **7.1.1 Prosessikokeiden näytteenotto**

Prosessikokeiden mittausdataa koeajojaksojen ajalta käsiteltiin, jotta voitiin selvittää prosessimuuttujien korrelaatiota jauhatuspiirin kapasiteettiin, sekä tuotteen partikkelikoon. Jauhatuspiiristä otettiin näytteitä jokaisen koeajoviikon aikana. Jauhatuspiiristä otetut näytteet olivat lohkaremyllyn luokittimen ylite sekä alite. Ylitteestä ja alitteesta määritettiin seula-analyysien lisäksi myös lietetiheydet.

## 8 PROSESSIKOKEET JA NIIDEN TARKASTELU

### 8.1 Prosessikokeiden ensimmäinen koeajo

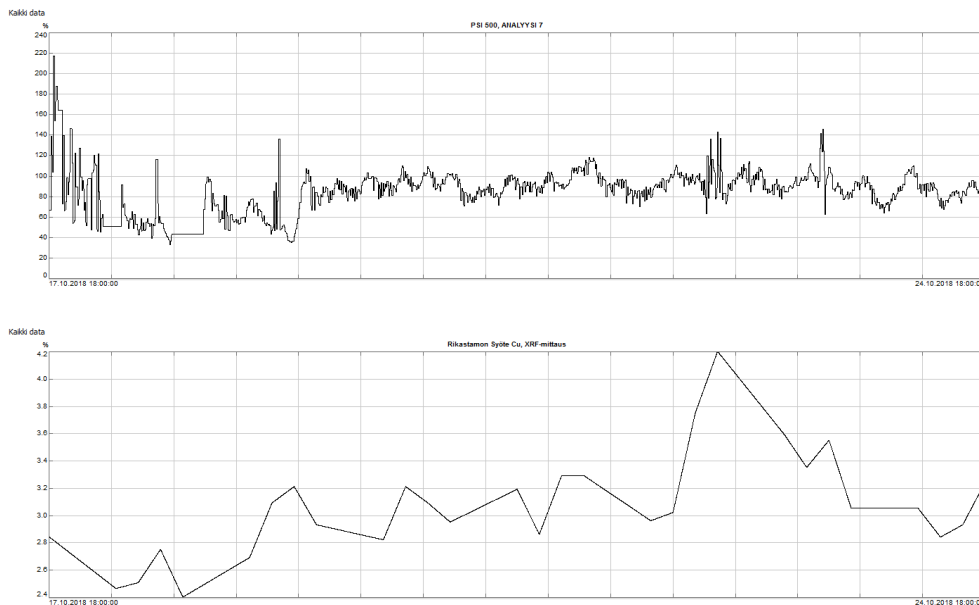
Jauhatuspiirin prosessiparametrit ensimmäiseen koeajoon olivat seuraavat: lohkaremyllyn sähkömoottorin taajuusmuuttajan ohjausarvo 88%, lohkaremyllyn etupäänvesi 4,5 m<sup>3</sup>/h, murskeensyöttö vakioituna arvoon 20 t/h ja lohkaremyllyn teho 800 kW sekä lohkaremyllyn kaivonvettä kuonarikastamon operaattorit säätivät vapaasti lohkaremyllyn tuotteen lietetiheyden pitämiseksi arvossa 50%. Ensimmäiseen koeajoon valittiin jauhatuspiirin pienempi luokitin. Viikon koeajojakson aikana lohkaremyllyn käytettävyys oli 88,5 %.



Kuva 4. Jauhatuspiirin kokonaissyötön lohkare- ja murskesyötön suhde 17.10-24.10.

Ensimmäiseen viikon koeajoon lähdettiin tehoasetuksella 900 kW, joka osoittautui liian korkeaksi, kun laskettiin pyörimisnopeuden ohjausta arvoon 88 %. Tämä huomattiin täyttöasteen kasvamisena liian suureksi, eli jauhatusmyllyn syötettiin enemmän malmia kuin se pystyi käsittelemään. Täten koeajo suoritettiin ensimmäistä päivää lukuun

ottamatta tehoarvolla 800 kW, jotta täyttö-aste ei olisi liian suuri ja saavutettaisiin parempi kapasiteetti jauhatuspiirille. Normaalisti lohkaremylly 1 ajetaan ohjausarvolla 90 %, jolloin yleensä lohkaremyllyä ajetaan 900 kW tehoasetuksella.



Kuva 5. Jauhatuspiirin tuotteen partikkelikoko, sekä syötteen Cu-pitoisuus 17.10-24.10.

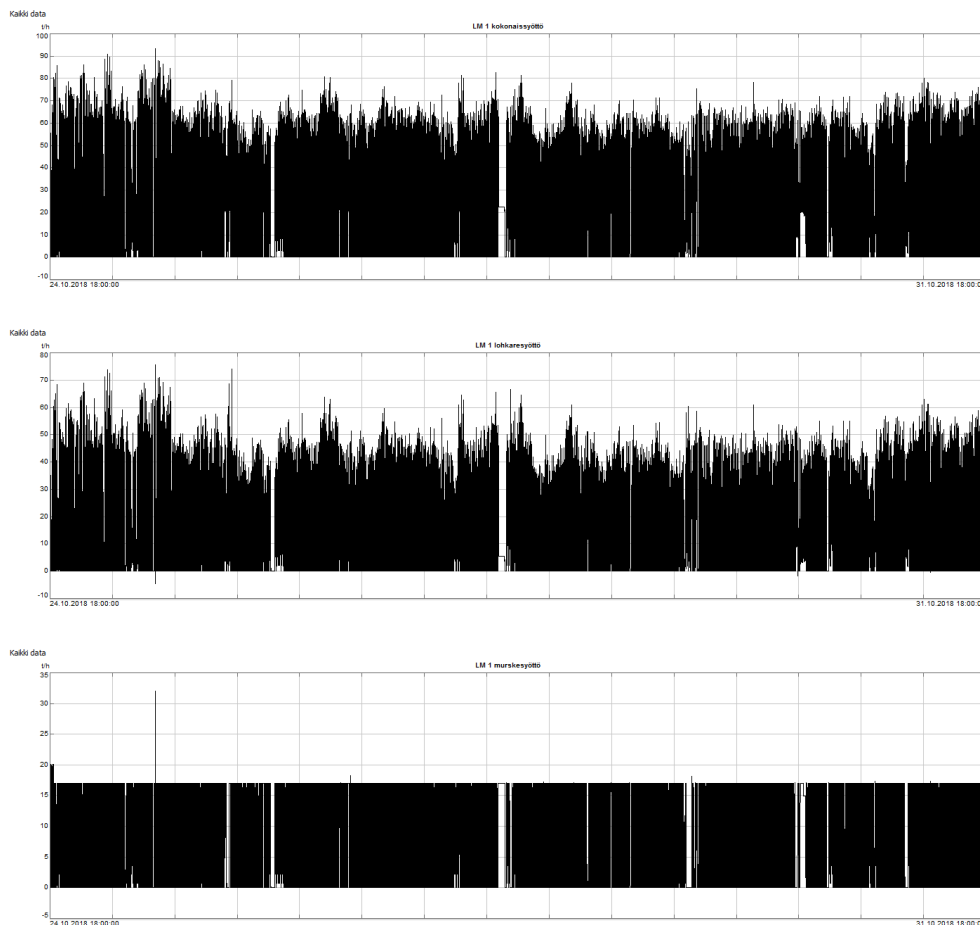
PSI-500 Analyysi 7 (kuva 5) kertoo lohkaremyllyn tuotteen raekoon. Voidaan havaita, että vuorauksen jälkeen koeajon alussa ensimmäisen vuorokauden ajan jauhatuspiiri tuotti karkeaa tuotetta. Ensimmäisen viikon koeajon keskimääräinen partikkelikoko oli 84,5 µm raekokoanalysointorin mittausdatan mukaan.

Jauhatuspiirin tuotteen raekokoon voidaan vaikuttaa lohkaresyötön ja murskeensyötön suhteella, sekä kuonan viipymäajalla myllyssä, johon vaikuttaa myllyyn syötettävän veden ja kuonan määrä. Lohkaresyötön keskiarvo viikon koeajojaksolle oli 14,8 t/h, sekä murskeensyötön keskiarvo oli 7,6 t/h, joista saadaan kokonaissyötön keskiarvoksi 22,4 t/h. Kokonaissyötön avulla voitiin selvittää viikon vuorokautinen keskiarvo, joka oli 537,4 t/d, jos kokonaissyötön keskiarvoon ei huomioida koeajon kahta ensimmäistä päivää, jolloin prosessiongelmia ilmeni. Tällöin arvo olisi vastaavasti 586,2 t/d.

Syötteessä on aina metallista kuparia pieniä määriä. Korkea pitoisuus voi olla myös sulfidista kuparia. Tavoite syötettävän kuonan kuparipitoisuudelle on 3,3 %. Mikäli kuparipitoisuus on tätä suurempi, syöte sisältää todennäköisesti normaalia suuremman määrän

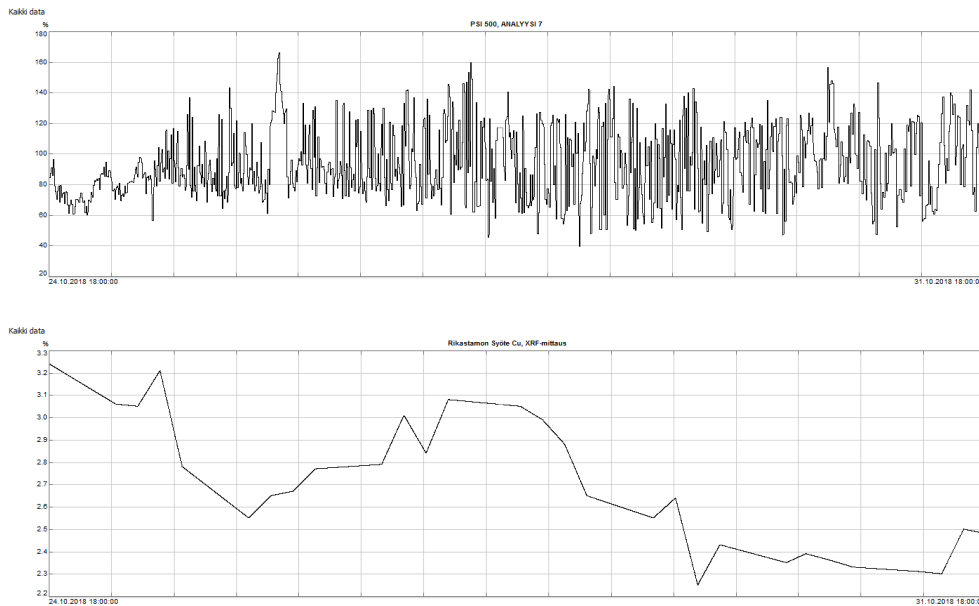
metallista kuparia, mikä ei jauhdu kunnolla ja heikentää vaahdotuksen talteen saantia. Syötteen keskimääräinen Cu-pitoisuus ensimmäisen viikon koeajolle oli 3,06 %.

