



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

JAUHAUTUVUUDEN LABORATORIOMÄÄRITYS BOND- JA MERGAN - MENETELMÄLLÄ

TEKIJÄ: Arno Kirpala

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Arno Kirpala			
Työn nimi Jauhautuvuuden laboratoriomääritykset Bond- ja Mergan-menetelmällä			
Päiväys	19.4.2013	Sivumäärä/Liitteet	60/13
Ohjaaja(t) Merja Tolvanen, yliopettaja; Raimo Lehtiniemi, lehtori; Pekka Mörsky, erikoistutkija (GTK)			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Geologian tutkimuskeskus, mineraalitekniikka (Mintec) Outokumpu			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Jauhatus on kaivosteollisuuden suurin yksittäinen energiaa kuluttava osaprosessi n. 30–50 % osuudella kokonaisenergiankulutuksesta. Jauhauksen tavoitteena on jauhaa puhtaaksi ns. ”vapauttaa” arvomineraalit arvottomista mineraaleista rikastamista varten. Työn teoriaosuudessa selostetaan jauhustapahtumaan ja raekoon hienontumiseen vaikuttavia ilmiöitä sekä muuttujia, mitkä auttavat lukijaa ymmärtämään kokeissa käytettyjä ilmiöitä ja itse jauhustapahtumaa.</p> <p>Työn tarkoituksena oli tehdä Bond-jauhinmyllyjen ja abrasion index -testilaitteen käyttöönotto sekä tehdä vertailevaa tutkimusta verrattuna GTK:lla käytössä olevaan Mergan-jauhautuvuuden määritysmenetelmään. Kummallakin menetelmällä voidaan määrittää laboratorio-olosuhteissa Work Index (Wi), mikä kuvaa energian tarvetta jauhettaessa tietystä syötteen raekoosta haluttuun tuotteen raekokoon. Work Index -arvo on maailmalla yleisesti käytetty parametri jauhinpiirien suunnittelussa ja jauhinmyllyjen mitoittamisessa. Bond-menetelmällä saaduilla tuloksilla voidaan arvioida energian kulutusta tietyissä olosuhteissa tapahtuvaan jauhukseen ja poiketessa näistä olosuhteista tulee Bondin kolmannen hienonnusteorian yhteyteen lisätä tehokkuuskertoimia. Energiankulutuksen jälkeen toiseksi suurin taloudellinen kuluerä jauhatuksessa muodostuu metallisten jauhinkappaleiden ja myllyn vuorauksen kulumisesta. Abraasio index-testilaitteella määritetään malmien kuluttavuutta jauhatuksessa.</p> <p>Jauhautuvuuskokeet suoritettiin käyttämällä suurimmalta osin Suomessa toimivien kaivoksien malmeja. Osasta näytteistä GTK:n yhteistyökumppanit olivat tehneet jauhautuvuuskokeita Bondin menetelmällä ja GTK Mergan-menetelmällä, joten tuloksia pystyttiin vertaamaan edellä mainittujen kanssa ja pohtimaan niiden oikeellisuutta.</p> <p>Työn tuloksena saatiin GTK:lle toimiva Bond-jauhautuvuustutkimusmenetelmä sekä Bond Abraasio Index-menetelmä, joita GTK voi tarjota tulevaisuudessa asiakkailleen sekä hyödyntää GTK:lla tehtävissä malmien prosessitutkimuksissa.</p>			
<p>Avainsanat</p> <p>Abraasio index, energiankulutus, jauhatus, jauhautuvuus, mylly, raekokojakauma, Work Index</p>			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author(s) Arno Kirpala			
Title of Thesis Laboratory Grindability Tests by Bond and Mergan Methods			
Date	19 April 2013	Pages/Appendices	60/13
Supervisor(s) Ms Merja Tolvanen, Principal Lecturer and Mr Raimo Lehtiniemi, Lecturer			
Client Organisation /Partners Geological survey of Finland, Mineral Technology (Mintec): Mr Pekka Mörsky, Senior Scientist			
<p>Abstract</p> <p>Grinding is the final stage of mineral comminution and it is the most energy intensive unit process in mining industry with about a 30% to 50 % share of total energy consumption. The main purpose of grinding is to liberate value minerals from gangue minerals for the concentration process. The theoretical part of this thesis consists of grinding events and which variables influence grinding products.</p> <p>The purpose of this thesis was to determine experimentally Bond Work Index values (Wi) for different kind of ores and compare those results to Mergan grindability tests results. The Mergan method was designed by T. Niitti in 1970. The Work Index value indicates the resistance of material in grinding and it is expressed in kWh/t. The Work index is widely used in designing grinding systems in mineral processing. The Result from the Bond test indicates net energy consumption in a specific grinding event. Bond determined several efficiency factors for different types of grinding events which can be used with Bond's third comminution theory.</p> <p>The second biggest cost in the grinding process is metal wear. The Bond Abrasion Index test can be used to determine the Abrasion Index value (Ai) of the sample. The Bond Abrasion Index indicates metal wear of grinding media and liners and metal wear in crushing.</p> <p>The grindability test was carried out by using different kind of ores from Finland. Some of the samples had already been analysed by a cooperation partner by the Bond method or at Geological survey of Finland (GTK) by the Mergan method so it was possible to compare the results of this thesis to those.</p> <p>As a result of this thesis GTK has now a working Bond-grindability test method and Bond Abrasion Index test method which GTK can offer to their customers and use in the study of ore processing.</p>			
<p>Keywords</p> <p>Abrasion Index, energy consumption, grinding, grindability, mill, particle size distribution, Work Index</p>			

Kuopiossa 19.4.2013
Savonian opinnäytetyö

SISÄLTÖ

Lyhenteet	7
1 JOHDANTO	8
2 MINERAALITEKNIikka	9
2.1 Hienonnustekniikka	10
2.2 Rikastustekniikka	11
3 JAUHATUS	14
3.1 Yleistä jauhautuksesta	14
3.1.1 Jauhautuvuus	16
3.1.2 Raekoon hienontuminen jauhatuksessa	17
3.2 Energiankulutus jauhatusprosessissa	20
3.3 Jauhinlaitteiston kuluvat osat	23
4 BOND-LABORATORIOMÄÄRITYKSET	24
4.1 Work Index -määrittäminen	24
4.2 Myllyn mitoitus	26
4.3 Tehokkuuskertoimet	27
4.4 Testauslaitteistot	29
4.4.1 Bond-kuulamyly	29
4.4.2 Bond-kuulamylymenetelmä	31
4.4.3 Bond-tankomyly	33
4.4.4 Bond-tankomylymenetelmä	34
4.4.5 Bond abraasio index	35
4.4.6 Bond-abraasio index menetelmä	36
5 MERGAN-LABORATORIOMÄÄRITYS	37
6 JAUHAUTUVUUSKOKEIDEN SUORITUS	41
6.1 Laboratoriokokeet	41
6.2 Näytekäsittely	41
6.3 Tutkittavat näytteet ja tulokset	44
6.3.1 Pilot-näytteet	44

6.3.2	Nilsin kvartsinäyte	47
6.3.3	Pampalon kultamalminäyte	48
6.3.4	Suhanko	49
6.3.5	Kittilän kultamalminäyte	50
6.3.6	F-näyte	51
6.3.7	Kemin kromiittimalmi	52
7	LABORATORIOKOETULOKSET JA TULOSTEN KÄSITTELY	54
8	TARKASTELUA	58
	LÄHTEET	59

Liite 1: Bond-jauhautuvuuskoe, pilot-näyte

Liite 2: Bond-jauhautuvuuskoe, kvartsi

Liite 3: Bond-jauhautuvuuskoe, Pampalo

Liite 4: Bond-jauhautuvuuskoe, Suhanko

Liite 5: Bond-jauhautuvuuskoe, Kittilä

Liite 6: Bond-jauhautuvuuskoe, F-näyte

Liite 7: Bond-jauhautuvuuskoe, Kemi

Liite 8: Bond-Abraasiokoe, Kemi

Lyhenteet

Ai	Abraasio index
B	jauhinkappaleiden koko, (mm)
C	myllyvakiokerroin
C _s	myllyn nopeus kriittisestä, (%)
D	myllyn sisähalkaisija (m)
d ₈₀	materiaalin raekoko , jonka 80 % näytteen rakeista läpäisee
G _{bp}	nettotuotteen määrä grammoina kierrosta kohden kuulamyllyllä
G _{rp}	nettotuotteen määrä grammoina kierrosta kohden tankomyllyllä
E	energiankulutus kWh/t
EF	tehokkuuskerroin
F	näytteen kuivapaino (t)
F ₈₀	syötteen raekoko, jonka 80 % näytteen rakeista läpäisee
F ₀	optimaallinen syötteen raekoko = $Zf(13/RWi)^{0.5}$
H	korkeus (m)
IPP	ideaalinen jauhatusjaksoa kohden saatu tuotemäärä
K	jauhatuksesta riippuva kerroin, välillä 335-350
kW	teho, kilowatti
kWh	energiayksikkö, kilowattitunti
L	myllyn pituus, (m)
lb	pauna
Mesh	seulan aukkojen lukumäärä tuumaa kohden
M _p	akselin ottama teho (kW)
n _{kr}	kriittinen kierrosluku
P ₈₀	tuotteen raekoko , jonka 80 % näytteen rakeista läpäisee
P _b	jauhinkappaleiden ominaispaino, (t/m ³)
Pi	katkaisu seulan koko (μm)
R _r	hienonnussuhde, (F ₈₀ / P ₈₀)
RWi	Work Index tankomylly (kWh/t)
S	jauhattavan materiaalin ominaispaino (t/m ³)
U	energiayksikkölaskurin lukema
W	nettoenergia (kWh/t)
Wi	Work index (kWh/t)
Wi ₇₄	energian kulutusta uutta -74μm tuotetta kohden kilowattitunteina tonnia kohden
Xf = F ₈₀	= syötteen 80 % läpäisyä vastaava raekoko
Xp = P ₈₀	= tuotteen 80 % läpäisyä vastaava raekoko
Zf	vakio, tankomylly = 16000 ja kuulamylly = 4000

1 JOHDANTO

Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) Outokummun mineraalitekniikan (Mintec) yksikössä on suoritettu malmien jauhautuvuuskokeita käyttämällä edesmenneen laitekehittäjä Timo Niitin Outokumpu-yhtiölle vuonna 1970 kehittämää Mergan-menetelmää. Menetelmällä on tutkittu menestyksekkäästi suomalaisia sekä ulkomaalaisia malmeja ja saadut tulokset ovat olleet vertailtavissa tehdasmittakaavan jauhinyllyjen energiankulutuksen kanssa. Ongelma Mergan-menetelmässä on sen vähäinen tunnettavuus GTK:n ulkomaalaisten yhteistyökumppaneiden ja asiakkaiden keskuudessa. Mergan-menetelmällä, kuten tässä työssä myös käsiteltävällä Bondin menetelmälläkin, voidaan määrittää ns. Work Index, joka kuvaa hienonnettavan materiaalin hienontamiseen tarvittavaa energiamäärää.