Jauhatuspiirin prosessiparametrit toiseen viikkoon olivat seuraavat: lohkaemyllyn sähkömoottorin taajuusmuuttajan ohjausarvo 86 %, lohkaemyllyn etupäänvesi 5 m<sup>3</sup>/h, murskeensyöttö vakioituna noin 18 t/h, lohkaemyllyn teho 800 kW. Lohkaemyllyn kaironvettä operaattorit säätivät vapaasti lietetiheyden pitämiseksi arvossa 50 %. Lohkaemyllyn käytettävyys viikon ajonjakson aikana oli 99,6 %.



Kuva 6. Jauhatuspiirin kokonaissyötön lohka- ja murskesyötön suhde 24.10-31.10.

Lohkaesyötön keskiarvo toisen viikon koeajokselle oli 16,5 t/h, sekä murskeensyötön keskiarvo oli 8,3 t/h, joista saadaan kokonaissyötön keskiarvoksi 24,8 t/h. Kokonaissyötön avulla voitiin selvittää viikon vuorokautinen keskiarvo, joka oli 597,9 t/d toiselle koeajoviikolle. Tämän koeajon aikana siirryttiin talviaikaan, joten koeajo oli ajallisesti tunnin muita pidempi.



Kuva 7. Jauhatuspiirin tuotteen partikkelikoko, sekä syötteen Cu-pitoisuus 24.10-31.10.

Toisen koeajoviikon 24.10.2018-31.10.2018 raekokoanalysointimittauksissa (kuva 7) todettiin huomattavasti enemmän hajontaa verrattuna edelliseen viikkoon (kuva 5). Jauhatuspiirin ajossa oleva luokitin vaihdettiin pienemmästä luokittimesta suurempaan 25.10, jonka jälkeen hajontaa myllyn tuotteen partikkelikoossa alkoi esiintyä. Isomman syklonin yliteaukon koko oli 120 mm ja aliteaukon koko 60 mm. Koeajojen viikoittaisissa raekokojen keskiarvoissa havaittiin eroja, viikon 2 koeajon keskimääräinen raekoko oli 93,2  $\mu\text{m}$ . Toisen koeajoviikon syötteen keskimääräinen Cu-pitoisuus oli 2,7 %.

Prosessikokeiden aikana kerätyistä näytteistä määritettiin lietetiheydet näytteiden massan avulla. Kerätyille näytteille tehtiin seula-analyysi partikkelikokojakauman d80-arvon selvittämiseksi, jotta tiedettiin, miten muutokset prosessimuuttujissa olivat vaikuttaneet loh-karemyllyn ylitteeseen ja alitteeseen. Ensimmäisen koeajon tulokset esitetty liitteessä 2.

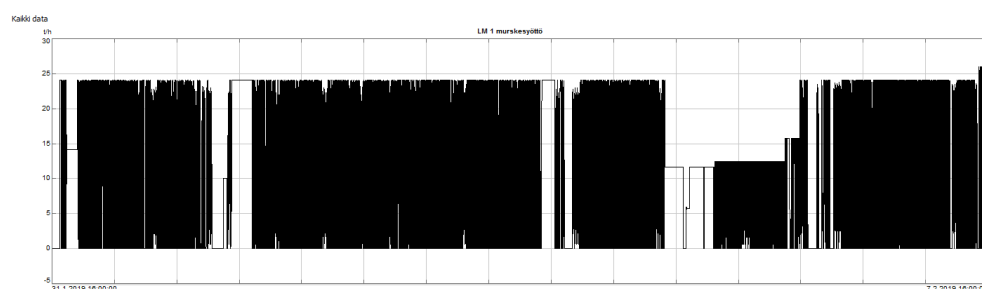
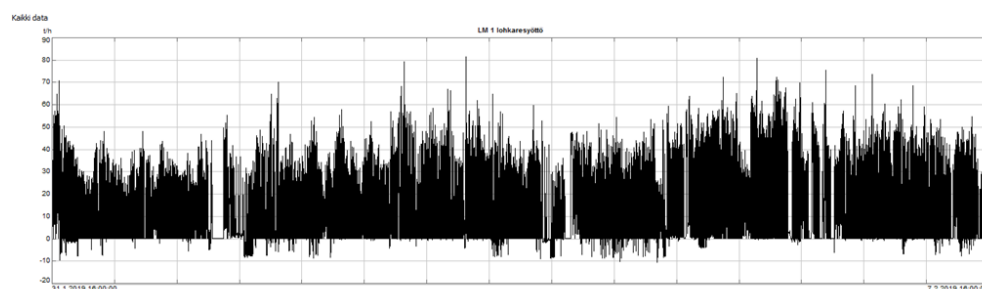
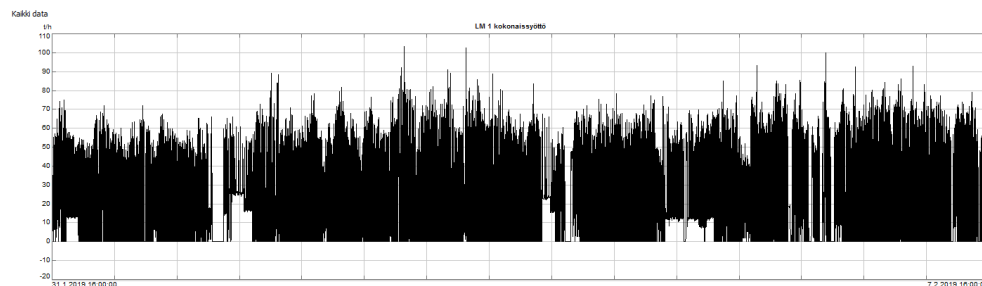
Suoritetuista koeajoista havaittiin, jauhatuspiirin kapasiteetin olevan korkeampi ajettaessa suuremmalla luokittimella. Tällöin kuitenkin jauhatuspiirin tuotteen raekoon hajonta kasvoi. Suuremmalla luokittimella jauhatuspiiriä ajettaessa havaittiin myös paljon vaihtelua loh-karemyllyn pumppukaivon pinnassa. Ensimmäisen koeajon aikana loh-karemyllyn tuote jauhettiin liian hienoksi kummankin viikon aikana (liite 2). Tuotteen liiallinen hienous havaittiin analysoiduista prosessinäytteistä, joissa ylitteen partikkelikoot olivat 86  $\mu\text{m}$ , 88  $\mu\text{m}$ , 78  $\mu\text{m}$ , 92  $\mu\text{m}$ , 69  $\mu\text{m}$ , sekä 78  $\mu\text{m}$  ensimmäisen koeajon aikana. Lohka-



remyllyn tuotteen kehitystä seurattiin PSI-raekokoanalysointorin avulla, mitä hienomaksi jauhatuspiirin tuotetta jauhettiin, sitä enemmän havaittiin eroa PSI-raekokoanalysointorin ja prosessinäytteiden välillä. Luokittimella saatiin tuotettua tasaisempaa tuotetta, raekoossa havaittiin vähemmän hajontaa, jolloin myös vaahdotusprosessia voidaan ajaa stabiilimmin. Jos jauhatuspiirissä jauhetaan tuote hienomaksi kuin on tarvetta, niin jauhatuspiirin kapasiteetti ei saavuta parasta tasoaan. Ensimmäisen kahden viikon mittaiselta ajanjaksolta koostettiin dataa prosessin muuttujista, joita käytettiin toisen koeajon parametrien valitsemiseen.

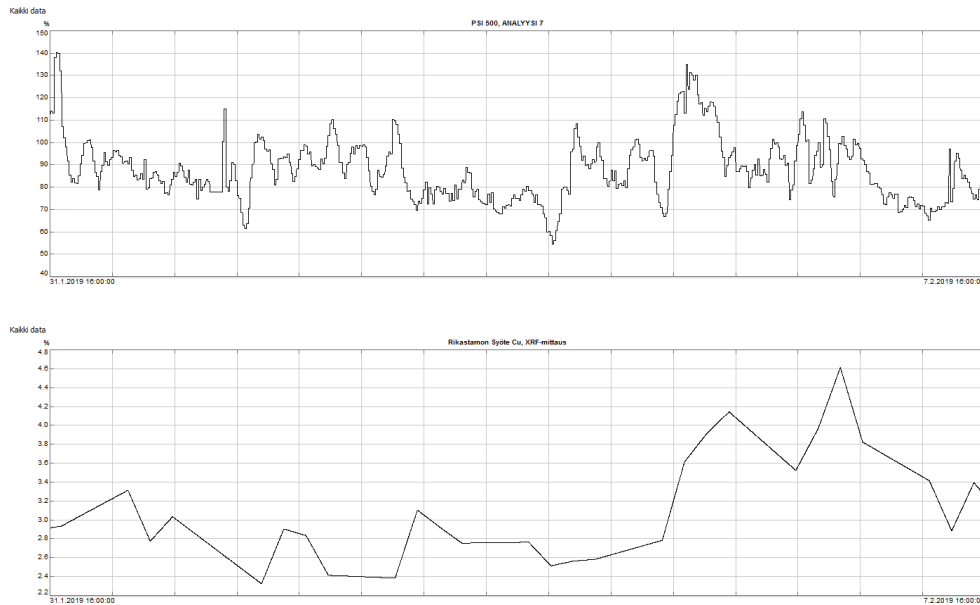
## 8.2 Prosessikokeiden toinen koeajo

Jauhatuspiirin prosessiparametrit toiseen koeajoon olivat seuraavat: lohkaremyllyn sähkömoottorin taajuusmuuttajan ohjausarvo 92%, lohkaremyllyn etupäänvesi 4,5 m<sup>3</sup>/h, murskeensyöttö vakioituna arvoon 24 t/h, lohkaremyllyn teho 800 kW ensimmäiset kolme vuorokautta ja neljä vuorokautta teholla 850 kW. Lohkaremyllyn kaivonvettä kuonarikastamon operaattorit säätivät vapaasti lohkaremyllyn tuotteen lietetiheyden pitämiseksi arvossa 50%. Toiseen koeajoon valittiin jauhatuspiirin isompi luokitin, jossa käytettiin 120 mm yliteholkkia. Koeajon aikana lohkaremyllyn käytettävyyttä oli 94,3 %.