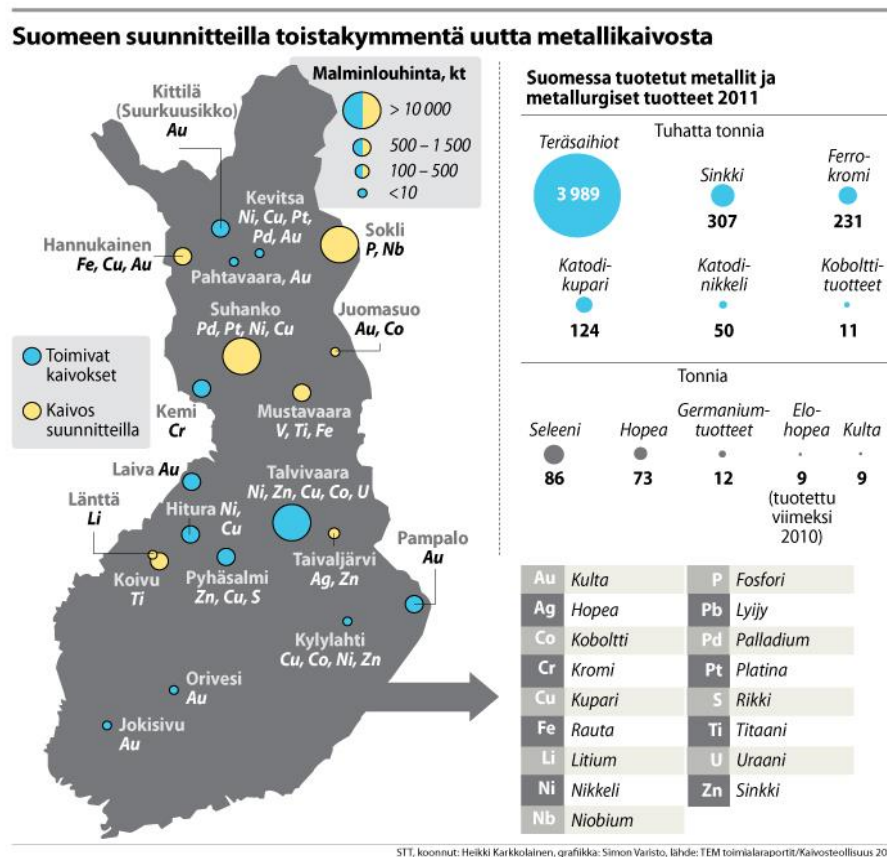
Energiankulutus malmien hienonnuksessa sekä malmien hienontumisominaisuudet ovat olleet tutkijoiden ja insinöörien tutkittavana jo monia vuosikymmeniä. Haasteita ovat aiheuttaneet mm. hienontumisen mekanismit, hienonnettavien materiaalien kyky vastustaa hienontumista sekä energiankulutus suhteessa partikkeleiden jakautumaan. Fred C. Bondin kehittämä menetelmä on ehkä yleisimmin käytetty määrittämisparametri malmien jauhautuvuusominaisuuksia määritettäessä. Menetelmä on laajasti käytössä maailmalla ja sitä käytetäänkin kaivoksia suunniteltaessa sekä hienonnuksiensa optimoitaessa jo toimivilla kaivoksilla.

Työn tavoitteena on tehdä jauhautuvuuskokeita käyttämällä Bondin menetelmää sekä Mergan-menetelmää ja tutkia näistä saatuja tuloksia. Työssä tehdään kokeita myös Bondin abraasio indeksi testauslaitteistolla. Työn tavoitteena on, että GTK pystyy jatkossa tarjoamaan Bond- jauhautuvuusmäärittämiä asiakkailleen. Tutkimusmateriaalina on GTK:n koetehtaalla aikaisemmin suoritettussa pilot-ajossa käytettyä malmia sekä muita erityyppisiä malmeja. GTK:n mineraalitekniikan yksikössä tehdään monipuolista mineraalitekniikan tutkimustyötä, joten työni alkuosiossa esittellään lyhyesti mineraalitekniikan pääprosessit.

2 MINERAALITEKNIikka

Mineraalitekniikka alana käsittää louhituissa malmissa olevien arvomineraalien jalostamisen mahdollisimman korkeapitoisiksi ja -laatuiseksi rikasteiksi jatkojalostusta varten. Mineraalitekniikka voidaan jakaa kahteen suurempaan prosessikokonaisuuteen: hienonnustekniikka käsittää malmissa olevien arvomineraalien erottamisen sivukivestä mekaanisesti murskaamalla ja jauhamalla, kun taas rikastustekniikassa erotetut mineraalirakeet erotellaan omiksi jakeikseen hyödyntämällä mineraalien kemiallis-fysikaalis-ominaisuuksia. (Lukkarinen 1984,2.)

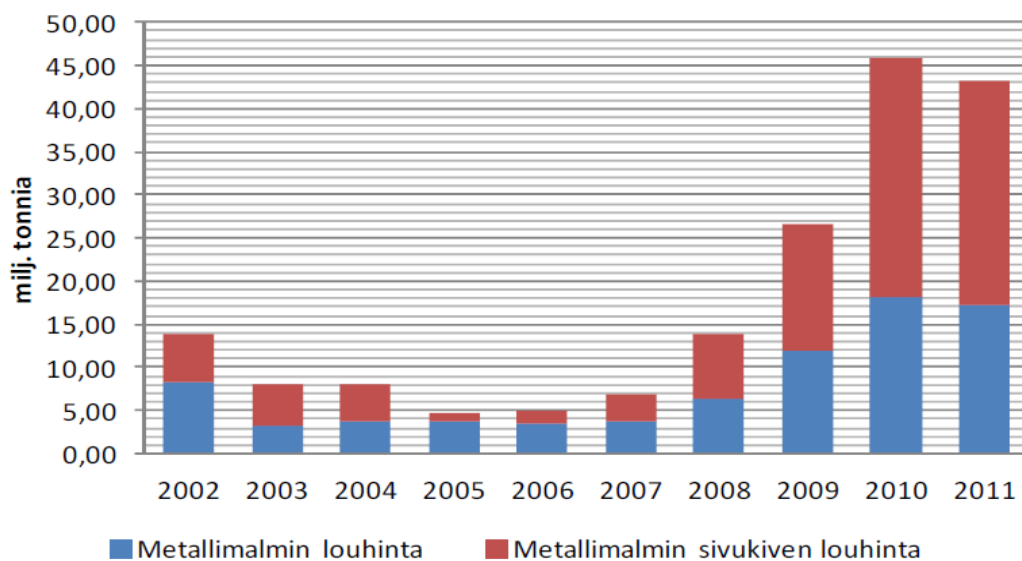
Mineraalit ovat tavallisesti kiteisessä muodossa olevia alkuaineista koostuvia yhdisteitä. Luonnollista kallioperässä esiintyvää metallien rikastumaa kutsutaan mineralisaatioksi. Teknillis-taloudellisesti hyödynnettävää mineralisaatiota kutsutaan malmiksi. Malmin hyödynnettävyyteen taloudellisesti ja teknisesti vaikuttavat monet seikat aina mineraalien ominaisuuksista ja metallimarkkinahinnoista kaivannaisteollisuuden lupa-asioihin. (Suomen mineraalistrategia.)



Kuvio 1 Kaivosteollisuuden keskittymät ja projektit 2011 (Karkkolainen STT, 2012)

Mineraalitekhnisten menetelmien kehityksen ansiosta entistä matalapitoisemmista esiintymistä saadaan eroteltua arvomineraalit sivukivestä taloudellisesti kannavasti. Suomessa toimi vuonna 2011 n. 40 metallimalmi- ja teollisuusmineraalikaivosta, joita on esitetty kuviossa 1. Kaivokset työllistivät n. 4 500 henkilöä ja kaivosyhtiöiden liikevaihto oli yhteensä n. 1,48 miljardia euroa. (Mörsky 2012, GTK.) Kuviossa 2 on esitetty metallimalmien louhinnan kehitys vuosittain.