Kuva 8. Jauhatuspiirin kokonaissyötön lohkar- ja murskesyötön suhde 31.1-7.2.

Lohkaremyllyn tehonmuutoksella kummankin viikon aikana tutkittiin tehoasetuksen muutoksen vaikutusta kapasiteettiin ja partikkelikokoon uudella Hi-Lo-vuorauksella. Toisen koeajon ensimmäisen kolmen vuorokauden aikana vuorokautinen kapasiteetti oli 586,3 t/d teholla 800 kW. Teholla 850 kW jauhatuspiirin kapasiteetin keskiarvo nousi 600,1 t/d asti.



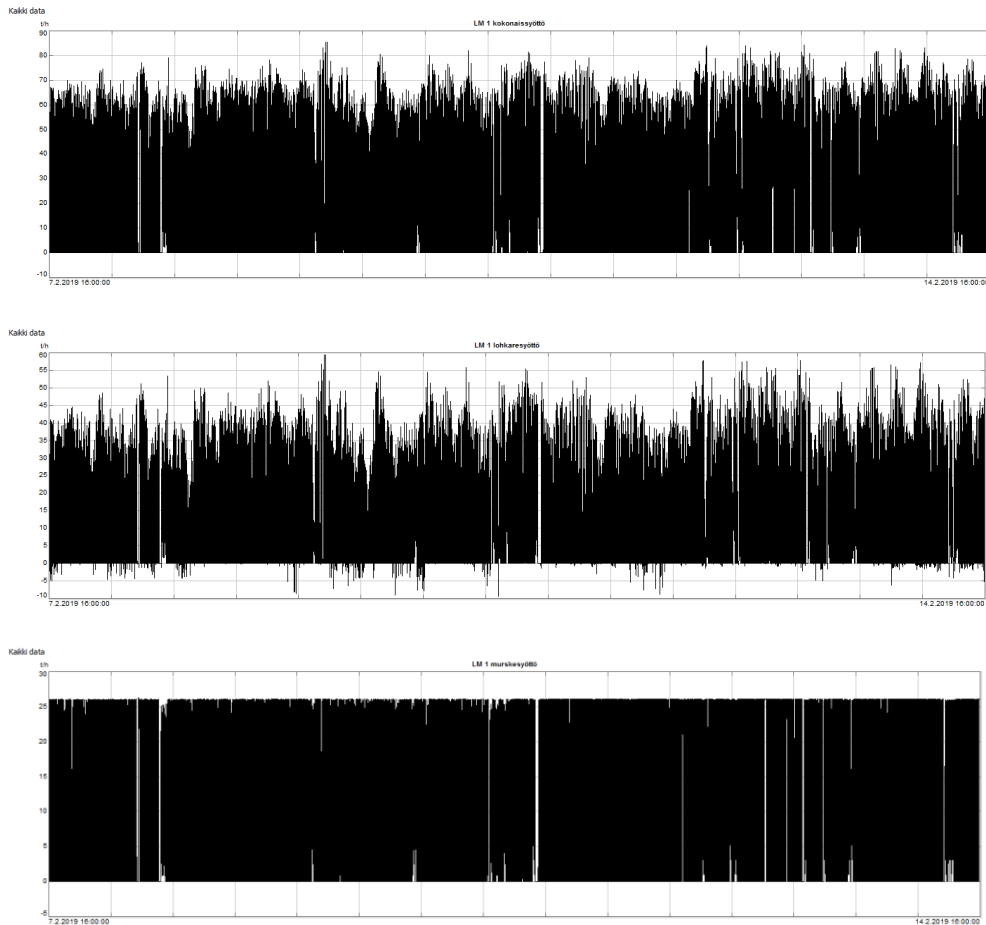
Kuva 9. Jauhatuspiirin tuotteen partikkelikoko, sekä syötteen Cu-pitoisuus 31.1-7.2.

Toisen koeajon ensimmäisen viikon aikana 31.1-7.2 PSI-500 analysaattorin raekokoon keskiarvo oli 87,5  $\mu\text{m}$ . Partikkelikokoon keskiarvoa onnistuttiin nostamaan edellisestä koeajosta lisäämällä murskeensyöttöä. Cu-syötteen keskiarvo samalla ajanjaksolla oli 3,07 %.

Lohkaresyötön keskiarvo viikon koeajokselle oli 13,6 t/h, sekä murskeensyötön keskiarvo oli 11,2 t/h, joista saadaan kokonaissyötön keskiarvoksi 24,5 t/h. Kokonaissyötön avulla voitiin selvittää viikon vuorokautinen keskiarvo, joka oli 595,7 t/d.

Jauhatuspiirin prosessiparametrit toiseen viikkoon olivat seuraavat: lohkaremyllyn sähkömoottorin taajuusmuuttajan ohjausarvo 94 %, lohkaremyllyn etupäänvesi 4,5  $\text{m}^3/\text{h}$ , murskeensyöttö vakioituna arvoon 26 t/h, lohkaremyllyn teho 800 kW kolme ensim-

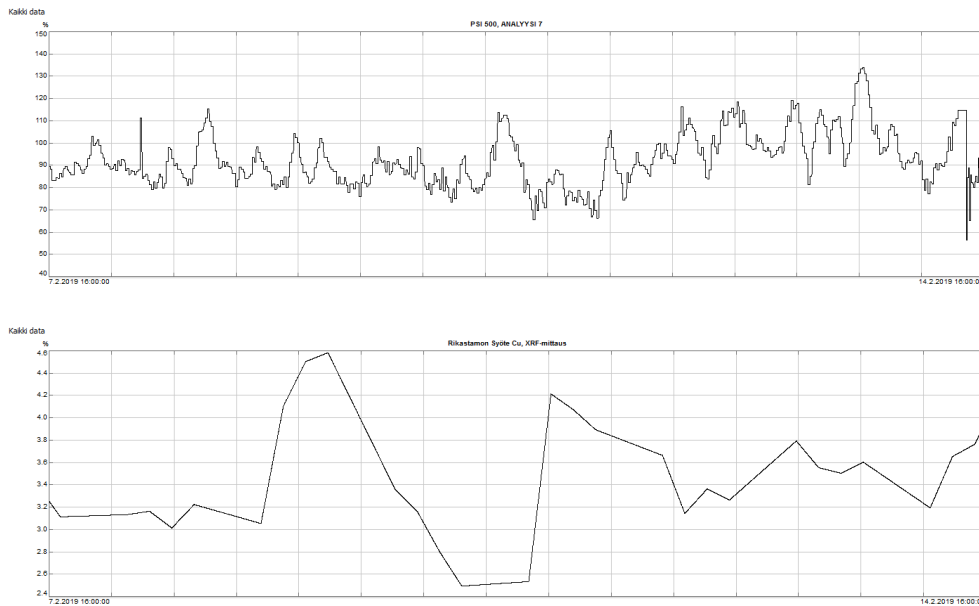
mäistä vuorokautta ja neljä viimeistä teholla 850 kW. Lohkaremyllyn kaivonvettä operaattorit säätivät vapaasti lietetiheyden pitämiseksi arvossa 50 %. Viikon koeajon käytettävyys lohkaremyllylle oli 100 %.



Kuva 10. Jauhatuspiirin kokonaissyötön lohkaare- ja murskesyötön suhde 7.2-14.2.

Lohkaresyötön keskiarvo toisen viikon koeajojaksolle oli 12,9 t/h, sekä murskeensyötön keskiarvo oli 12,9 t/h, joista saadaan kokonaissyötön keskiarvoksi 25,8 t/h. Kokonaissyötön avulla voitiin selvittää viikon vuorokautinen keskiarvo, joka oli 618,5 t/d koko toiselle koeajoviikolle.

Lohkaremyllyn kapasiteetin parhaimmat arvot saavutettiin viimeisellä koeajoviikolla, jolloin toisen viikon aikana kapasiteetti oli 594,2 t/d teholla 800 kW neljän ensimmäisen vuorokauden aikana. Teholla 850 kW jauhatuspiirin kapasiteetin keskiarvo nousi 636,7 t/d asti kolmen viimeisen vuorokauden aikana.



Kuva 11. Jauhatuspiirin tuotteen partikkelikoko, sekä syötteen Cu-pitoisuus 7.2-14.2.

Toisen koeajon toisella koeajoviikolla 7.2-14.2 partikkelikoko saatiin pidettyä stabiilina. Toisen koeajon ensimmäisen viikon aikana PSI-500 analysaattorin raekoon keskiarvo oli 92,3 µm. Näin partikkelikoon keskiarvoa onnistuttiin nostamaan edellisestä koeajosta. Cu-syötteen keskiarvo samalla ajanjaksolla oli 3,43 %, mihin vaikuttaa osaltaan 9.2, sekä 11.2 tapahtunut syötteen Cu-pitoisuuden nopea nousu.

Toisen koeajon ylitteen partikkelikoon d80-arvot esitetty liitteessä 5. Prosessinäytteiden partikkelikoot toisessa koeajossa olivat 51 µm, 52 µm, 79 µm, 66 µm, 103 µm, sekä 67 µm kahden koeajoviikon aikana.

### 8.3 Prosessikokeiden toteutuneet ajoparametrit

Taulukoihin 2 ja 3 on koottu neljän koeajoviikon ajalta prosessiparametrien vuorokautiset keskiarvot. Vuorokautista kokonaissyötön keskiarvoa 28.10.2018 kasvatti talviaikaan siirtyminen.

Taulukko 2. Ensimmäisen koeajon prosessiarvojen vuorokautiset keskiarvot

	KOKO- NAIS- SYÖTTÖ (T/D)	MURSKE- SYÖTTÖ (T/H)	TEHO (KW)	TM-OH- JAUS (%)	ETU- PÄÄN- VESI (M <sup>3</sup> /H)	SYÖT- TEEN CU- PITOI- SUUS (%)	PSI-500 D80 (µM)
18.10.2018	392,11	5,68	658,04	88,07	3,35	2,61	73,65
19.10.2018	439,45	5,60	749,24	88,00	3,81	2,79	62,75
20.10.2018	575,50	6,86	803,52	88,00	4,50	2,97	90,89
21.10.2018	585,76	8,02	805,31	88,00	4,50	3,10	90,52
22.10.2018	598,77	9,10	795,17	88,00	4,45	3,29	93,96
23.10.2018	590,24	8,85	783,47	88,00	4,42	3,65	94,65
24.10.2018	580,95	9,04	802,61	88,00	4,50	3,01	85,21
25.10.2018	539,28	7,39	796,63	86,06	4,99	3,11	81,11
26.10.2018	586,79	8,01	790,88	86,00	4,75	2,66	95,31
27.10.2018	596,85	8,37	802,50	86,00	5,00	2,85	93,58
28.10.2018	637,81	8,95	801,04	86,00	4,97	2,99	94,87
29.10.2018	590,17	7,98	800,62	86,00	4,60	2,53	93,28
30.10.2018	607,34	8,75	798,81	86,00	4,91	2,38	99,32
31.10.2018	627,38	8,49	801,33	86,00	4,98	2,36	95,31

Taulukko 3. Toisen koeajon prosessiarvojen vuorokautiset keskiarvot

	KOKO- NAIS- SYÖTTÖ (T/D)	MURSKE- SYÖTTÖ (T/H)	TEHO (KW)	TM-OH- JAUS (%)	ETU- PÄÄN- VESI (M <sup>3</sup> /H)	SYÖT- TEEN CU- PITOI- SUUS (%)	PSI-500 D80 (µM)
1.2.2019	596,24	11,22	787,46	92,00	4,35	3,04	92,00
2.2.2019	553,61	12,25	733,51	92,00	4,01	2,67	86,51
3.2.2019	608,95	11,70	822,13	92,00	4,50	2,61	87,85
4.2.2019	572,98	12,04	838,55	92,00	4,37	2,69	76,33
5.2.2019	645,47	11,34	825,15	92,00	3,98	3,04	98,10
6.2.2019	616,99	8,12	830,18	92,00	3,61	3,96	92,72
7.2.2019	568,32	11,69	848,88	92,16	4,40	3,47	78,87
8.2.2019	587,44	11,87	798,92	94,00	3,94	3,12	88,86
9.2.2019	601,11	12,39	802,86	94,00	3,99	3,52	90,31
10.2.2019	594,13	12,68	815,95	94,00	4,00	3,63	86,61
11.2.2019	623,37	12,28	852,98	94,00	4,00	3,09	84,79
12.2.2019	630,82	13,53	852,52	94,00	3,99	3,57	92,31
13.2.2019	669,63	13,64	850,49	94,00	3,97	3,54	104,21
14.2.2019	622,93	13,76	851,96	94,00	4,00	3,50	98,73

Ensimmäisen koeajoviikon kapasiteetti oli huonoin neljästä koeajosta, osaltaan johtuen jauhatuspiirin huonosta käytettävyydestä koeajon aikana. Ohjausta laskettaessa 90-% arvon alle myllyä ei voida operoida kovin suurella teholla (900 kW) täyttöasteen kasvun

vuoksi, joka osaltaan pienentää vuorokautisen kokonaissyötön määrää. Tämä myös osoittaa sen, että jauhatuspiiriä ajettaessa 90-% ohjauksella ja 900 kW teholla myllyn täyttöaste on todella lähellä maksimia. Toisella koeajoviikolla myllyn kokonaissyöttöä kasvatti murskesyötön lisäys, joka myös nosti myllyn tuotteen partikkelikokoa. Lohkaresyötössä kahden ensimmäisen koeajoviikon aikana ei ollut suurta muutosta. Etupäänveden kasvataminen lisäsi myllyn kokonaissyöttöä.

Kolmannen koeajoviikon ohjauksen nosto mahdollisti myllyn operoimisen suuremmalla teholla. Kolmas ja neljäs koeajoviikko suoritettiin 800-850 kW teholla. Tehon nostolla sekä kasvattamalla ohjausarvoa kasvatettiin myllyn kokonaissyöttöä. Myllyä operoitaessa suuremmalla teholla, myös murskeensyötön nostaminen lisäsi lohkaresyöttöä. Myllypiirin paras kapasiteetti saavutettiin neljännellä koeajoviikolla. Varsinkin 850 kW teholla ajettaessa myllyn kokonaissyöttö ylitti 600 t/d keskiarvon päivittäin, tänä aikana myös syötteen Cu-pitoisuus korkeimmillaan. Kokonaisuudessa toisen koeajon prosessinäytteiden partikkelikoot olivat osittain todella hienoja (51-67  $\mu\text{m}$ ). Näytteiden hienot partikkelikoot johtuvat pienestä murskesyötöstä, sekä suuresta myllypiirin vesikuormasta. Hienon syötteen lisäyksen on tutkimuksissa osoitettu kasvattavan jauhatuspiirin kapasiteettia tiettyyn rajaan asti. Murskeensyötön lisäyksellä koeajojen aikana onnistuttiin kasvattamaan partikkelikokoa, sekä lisäämään myllyn kapasiteettia. Suurempia murskemääriä ei koeajoissa päästy ajamaan. Paras lohkaresyöttö, sekä myllyn kapasiteetti saavutettiin 24-26 t/h murskeensyötöllä. Jauhatuspiirin kiertoa lisättäessä vesikuormaa myös syklonin tuottama ylitteen partikkelikoko pieneni.

Partikkelikoon hienous huomataan varsinkin myllyä pienemmällä (800 kW) teholla ajettaessa suuremman luokittimen kanssa, kun sykloniin syötettävän lietteen kiintoainepitoisuus on pieni. Pienemmällä teholla myllyä ajettaessa tulisi käyttää pienempää luokitinta. Syöttökonsentraatiolla on suora vaikutus luokittimen erotusrajaan ja tätä kautta jauhatuspiirin optimaaliseen toimintaa. Ajettaessa myllyä 850 kW tai isommalla teholla suurempi luokitin osoittautui luokittavan hyvin.

Myllyn nopeutta kasvattamalla uudella Hi-Lo-vuorauksella onnistuttiin kasvattamaan myllyn kapasiteettia tutkitulla välillä. Paras jauhatuspiirin kapasiteetti saavutettiin 94-% ohjauksella sekä 850 kW teholla. Myllyn ohjausarvon nosto mahdollistaa myös normaaliolosuhteissa suuremman kapasiteetin alentamalla täyttöastetta ja näin mahdollistamalla suuremman tehon myllylle. Kuten kappaleessa 4.4 todettiin, jauhatuksen kapasiteetti samalla

tehonoton arvolla voi vaihdella suuresti. Tehonoton ja myllyn kehänopeuden havaittiin vaikuttavan yhdessä kapasiteettiin. Näille löydettiin optimaalinen toimintapiste kokeellisesti uudella Hi-Lo-vuorauksella täyttöasteen osalta.

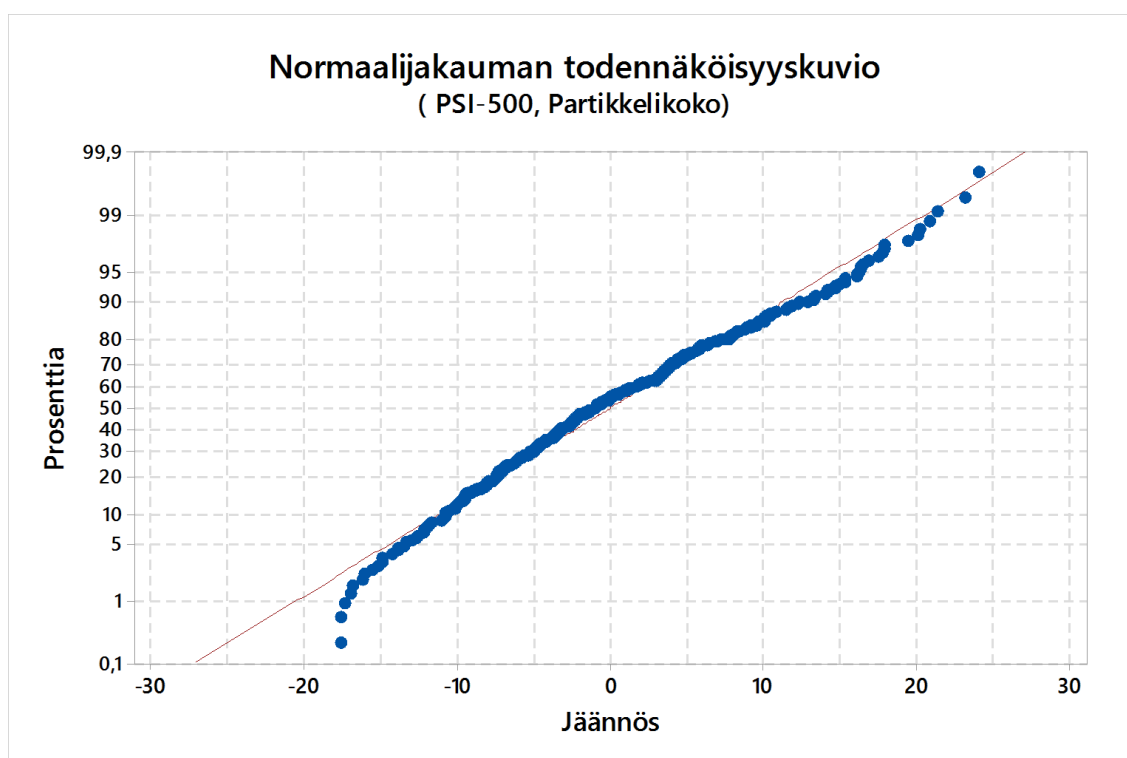
#### 8.4 Prosessikokeiden tulosten regressioanalyysi