Metallimalmin louhinta



Kuvio 2 Metallimalmien louhinta Suomessa vuosina 2002-2011 (TEM 2012)

2.1 Hienonnustekniikka

Yksi malmin hienontamisen tärkeimmistä tavoitteista on saada arvomineraalit erotettua sivukivestä karkeimmassa mahdollisessa raekoossa, jolloin vältetään turhalta työltä ja energiankulutukselta. Tarvittavaan hienonnusasteeseen vaikuttaa malmissa olevien mineraalien ominaisuuksista, kuten raekoosta, esiintymistavasta ja suhteellisesta määrästä. (Hukki 1963.)

Puhtaaksijauhatusta ”liberation” saavutetaan saavutetaan vaiheittain alkaen louhitun malmin murskauksesta jauhatukseen tai muuhun käyttötarkoitukseen sopivaan raekokoon. Murskaimet muodostavat yleensä seulojen kanssa joko avoimen tai suljetun piirin. Suljetussa piirissä seulan ylite eli tavoiteltavaan raekokoon hienontumaton aines palautetaan takaisin murskaimeen ja alite kuljetetaan seuraavaan vaiheeseen. Jauhatusta on

hienonnusketjun viimeinen vaihe. Materiaalin hienousaste viimeistellään vastaamaan rikastusprosessin vaatimuksia tai muuta käyttötarkoitusta varten. Jauhinmylly muodostaa yleensä luokittimen kanssa suljetun piirin raekoon säätämiseksi. Nykyisin yleisin luokitusmenetelmä on keskipakovoimaan perustuva hydrosykloni. Materiaaliliete syötetään syklonin kyljestä, jolloin liete alkaa kiertämään syklonin seinämällä. Karkeammat jakeet vajoavat syklonin pohjalle, mistä materiaali palautetaan takaisin jauhatukseen. Hienompi materiaali nousee ylös ja jatkaa matkaa jatkokäsittelyyn. Hienonnuksen osaprosessien raekokojakaumat on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1 Hienonnuksen osaprosessien raekokojakaumat (Pihkala 2011, 17)

Louhinta	Ääretön alkukoko → alle 1 m
Karkeamurskaus	1 m → alle 100 mm
Hienomurskaus	100 mm → alle 10 mm
Karkeajauhatus	10 mm → alle 1 mm
Hienojauhatus	1 mm → alle 100 µm
Hyvin hienojauhatus	100 µm → alle 10 µm
Erittäin hienojauhatus	10 µm → alle 1 µm

2.2 Rikastustekniikka

Riittävään puhtausasteeseen hienonnetut arvomineraalit erotetaan arvottomista omiksi jakeikseen. Rikastusprosessit koostuvat yhdestä tai useammasta osaprosessista, jotka kehitetään malmikohtaisesti johtuen niiden, erityyppisistä ominaisuuksista. Rikastusmenetelmät voidaan jaotella sen mukaan, minkälaisella tekniikalla mineraalien erottelu toteutetaan. Yleisimpiä metallimalmikaivoksilla käytettyjä rikastusmenetelmiä ovat (Hukki 1964, 19.):

- vaahdotus
- ominaispainorikastus
- magneettinen rikastus
- liuotusmenetelmät.

Taulukko 2 Rikastusmenetelmiä ja tuotteita Suomessa.

(Kauppila,Räisänen,Myllyoja 2011,26)

Kaivos	Rikastusmenetelmä	Tuotteet	Kok.saanti %
Kemi	Ominaispainoerotus	Kromirikasteet (Cr_2O_3) Palarikaste (36% Cr_2O_3) Hienorikaste (44,2% Cr_2O_3)	75
Kittilä	Vaahdotus, painehapetus, CN-liuotus ja elektrolyysi	Au metalliharkot (Au 92 - 95 %)	84-88
Pyhäsalmi	Vaahdotus	Cu-rikaste (29% Cu) Zn-rikaste (54% Zn) S -rikaste (52% S)	95-96 92-93 n. 50
Talvivaara	Bakteeriliuotus ja metallien saostus kemiallisesti	NiS (sakka) ZnS (sakka)	n. 80
Sastamala	Ominaispainoerotus ja vaahdotus	Au-rikaste/vaahdotus (150 - 200 g/t Au) Au-rikaste/tärypöytä (n. 80% Au)	80-85
Lahnaslampi	Vaahdotus	Talkki Ni-rikaste (8% Ni)	58

Rikastusmenetelmät

Vaahdotus

Vaahdotus on yleisin metallimalmien ja teollisuusmineraalien rikastusmenetelmä. Vaahdotuksessa vaikutetaan mineraalien pinta-aktiivisuuteen. Halutut mineraalit muutetaan sopivalla lisäaineella hydrofobisiksi eli vettä hylkivään muotoon, jolloin ne adsorboituvat vaahdotuskennon pohjasta syötettäviin ilmakupliin ja nousevat pintaan, mistä vaahto kerätään talteen. Rakeet, jotka eivät tartu ilmakupliin laskeutuvat kennon pohjalle, mistä jätejäte kerätään pois. Vaahdotuksesta käytettäviä reagensseja:

- vaahdote
- painaja
- kokooja
- aktivaattorit.

Edellä mainittujen lisäksi vaahdotuksessa säädetään mm. pH-arvoa ja eH-arvoa esim. hapoilla ja muilla pH-arvoon vaikuttavilla reagensseilla.

Ominaispainoerotus

Painovoimarikastuksessa hyödynnetään mineraalien ominaispainoeroja. Menetelmää käytetään raskaiden ja kohtalaisen suurikokoisten mineraalien erottamiseen sivukivestä. Eri painovoimaerotteluun käytettäviä menetelmiä:

- hytkytin
- spiraali
- tärypöytä
- keskipakoerottimet
- raskasväliaine-erotus.

Magneettierotus

Perustuu mineraalien erilaisiin magneettisiin ominaisuuksiin. Magneettierotusta käytetään yleisimmin rauta- ja kromimalmien rikastuksessa. Magneettierottimia voidaan käyttää myös varsinaista prosessia haittaavien magneettisten ainesten poistoon.