Jauhatuspiirin prosessidatasta koeajojen ajalta koottiin keskiarvodata kullekin parametrimallille. Dataa käsiteltiin Minitab-ohjelman regressioanalyysin avulla jauhatuspiirin kapasiteettiin, sekä partikkelikokoon vaikuttavien tekijöiden selvittämiseksi. Analyysin selittävät muuttujat olivat PSI-500 partikkeliko ja LM1 lohkaresyöttö. Mallin avulla tutkittiin, kuinka voimakkaita vaikutuksia jauhatuspiirin tekijöillä on selitettäviin muuttujiin. Vaikuttavien muuttujien kerroin ilmaisee, kuinka suuri vaikutus muuttujalla on selittävään muuttujaan. Kertoimen etumerkki kertoo, onko muuttujalla positiivinen vai negatiivinen vaikutus selittävään muuttujaan. Jauhatuspiirin tekijät PSI-500-partikkelikoon mallissa olivat prosessivesi pumppukaivon, prosessivesi etupäänvesi, rikastamon syötteen Cupitoisuus, murskeensyöttö, taajuusmuuttajan-ohje ja myllyn teho. Lohkaresyötön mallissa muuttujat olivat prosessivesi pumppukaivon, etupäänvesi, rikastamon syötteen Cupitoisuus, murskeensyöttö ja taajuusmuuttajan-ohje. Lohkaresyötön mallissa ei käytetty myllyn tehoa 6.3 kappaleessa mainitun syöttötavan vuoksi, koska lohkaresyötöllä ja myllyn teholla on lineaarinen riippuvuus. Tekijöille on jokaiselle oma kerroin, esim. kasvatettaessa murskeensyöttöä yhdellä, partikkelikoko kasvaisi arvolla 2,453. Jokaiselle tekijälle on oma keskivirhe, sekä t-arvo, joka on estimaatti jaettuna keskivirheellä. P-arvo kertoo tekijän merkitsevyyden. Yleisesti tilastotieteessä käytetään p-arvoa  $< 0,05$ , jolloin todennäköisyys on vähemmän kuin 5 sadasta.  $R^2$ -luku regressioanalyysissä tarkoittaa mallin selitysastetta. Luku kertoo kuinka suuren osan selitettävän muuttujan regressioanalyysistä selittävät muuttujat pystyvät selittämään. Korjatussa  $R^2$ -luvussa on otettu huomioon mallin muuttujien lukumäärä, joka tekee malleista keskenään vertailukelpoisia.

Taulukko 4. Vaikuttavat tekijät PSI-500-partikkelikokoon ollessa selittävä muuttuja

Tekijä	Kerroin	Keskivirhe	T-Arvo	P-Arvo
Vakio	455,6	28,5	16,00	<0,001
Prosessivesi LM1 Pumppukaivoon	-0,861	0,175	-4,91	<0,001
Prosessivesi LM1 Etupäänvesi	-13,56	1,53	-8,84	<0,001
Rikastamon Syötteen Cu-pitoisuus	-0,67	1,05	-0,64	0,524
Murskeensyöttö LM1	2,453	0,261	9,41	<0,001
Taajuusmuuttajan ohjaus LM1	-2,490	0,300	-8,30	<0,001
Teho LM1	-0,1115	0,0153	-7,26	<0,001

Myllyn ylitteen partikkelikokoon vaikutusta on eniten etupäänveden määrällä. Mallissa tarkasteltu etupäänveden syöttö oli 4-5 m<sup>3</sup>/h, jolla välillä vettä lisättäessä saatiin nopeita muutoksia partikkelikokoon. Taajuusmuuttajan ohjauksen muutoksella havaittiin olevan toiseksi eniten vaikutusta partikkelikokoon. Kasvatettaessa myllyn pyörimisnopeutta partikkelikoko pieneni. Murskeensyötön lisäyksellä pystyttiin kasvattamaan myllyn partikkelikokoa. Tehon kasvattaminen pienensi ylitteen partikkelikokoa. Syötteen Cu-pitoisuuden p-arvon ollessa korkea, voidaan todeta, että syötteen vaihtelulla välillä 2,61-3,96 % ei ollut vaikutusta myllyn tuottamaan partikkelikokoon. Mallin korjattu selityskerroin on 36,56 %.



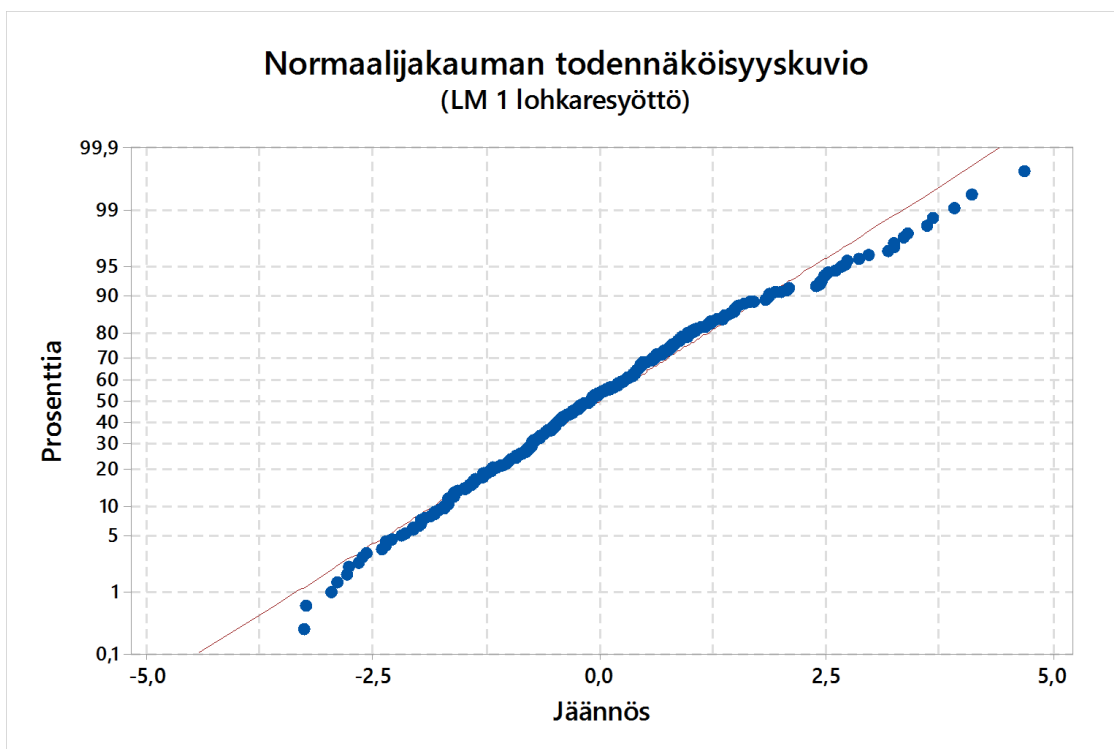


Kuva 12. PSI-500-partikkelikoon normaalijakauman todennäköisyyskuvio.

Taulukko 5. Vaikuttavat tekijät LM1 lohkaresyötön ollessa selittävä muuttuja

Tekijä	Kerroin	Keskivirhe	T-Arvo	P-Arvo
Vakio	30,0	12,0	2,49	0,013
Prosessivesi LM1 Etupäänvesi	2,292	0,336	6,83	<0,001
Prosessivesi LM1 Pumppukaivoon	-0,2425	0,0819	-2,96	0,003
Taajuusmuuttajan ohjaus LM1	0,460	0,135	3,41	0,001
Murskeensyöttö LM1	0,1579	0,0725	2,18	0,030
Rikastamon Syötteen Cu-pitoisuus	-0,738	0,277	-2,66	0,008

Lohkaresyötön määrään eniten vaikutusta oli myllyn etupäänveden määrällä. Lohkaremyllyn nopeudella havaittiin toiseksi suurin vaikutus lohkaresyötön määrään. Murskeensyötön lisäyksellä oli positiivinen vaikutus myllyn lohkaresyötiin. Prosessiveden lisäyksellä pumppukaivoon oli negatiivinen vaikutus, kuten myös syötteen Cu-pitoisuuden kasvulla. Mallin korjattu selityskerroin on 21,72 %.



Kuva 13. LM1 lohkaresyötön normaalijakauman todennäköisyyskuvio.

## 9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli tutkia Hi-Lo-vuorauksen jälkeisiä optimaalisia ajoparametreja jauhatuspiirille kapasiteetin maksimoimiseksi sekä tuottaa vaahdotukseen optimaalista partikkelikokoa samalla. Työn kirjallisuusosuudessa perehdyttiin kuonarikastamon toimintaan, jauhatusprosessin teoriaan, sekä käytössä olleeseen prosessilaitteistoon. Lisäksi käytiin läpi jauhatusprosessin eri tekijöiden vaikutusta jauhatuspiirin toimintaan. Kokeellisessa osuudessa selvitettiin prosessitekijöiden vaikutusta myllyn kapasiteettiin, sekä ylitteen partikkelikokoon uudella Hi-Lo-vuorauksella koeajoista saadun prosessidatan, sekä koeajon aikaisten prosessinäytteiden avulla.

Myllyn etupäänvettä lisättäessä saatiin nopeita muutoksia partikkelikokoon. Myös veden lisäys jauhatuspiirin 4-5 m<sup>3</sup>/h välillä hienonsi ylitteen partikkelikokoa. Etupäänveden lisäys hienontaa partikkelikokoa kuitenkin vain tiettyyn pisteeseen, kunnes myllypiirin kiertokuorma kasvaa liian suureksi. Myllyn kierrosnopeutta kasvatettaessa myllyn havaittiin tuottavan hienompaa tuotetta. Tehon muutoksella välillä 800-900 kW sekä pumppukaivon prosessiveden kasvattamisella myllyn pumppukaivoon oli pieni negatiivinen vaikutus partikkelikokoon. Pumppukaivon prosessivettä lisätäänkin jauhatusprosessiin nostamaan ylitteen lietetiheyttä vaahdotusta varten.