Liuotusmenetelmät

- Bioliuotus perustuu tiettyjen bakteerien luontaiseen ominaisuuteen liuottaa metalleja. Rikastusprosessissa bakteerien elinolosuhteita parannetaan sekä malmin pinta-alaa kasvatetaan murskaamalla ja tarvittaessa jauhamalla, jolloin bakteerit toimivat tehokkaammin.
- Syanidiliuotusta käytetään kultamalmin liuottamiseen. Liuottamisessa käytetään joko kaliumsyanidia (KCN) tai natriumsyanidia (NaCN). Syanidiliuotusta käytettäessä kultarakeet ovat yleensä pieniä, tästä johtuen malmi on jauhattava suhteellisen hienoon raekokoon. (Mörsky 2012.)

3 JAUHATUS

3.1 Yleistä jauhautuksesta

Jauhatuspiirit ovat suuri taloudellinen, mutta hyvin usein välttämätön sijoitus kaivosyhtiöille. Kustannuksia syntyy mm. laitteiston hankintakustannuksista, myllyjen pyörittämiseen tarvittavasta energiantarpeesta sekä laitteiston huoltokustannuksista. Jauhatus on hienonnustekniikan viimeinen vaihe, missä materiaali hienonnetaan raekokoon, jolloin arvomineraalit esiintyvät riittävän puhtaina rakeina rikastuksen kannalta. Tärkeimmät myllyn toimintaan ja kapasiteettiin vaikuttavat tekijät ovat mm. myllyn koko, rakenne, täyttöaste, pyörimisnopeus, väliaine, lisäaineet, materiaalin ominaispaino ja jauhautuvuus. (Lukkarinen 1985, 176.)

Yleisimmin käytetyt jauhinyllyt ovat vaakatasossa olevia, oman akselinsa ympäri pyöriviä rumpumaisia myllyjä. Myllyt sisältävät vuorauksen, joka suojaa sisäpintaa kulumiselta sekä estää jauhinkappaleiden luisumista myllyn pyöriessä. Jauhinkappaleet nousevat pyörinnästä johtuen myllyn seinämää pitkin ja putoavat alas. Jauhinkappaleiden nousemiseen vaikuttavat pyörimisnopeus sekä vuoraustyyppi.

Jauhinmyllyissä materiaalia jauhavina kappaleina voidaan käyttää erilaisia jauhinkappaleita, esim. rautaisia kuulia ja tankoja. Kuulamylyä käytetään hienojauhatusessa ja tankomylyä karkeamman materiaalin hienontamiseen. Tänä päivänä arviolta n. 85 % maailman jauhatusprosesseista ovat semiautogeenisia (SAG). (Mörsky 2013.) Malmin jauhamiseen käytetään tällöin suurten kuulien lisäksi saman malmin suurempia murskelohkareita. Käytettäessä pelkästään suurempia murskelohkareita puhutaan autogeenisestä jauhuksesta (AG). Autogeenisten jauhatusmenetelmien hyötyinä voidaan pitää mm. halvempia investointikustannuksia, syötteen laajaa raekokojakaumaa ja metallisten jauhinkappaleiden kulumisen pienenemistä. Toisaalta autogeeniset menetelmät ovat arempia malmin ominaisuuksien vaihteluille kuin metallijauhinkappaleilla jauhettaessa. Karkeajauhatusessa syötteen raekoko vaihtelee välillä 5–250 mm, lopputuotteen ollessa 40–300 µm. (Will's 2006, 146.)

Jauhatustehokkuuden parantamiseksi myllyyn tulevan syötteen raekokojakaumaa säädellään murskaimen kanssa toimivan seulan avulla sekä myllyn kanssa avoimessa tai suljetussa piirissä toimivan luokittimen avulla poistamaan jo hienonnustavoitteen saavuttanut materiaali. Myllyyn takaisin palautettavan materiaalin määrää kutsutaan kiertäväksi kuormaksi, joka ilmaistaan prosentteina suhteessa hienonnusasteen saavuttaneesta materiaalista. Jauhatuspiiriin voidaan liittää rikastusprosesseja, jotka soveltuvat karkeamman materiaalin rikastukseen, kuten ominaispainoerottimia, karkeavaahdotuskoneita tai magneettierottimia. (Kauppila, Räisänen, Myllyoja 2011, 24.)

Jauhaminen voidaan suorittaa joko kuivana tai märkänä. Kuula ja –tankomyllyillä tehokkain jauhautuminen tapahtuu n. 65–80 %:n kiintoainepitoisuudessa. Materiaalien hienotessa lietteen viskositeetti nousee, jolloin kiintoaineksien määrää tulisi vähentää lietteessä. (Will's 2006, 160.) Märkäjauhatuksen energiankulutus on yleisen käsityksen mukaan n. 20 % kuivajauhatusta alhaisempi. (Hukki 1962, 211.) Taulukossa 3 on esitetty vuonna 2011 kaivoksilla käytössä olleita jauhatuspiirejä.

Taulukko 3 Jauhatusmenetelmiä Suomessa toimivilla metallimalmikaivoksilla.
(Kauppila, Räisänen ja Myllyoja 2011, 25.)

Kaivos /tuotantolaitos	Jauhatuspiiri
Kemin Kaivos	1. vaihe: tankomylly avoimessa piirissä
	2. vaihe: kuulamylly suljetussa piirissä luokittimina toimivien Derrick -
Kittilän Kaivos	1- vaiheinen jauhatus SAG -myllyllä, joka on kytketty suljettuun piiriin
Pyhäsalmen kaivos	1. vaihe: lohkaromylly (SAG) lohkat + kuulat (100mm)
	2. vaihe: 3 palomyllyä (AG), tarvittaessa kuulia (60 mm)
	3. vaihe: kuulamylly (kuulat 30 mm)
	2. ja 3. vaihe suljetussa piirissä sykloniluokittimien kanssa
	Jauhatushienous: 65% < 0.074 mm
Talvivaara	Varsinaista jauhatusvaihetta ei ole, malmi menee murskauksen ja seulonnan
Sastamalan rikastamo	1. vaihe: tankomylly
	2. vaihe: kuulamylly (kuulat 40 mm) suljetussa piirissä syklonin kanssa
	käsittelyyn (Raichertin kartio, spiraaliluokittimet sekä kaksi tärypöytää)
	Vaahdotuksen syötteen jauhatushienous: 75 % < 0.074 mm
Sotkamon kaivos	Yksivaiheinen kuulajauhatus suljettuna sykloniluokittimien kanssa

3.1.1 Jauhautuvuus

Jauhautuvuudella tarkoitetaan mineraalipartikkeleiden ominaista kykyä vastustaa hienontumista. Tärkeimmät jauhautuvuuteen vaikuttavat tekijät ovat materiaalin rakenne ja murtumislujuus, lisäksi muita vaikuttavia tekijöitä ovat mm:

- kovuus
- kosteus
- hygroskooppisuus
- flokkautuminen
- agglomeroituminen
- alttius lämpötilan muutoksille.