Koeajojen aikana taltioidut prosessinäytteet erosivat PSI-500 analysaattorin antamasta partikkelikoosta, varsinkin LM1 tuottaessa hienoa tuotetta (alle 70 µm). Prosessinäytteiden ja analysaattorin erot vaihtelivat välillä 10-30 µm.

Lohkaremyllyn kapasiteettiin voitiin vaikuttaa myös etupäänveden määrällä samalla tutkitulla välillä positiivisesti. Myllyn kierrosnopeutta kasvattamalla saavutettiin myös parempi kapasiteetti uudella Hi-Lo-vuorauksella. Parhaaseen jauhatuspiirin kapasiteettiin päästiin suurimmalla taajuusmuuttajan ohjauksella. Murskeensyötön lisäyksellä vaihteluvälillä 18-26 t/h parannettiin myllyn lohkaresyöntiä. Murskeensyöttö parantaa myllyn lohkaresyöntiä tiettyyn pisteeseen asti, prosessikokeissa suurempia murskemääriä ei päästy tutkimaan jauhatuspiirin vesikuorman pitämiseksi rajallisena.

Paras jauhatustulos tutkimuksen aikana uudella Hi-Lo-vuorauksella saavutettiin seuraavilla parametreilla 94 % myllyn taajuusmuuttajan ohjauksella, 850 kW teholla, 26 t/h murskeensyötöllä, sekä 4,5-5,0 m<sup>3</sup>/h etupäänveden syötöllä. Prosessikokeet suoritettiin

ilman kuulapanoksen lisäystä muiden jauhatuspiirin muuttujien tarkastelemiseksi, aikaisemmin on osoitettu kuulapanoksen lisäävän lohkaremyllyn kapasiteettia helpottamalla kriittisen materiaalin jauhatusta. Taajuusmuuttajan ohjauksen arvon kasvattamisen havaittiin laskevan myllyn täyttöastetta vakioteholla. Saatuja prosessiparametreja voidaan soveltaa myös rikastamon toisessa primäärijauhatusmyllyssä tällaisenaan. Kapasiteetin kannalta on hyvä selvittää kokeellisesti myllyn ohjauksen kasvattamisen vaikutuksia vielä arvosta 94 %.

Jauhatuspiirin tuottaman ylitteen lietetiheyteen on alettu kiinnittämään yhä enemmän huomiota, mikä on lisännyt huomattavasti myllypiirin vesikuormaa. Vesikuorman, sykloniin syötettävän tilavuusvirran ja paineen kasvaessa syklonin geometrisiin mittoihin ei kuitenkaan ole tehty muutoksia. Syklonoinnin toimivuuteen rikastamalla tulisi kiinnittää huomiota, jos jauhatuspiirin vaahdotukseen tuottaman ylitteen lietetiheyttä tullaan laskemaan alle nykyisen.

Isku-, hierto- ja kitkajauhatusmekanismien optimoimiseksi ja myllyn kapasiteetin parantamiseksi tulisi tutkia tapoja määrittää myllyn täyttöastetta pyörimisnopeuden ohjauksessa. Myllyn kuorman kohtauskulman määrittämiseen värähtelyn avulla on kehitetty mittalaitteita, joiden avulla myllyn täyttöasteen muutoksia voidaan havaita ja käyttää apuna myllyn operoinnissa.

## LÄHTEET

Abbasi Majid & Eshghian Roozbeh, *Wear and Failure Analysis of Semi-Autogenous Grinding Mill Liners*, Babol Noshirvani University of Technology, Iran 2017.

Aslani S, Shamsi M, Noparast M, Shafaie S.Z & Gharabaghi M, *Effect of grinding time on flotation recovery of copper smelting slags in Bardaskan district*, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran 2015.

Chen Xi-song, Li Shi-hua, Zhai Jun-yong, Li Qi, *Expert system based adaptive dynamic matrix control for ball mill grinding circuit*. School of Automation, Southeast University, Nanjing, China 2007.

Cleary W. Paul, *Charge behaviour and power consumption in ball mills: sensitivity to mill operating conditions, liner geometry and charge composition*. Int. J. Miner. Process, Clayton Victoria 2001.

Cleary W. Paul, *Predicting charge motion, power draw, segregation and wear in ball mills using discrete element methods*. CSIRO Division of Mathematical and Information Sciences, Australia 1998.

Dandotiya Rajiv, *Decision Support Models for the Maintenance and Design of Mill Liners, Doctoral thesis*. Division of Operation and Maintenance Engineering, Luleå University of Technology, 2011.

Dévay Attila, *The Theory and Practice of Pharmaceutical Technology*, University of Pécs Institute of Pharmaceutical Technology and Bio pharmacy. Hungary 2013.

Dimitrijevic Mile D, Urosevic Daniela M, Jankovic Zoran D & Antic Dejan V, *Recovery of copper slag and copper slag flotation tailings by oxidative leaching*. Physico-chemical Problems of Mineral Processing, Serbia 2014.

Gupta, Ashok, & D. S. Yan. *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction*, Elsevier Science & Technology, 2006.

Heiskanen Kari, *Experimental hydrocyclone roping models*. Department of Material Science, Helsinki University of Technology. Helsinki 2000.

Helkala Kimmo, *Kuonarikastamon jauhatuksen optimointi*. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Automaatiotekniikan koulutusohjelma, Tampere 2008.

Kauppi Päivi, Räisänen Marja-Liisa, & Myllyoja Sari., *Metallimalmikaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt*. Helsinki, Edita Prima Oy, Suomen ympäristökeskus 2011.

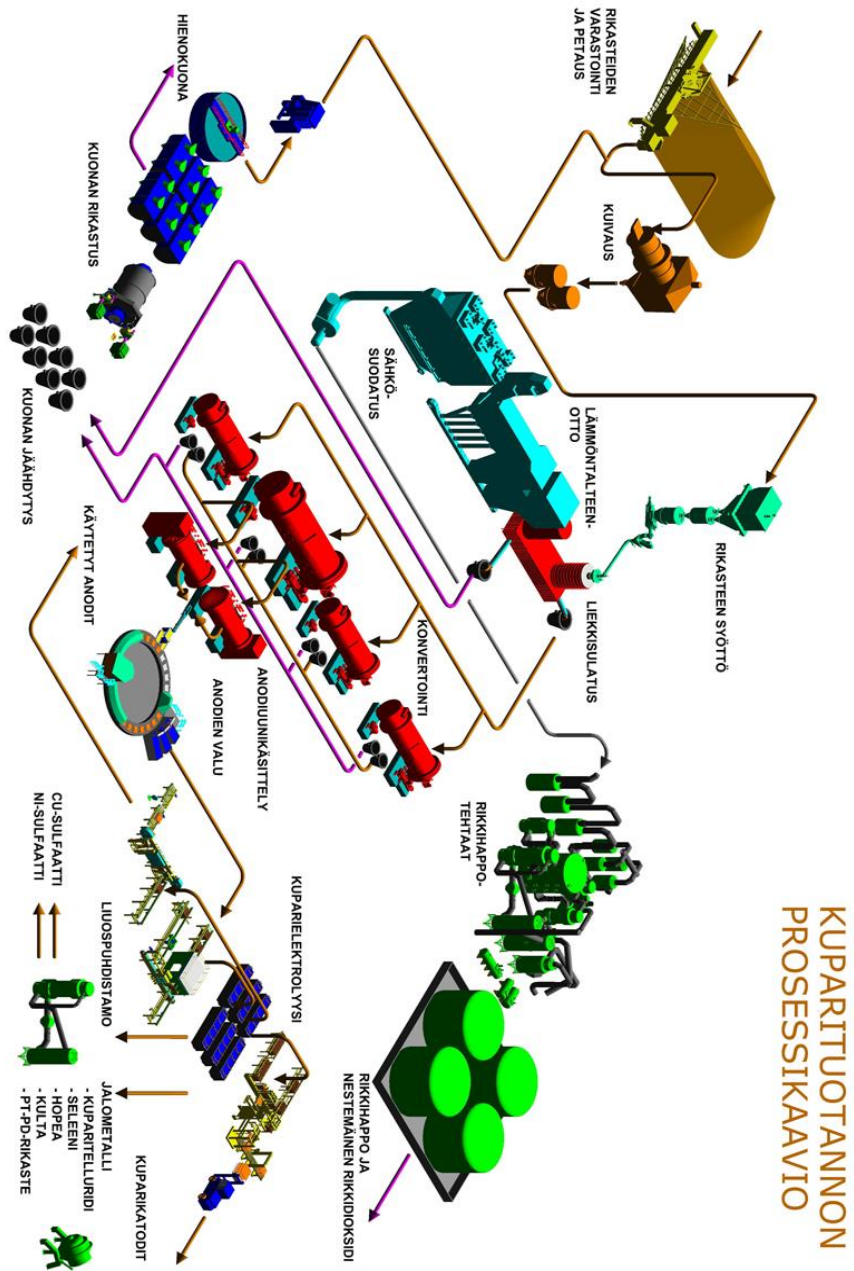
Kojovic T, Morrel S, Morrison R.D, Napier-Munn T.J, *Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimisation*, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Australia 1999.

Kotkansalo Arja, Parkkila Leena, Siimes Aslak & Rauhala Ville, *Kaivosbuumi – odotuksia, tavoitteita ja tutkimusta*, Lapin ammattikorkeakoulu, Rovaniemi 2016.