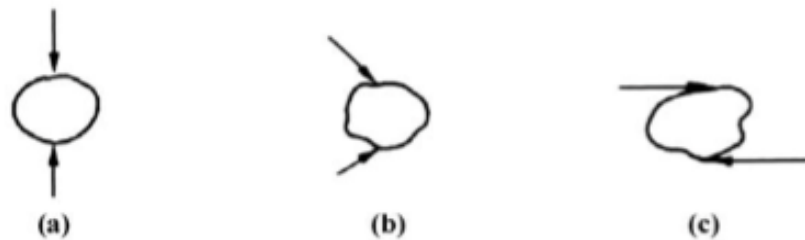
Hienonnettavan materiaalin sisältämät erityyppiset mineraalirakeet omaavat ominaisen niihin kohdistuvan voimantarpeen hienontuakseen. Voima, joka kohdistuu jauhinkappaleista mineraalipartikkeleihin on oltava riittävän suuri voittamaan partikkeleiden sisäiset, koossapitävät voimat (Timonen 2010.) Mineraalit ovat koostumukseltaan ja rakenteeltaan erilaisia sekä niiden määrät vaihtelevat malmissa. Esimerkiksi sekarakeen hajotessa helposti sisällä sijaitsevat partikkelit voivat olla ominaisuuksiltaan heikosti hienontuvia. (Wills 2007, 111.)

Mineraalisten materiaalien jauhautuvuustehokkuus heikkenee hienonnusasteen käytyä hienommaksi johtuen mm. partikkeleiden epäjatkuvuus -ja epähomogeenisuuskohtien ja mineraalien rajapintojen vähentyessä. Materiaalin hienonnusasteen käytyä hienommaksi, kyseiset rajapinnat ja epäjatkuvuuskodat vähenevät ja materiaalin ominaisuudet muuttuvat lujemmaksi hienonnuksen kannalta. (Lukkarinen 1984, 73). Rehbinder osoitti vuonna 1931, että käytettäessä jauhatuksessa lisäainetta, jolla on taipumus adsorpoitua materiaalin pinnalle, lisää se materiaalin pinnan naarmuuntuvuutta. Tällöin materiaalin pintakovuus saattoi heikentyä jopa 70 %. (Hukki 1964, 211.)

Yleisin malmien jauhautuvuuden määrittäysparametri on Bondin (1951) Work Index. Materiaalin hienontumisominaisuuksien pysyessä samana kaikilla raekokoalueilla voidaan Work index -arvon odottaa pysyvän tasaisena materiaalia jauhettaessa hienommaksi. Kuitenkin yleisimmin hienonnettavien materiaalien luontaiset ominaisuudet vaihtelevat raekoon osalta joka voi aiheuttaa Work Index -arvon nopeankin nousun. (Will's 2006, 111.)

3.1.2 Raekoon hienontuminen jauhatuksessa

Jauhettavat materiaalit voidaan karkeasti jakaa kahteen kategoriaan. Muokkautuvat ovat pehmeitä ja taipuisia ja hienontuessaan jakautuvat kahteen osaan. Kovat materiaalit puolestaan hajottuun jakautuvat hallitsemattomasti moniksi erikokoisiksi partikkeleiksi. Malmien käyttäytyessä kuten kovat materiaalit tuo se ongelmia syntyneiden jauhatustuotteiden raekokojakauman hallinnan kanssa. (Schlantz 1987, 3.) Materiaalin hienontuminen myllyssä yhdessä myllyn seinämien kanssa tapahtuu jauhinkappaleiden iskusta, hankautumisesta ja hiertymisestä hienonnettavaan materiaaliin (kuva 1).



Kuva 1 Hienoutuvuuden mekanismit (a) isku, (b) lohkeaminen ja (c) hiertyminen (Will's 2006, 147)

Myllyn pyöriessä lähellä kriittistä nopeutta (n_{kr}) vallitseva ilmiö on jauhinkappaleiden iskusta aiheutuva hienontuminen, koska jauhinkappaleet nousevat korkeammalle myllyn seinämällä, jolloin myös putoavat korkeammalta myllyn pohjalle aiheuttaen suuremman iskuvoiman. Myllyn kierrosnopeuden laskiessa jauhinkappaleiden nouseminen myllyn seinällä heikentyy ja jauhautuminen tapahtuu enenevässä määrin hiertymällä. (Weiss, 1985, 3C-5.) Karkeajauhatusta vaatii enemmän iskujauhatusta sekä suurempia jauhinkappaleita. Raekoon hienontuessa käytetään pienempiä jauhinkappaleita sekä jauhautuminen vaatii puolestaan hiertoa. (Lukkarinen 1985, 182.) Jauhinkappalepopulaatiolla on suuri vaikutus materiaalin hienoutumisen kannalta. Suuremmat kappaleet hienontavat karkeampaa materiaalia hienommaksi, jota pienemmät kappaleet edelleen hienontavat pienempään raekokoon. Bond (1958) määrittäi jauhamiseen tarvittavan jauhinkappalekoon:

$$B = 25,4 \sqrt{\frac{F}{K}} \sqrt[3]{\frac{SW_i}{100C_s \sqrt{3,281D_m}}} \quad (1)$$

B = jauhinkappaleiden koko, (mm)

F = syötteen d_{80} , (μm)

W_i = syötteen hienoutta F vastaava work index, (kWh / t)