- Lukkarinen Toimi, *Mineraalitekniikka osa 2, Mineraalien rikastus*. 1. Painos. Insinööritieto Oy, Helsinki 1987.
- Metso Minerals, *Basics in mineral processing handbook*. Metso Corporation, Edition 11, 2018.
- Morrell S & Valery W, *Influence of feed size on AG/SAG mill performance*. Mining and Mineral Process Engineering University of British Columbia, Australia 2001
- Nageswararao K, Wiseman D.M & Napier-Munn T.J, *Two empirical hydrocyclone models revisited*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland. Australia 2004.
- Outokumpu, *Grinding fundamentals The Science of Comminution, Solutions maximizing grinding circuit productivity*. Outokumpu Técnica Perú SAC.
- Pasma Katja, *Lohkaremyllyn ajotavan kehittäminen*. Diplomityö, Oulun Yliopisto, Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto, Oulu 2010.
- Powell M.S, *The effect of liner design on the motion of the outer grinding elements in rotary mill*. Mintek, Council for Mineral Technology, South Africa 1990.
- Putland Brian, *An overview of single stage autogenous and semi autogenous grinding mills*. Orway Mineral Consultants, Australia 2005.
- Saghafian H, Shabestari S.G & Shaeri M.H, *Effects of Austempering and Martempering Processes on Amount of Retained Austenite in Cr-Mo Steels (FMU-226) Used in Mill Liner*, School of Metallurgy and Materials Engineering. Iran University of Science and Technology, Iran 2010.
- Taskinen Pekka & Vartiainen Asmo, *Tiedon liekki – Kuparin valmistus ilman energiaa*, Outotec Oyj 2010.
- Will's, B. & Napier-Munn. T. *Mineral Processing Technology*. Elsevier Ltd. 2006

## LIITTEET

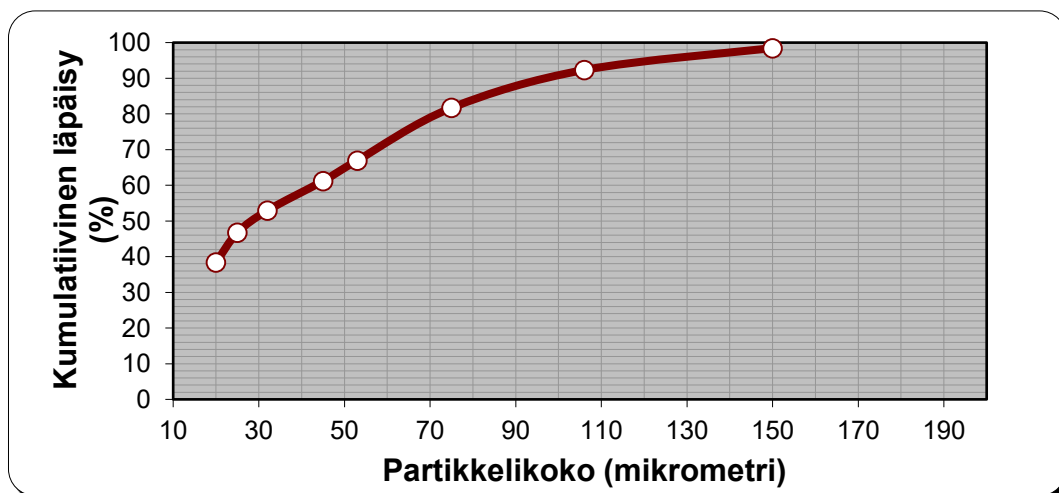
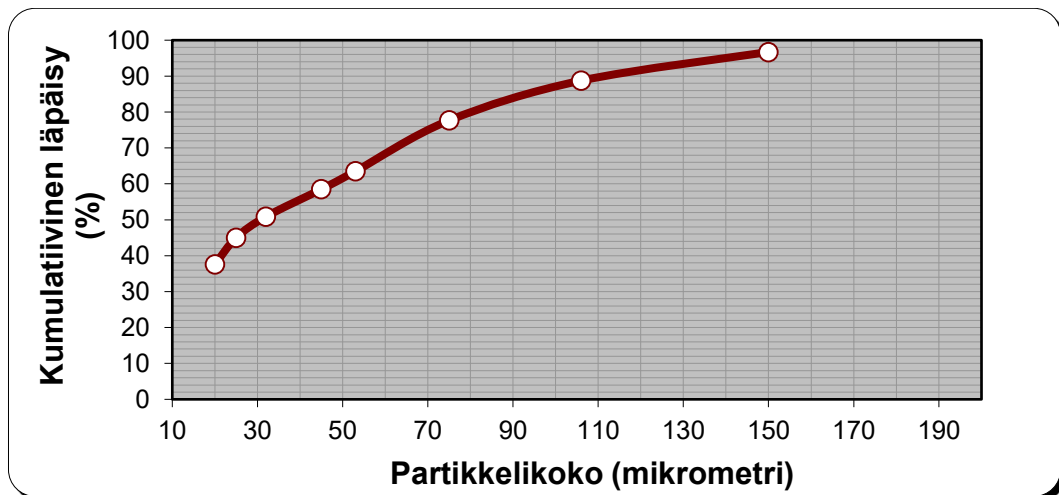
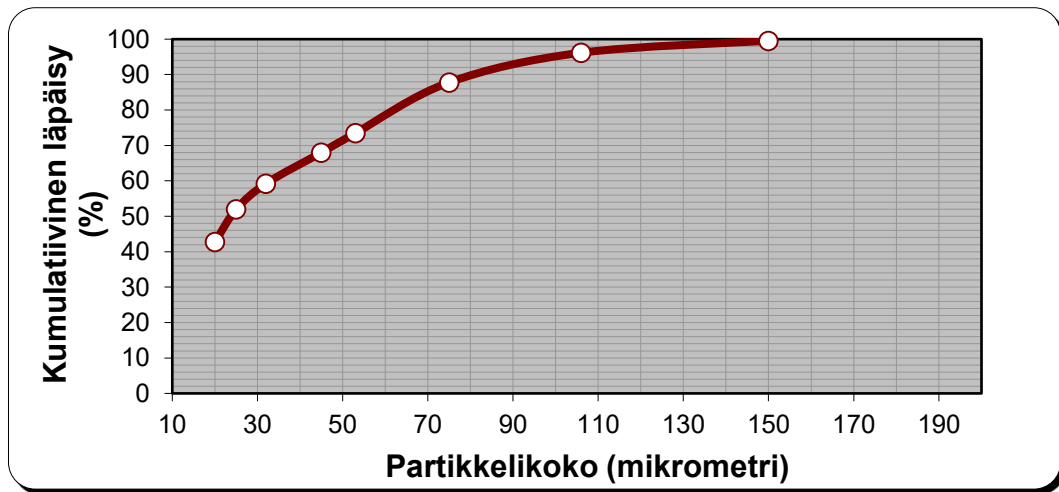
Liite 1. Kuparituotannon prosessikaavio



## Liite 2. LM1 Ensimmäisen koeajon partikkelikoot ja lietiheydet

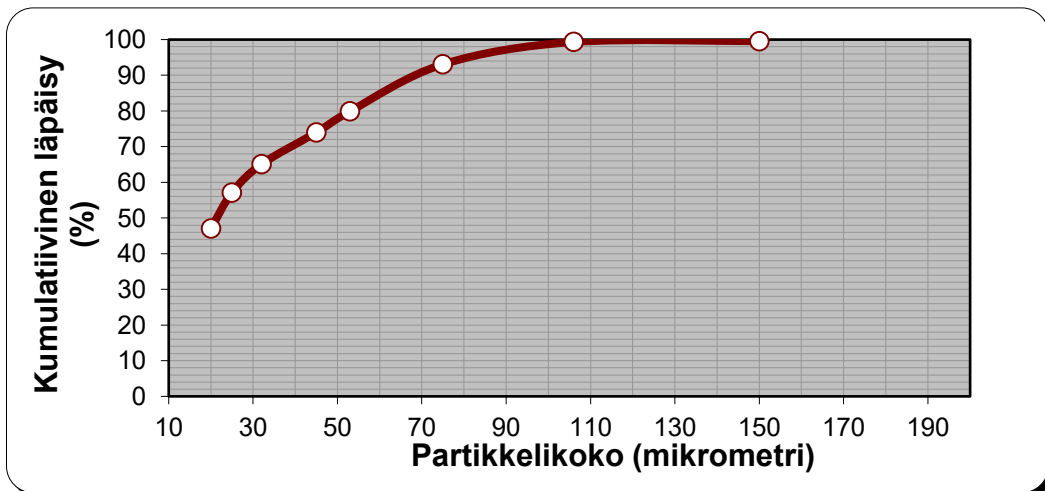
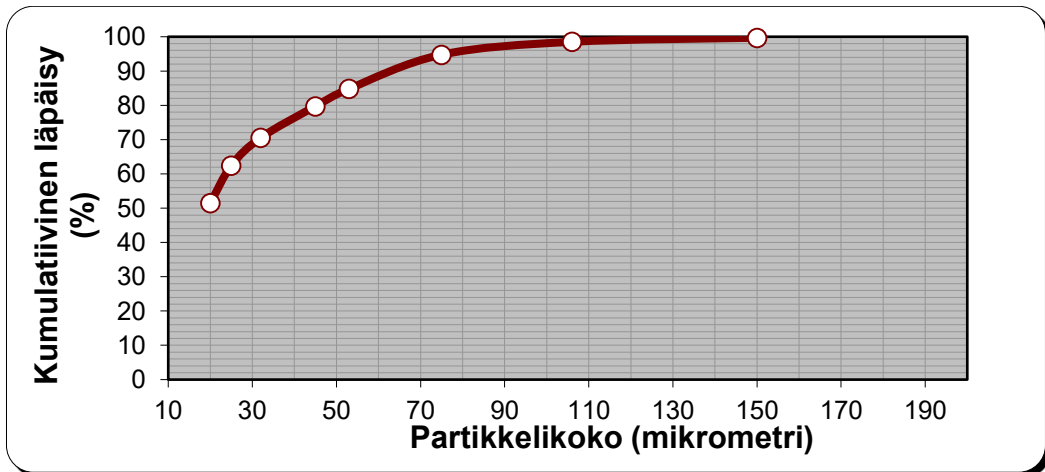
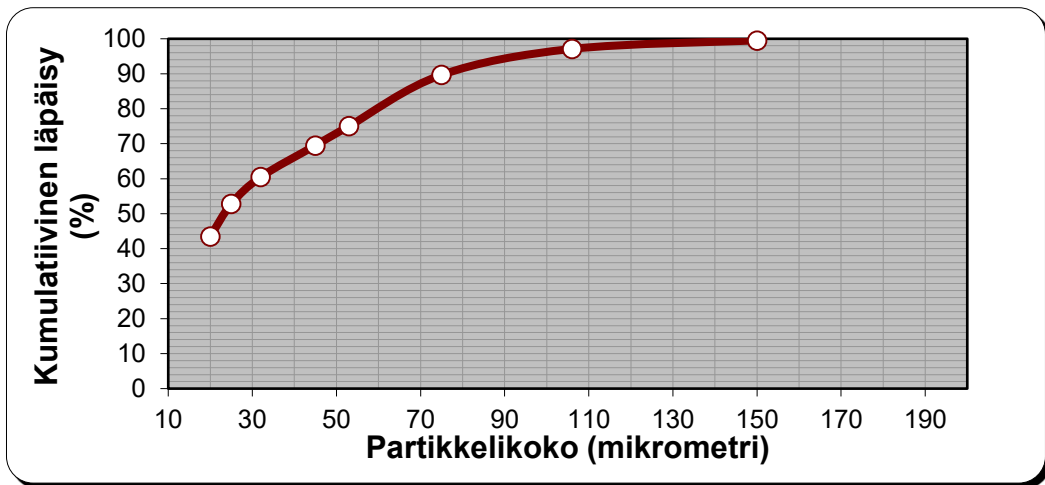
Näyte	Päivämäärä	Aika	Lieteti- heys (kiinto- aine %)	d80 (µm)	PSI- ana- lyysi 7 d80 (µm)
<b>Viikko 1 LM1 Alite</b>	lauantai 20. lokakuu 2018	00.00	80,1	241	
<b>Viikko 1 LM1 Ylite</b>	lauantai 20. lokakuu 2018	00.00	52,2	63	86
<b>Viikko 1 LM1 Alite</b>	maanantai 22. lokakuu 2018	08.00	82,0	287	
<b>Viikko 1 LM1 Ylite</b>	maanantai 22. lokakuu 2018	08.00	57,4	81	88
<b>Viikko 1 LM1 Alite</b>	keskiviikko 24. lokakuu 2018	15.00	80,9	272	
<b>Viikko 1 LM1 Ylite</b>	keskiviikko 24. lokakuu 2018	15.00	55,4	72	78
<b>Viikko 2 LM1 Alite</b>	lauantai 27. lokakuu 2018	00.00	68,0	190	
<b>Viikko 2 LM1 Ylite</b>	lauantai 27. lokakuu 2018	00.00	52,1	60	92
<b>Viikko 2 LM1 Alite</b>	maanantai 29. lokakuu 2018	08.00	59,0	124	
<b>Viikko 2 LM1 Ylite</b>	maanantai 29. lokakuu 2018	08.00	50,0	45	69
<b>Viikko 2 LM1 Alite</b>	keskiviikko 31. lokakuu 2018	15.00	79,9	852	
<b>Viikko 2 LM1 Ylite</b>	keskiviikko 31. lokakuu 2018	15.00	51,8	53	78

Liite 3. LM1 Ensimmäisen koeajoviikon ylitteen partikkelikokojakaumat





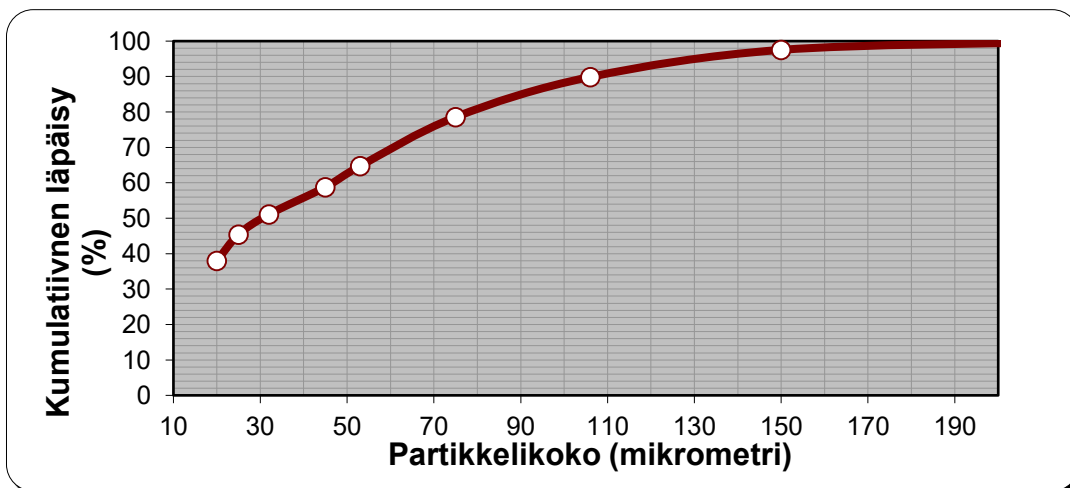
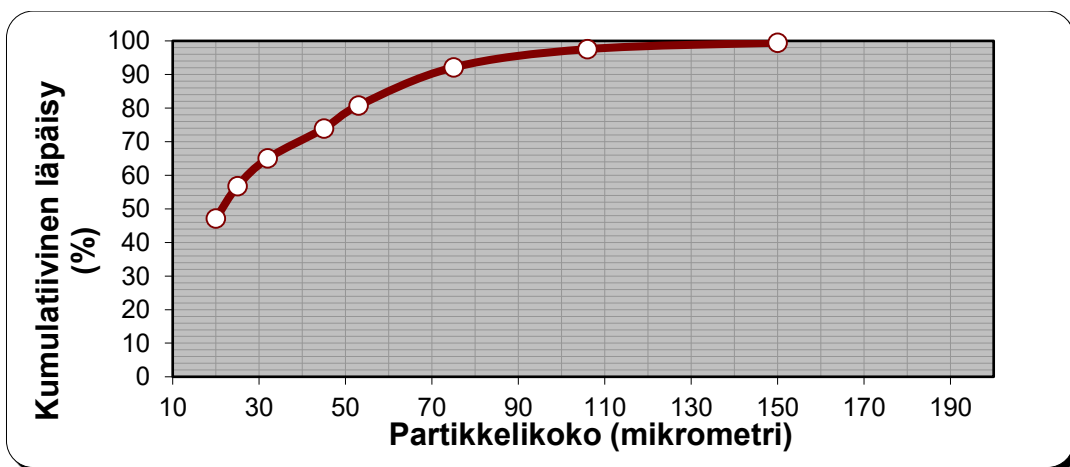
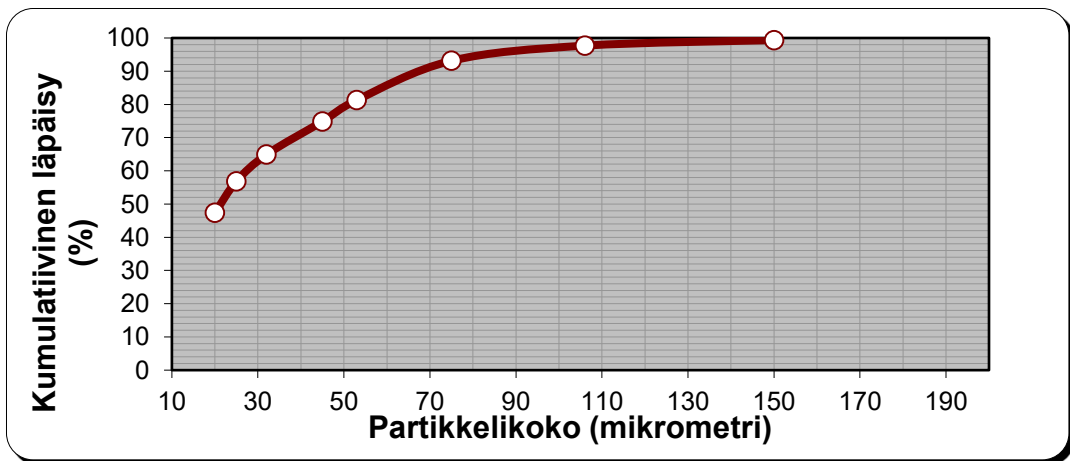
Liite 4. LM1 Toisen koeajoviikon ylitteen partikkelikokojakaumat



## Liite 5. LM1 Toisen koeajon partikkelikoot ja lietiheydet

Näyte	Päivämäärä	Aika	Lieteti- heys (kiinto- aine %)	d80 (µm)	PSI- ana- lyysi 7 d80 (µm)
<b>Viikko 3 LM1 Alite</b>	lauantai 2. helmikuu 2019	00.00	76,9	277	
<b>Viikko 3 LM1 Ylite</b>	lauantai 2. helmikuu 2019	00.00	51,6	51	78
<b>Viikko 3 LM1 Alite</b>	maanantai 4. helmikuu 2019	08.00	61,3	115	
<b>Viikko 3 LM1 Ylite</b>	maanantai 4. lokakuu 2019	08.00	54,4	52	72
<b>Viikko 3 LM1 Alite</b>	keskiviikko 6. helmikuu 2019	15.00	73,4	199	
<b>Viikko 3 LM1 Ylite</b>	keskiviikko 6. helmikuu 2019	15.00	60,3	79	98
<b>Viikko 4 LM1 Alite</b>	lauantai 9. helmikuu 2019	00.00	74,9	243	
<b>Viikko 4 LM1 Ylite</b>	lauantai 9. helmikuu 2019	00.00	55,4	66	91
<b>Viikko 4 LM1 Alite</b>	maanantai 11. helmikuu 2019	08.00	75,9	352	
<b>Viikko 4 LM1 Ylite</b>	maanantai 11. helmikuu 2019	08.00	66	103	78
<b>Viikko 4 LM1 Alite</b>	keskiviikko 13. helmikuu 2019	16.00	77,1	446	
<b>Viikko 4 LM1 Ylite</b>	keskiviikko 13. helmikuu 2019	16.00	56,1	67	99

Liite 6. LM1 Kolmannen koeajoviikon ylitteen partikkelikokojakaumat



Liite 7. LM1 Neljännen koeajoviikon ylitteen partikkelikokojakaumat