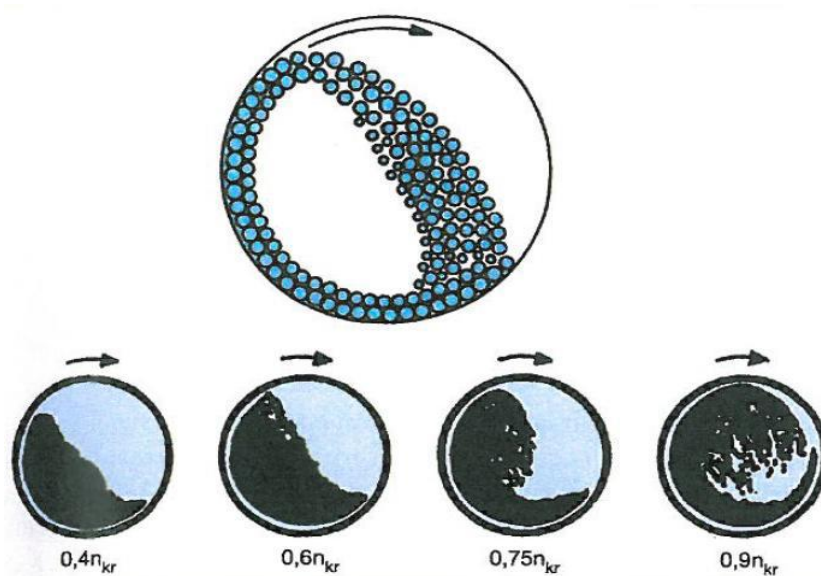
C_s = myllyn nopeus kriittisestä, (%)

S = jauhettavan materiaalin ominaispaino (g/l)

D = myllyn sisähalkaisija, (m)

K = jauhatuksesta riippuva kerroin, välillä 335-350

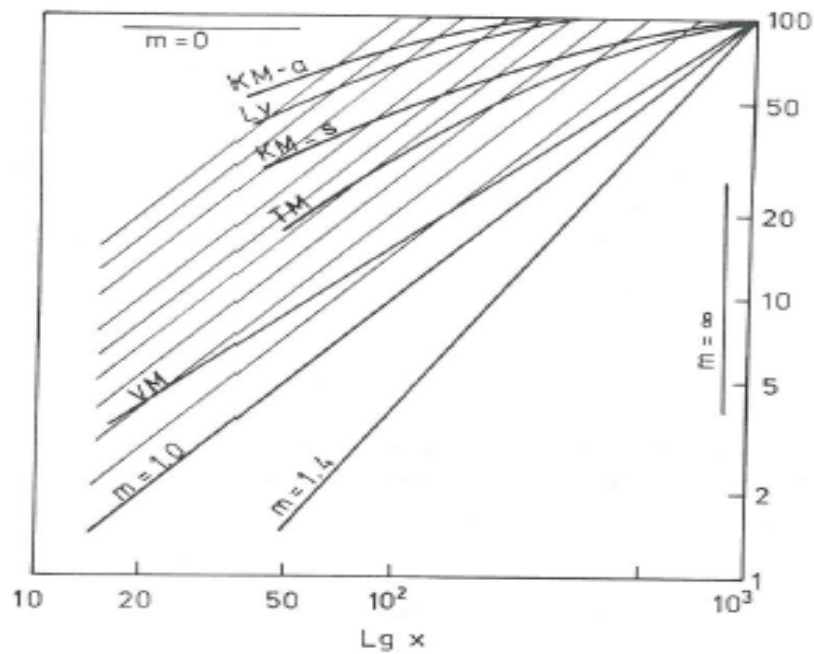
Kriittisellä kierrosnopeudella n_{kr} tarkoitetaan tilaa, jossa jauhinkappaleisiin vaikuttava keskipakoisvoima on juuri sen verran suurempi kuin painovoima, että jauhinkappaleet eivät enää irtaudu myllyn seinämiltä myllyn pyöriessä tasaisella kierrosnopeudella. Kuvassa 2 on esitetty jauhinkuorman käyttäytymistä myllyssä myllyn pyöriessä eri nopeuksilla kriittisestä kierrosnopeudesta.



Kuva 2 Jauhinkuorman ja materiaalin mallinnus eri kierrosluvuilla kriittisestä. (Pihkala 2011, 24)

Myllyyn syötettävä ja jauhettu tuote eivät koskaan sisällä pelkästään yhtä raekokoa vaan käsittävät koko jakauman hienoimmasta suurimpaan partikkeliin. Suunniteltaessa jauhatusprosessia haluttu saavutettava raekoko on tiedettävä etukäteen, mikä yleensä määräytyy rikastusmenetelmästä tai muusta käyttötarkoituksesta. Optimaalisen raekoon saavuttaminen on tärkeää monesta syystä, mutta tärkeimpiä on puhtaaksijauhaa eli vapauttaa "liberation" malmin mineraalirakeet toisistaan. Huonosti jauhautuneen malmin mineraalirakeet eivät vapaudu, mikä heikentää rikasteiden pitoisuuksia ja saantia ainakin vaahdotuksen osalta. (Schlantz 1987, 2.) Mineraalirakeet sisältävät joko yhtä tai useampaa mineraalia. Yhtä mineraalia sisältävää raketta kutsutaan puhtaaksi rakeeksi ja useampia mineraaleja sisältävää raketta sekarakeeksi. Puhtaina rakeina esiintyvän mineraalimäärän suhde prosentteina saman mineraalin kokonaismäärään kutsutaan puhtaaksijauhatusasteeksi. (Lukkarinen 1985,10.)

Liian hienoa jaetta sisältävä tuote yleensä haittaa rikastusprosessia. Hienontamislaitteen valinnalla ja käytettävillä jauhinkappaleilla voidaan vaikuttaa raekokojakaumaan. Kuvasta 3 on kuvattu eri hienonnuslaitteilla saatuja raekokokäyriä. Mitä jyrkempi käyrä raekokojakauman osalta hienonnuksessa saadaan sitä vähemmän hienoainesta syntyy.



Kuva 3 Erilaisten hienonnustuotteiden raekokokäyriä integraalikuvaajassa (Lukkarinen 1985, 77)

VM = valssimurskain

TM = tankomylly

KM-s = kuulamyllyn tuote suljetussa piirissä

Km-a = kuulamyllyn tuote avoimessa piirissä

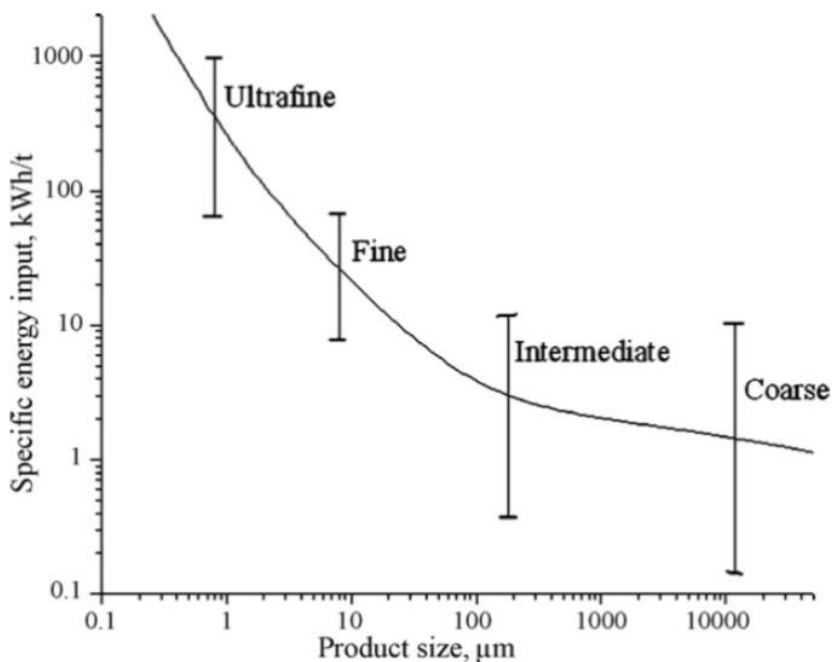
LY = luokittimen ylite

3.2 Energiankulutus jauhatusprosessissa

Kaivostoiminnassa jauhatus on suurin yksittäinen energiaa kuluttava prosessi, joka kattaa n. 30–65 % koko kaivoksen energiantarpeesta. Suurin osa jauhamiseen käytetystä energiasta kuluu varsinaisen hienonnustyön ulkopuolisiin asioihin kuten, mekaanisiin häviöihin, lämmöksi ja meluksi. Hienontumiseen kuluvaa energiaa kutsutaan nettoenergiaksi. Kokonaisenergia sisältää koko myllyn tehonoton, johon vaikuttavat:

- myllyn koko
- myllyn nopeus
- myllyn täyttöaste
- jauhinkappaleet
- myllyn vuoraus
- jauhettavan materiaalin ominaisuudet
- lietteen viskositeetti
- myllyn tyyppi.

Kuten aiemmin todettiin, materiaalin hienonnusasteen käytyä hienommaksi jauhautuvuustehokkuus heikkenee. Kuvasta 4 nähdään energian kulutuksen kasvavan raekokoon hienontuessa.



Kuva 4 Energiankulutuksen ja raekoonsuhde (Wang&Forssberg,2007).

Kaivosinsinööri Fred C. Bond kehitti vuonna 1951 ns. kolmannen hienonnusteorian, jonka mukaan voidaan määrittää syötteen raekoosta x_1 hienontamiseen tuotteeksi x_2 tarvittava nettoenergia, Bond work indeksi (BWI). Bondin yhtälön malli perustuu laboratoriokokeista ja teollisuusmyllyistä saaduista tiedoista ja on täysin empiirinen. Laskenta-arvojen saamiseksi on tehtävä laboratoriokokeita Bond-testauslaitteistoilla. Bondia aikaisemmin Rittinger (1867) ja Kick (1885) olivat kehittäneet omat teoriansa energian ja raekoon suhteesta hienonnusprosessissa. (Hukki 1964, 82.)

Materiaalin hienonnukseen käytetyn energian ja saavutetun hienousasteen välistä suhdetta on tutkittu jo 1800-luvun puolen välin jälkeen. Vuonna 1937 julkaistiin Gillilandin differentiaaliyhtälö (Hukki 1964, 82.):

$$dE = -C \frac{dx}{x^n} \quad (2)$$

E = hienonnustyöhön käytetty energia, (kWh/t)

x = tuotteen hienoutta edustava tekijä, (μm)

n = prosessin kertalukua osoittava eksponentti

C = vakio, jonka numeerinen arvo riippuu materiaalista, hienonnusmenetelmästä, käytetystä yksiköstä ym.

Rittinger

Ensimmäisen perusteellisen tutkimuksen hienontuvuuden ja käytetyn energian välisestä suhteesta esitti Paul Von Rittinger vuonna 1867. Rittingerin mukaan hienonnusprosessissa tarvittava nettoenergia on suoraan verrannollinen saavutetun pinta-alan lisäykseen. Gillilandin yhtälössä n saa arvoksi 2.

$$E_t = \int_0^{E_t} dE = -C \int_{\infty}^x \frac{dx}{x^2} = C \frac{1}{x} \quad (3)$$

E_t osoittaa nettoenergian määrää hienonnettaessa yksi tonni syötettä äärettömän suuresta alkukoosta x_1 tuotteeksi x_2 . x kuvaa tuotteen keskimääräistä raekokoa pinta-alan perusteella määritettynä.

$$E = -C \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x^2} = C \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \text{ (kWh/t)} \quad (4)$$

Kick

Riedrich Kick esitti vuonna 1885 teorian, jonka mukaan johonkin muodonmuutokseen tarvittava nettoenergia on verrannollinen kappaleen painoon tai tilavuuteen. Gillilandin yhtälössä n saa arvoksi 1

$$E_t = \int_0^{E_t} dE = -C \int_{\infty}^x \frac{dx}{x} = -C \ln \frac{x}{\infty} \quad (5)$$

Bond

Bondin mukaan murskauksessa ja jauhatuksessa käytetty nettoenergia on kääntäen verrannollinen osaskoon neliöjuureen. Gillilandin kaavassa n saa arvoksi 1,5. Kaavassa 6 kuvataan alkuperäistä teoriaa äärettömän suuresta raekoosta 100 µm hienouteen.

$$E_t = \int_0^{E_t} dE = -C \int_{\infty}^x \frac{dx}{x^{1,5}} = 2C \frac{1}{\sqrt{x}} \quad (6)$$

Kun määritetään syötteestä x_1 tuotteeksi x_2 hienonnustehtävään tarvittava energia:

$$E_t = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x^{1,5}} = 2C \left(\frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}} \right) \text{ (kWh/t)} \quad (7)$$

Kaava voidaan muokata käyttökelpoisempaan muotoon:

$$E = 10 * W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \text{ (kWh/t)} \quad (8)$$

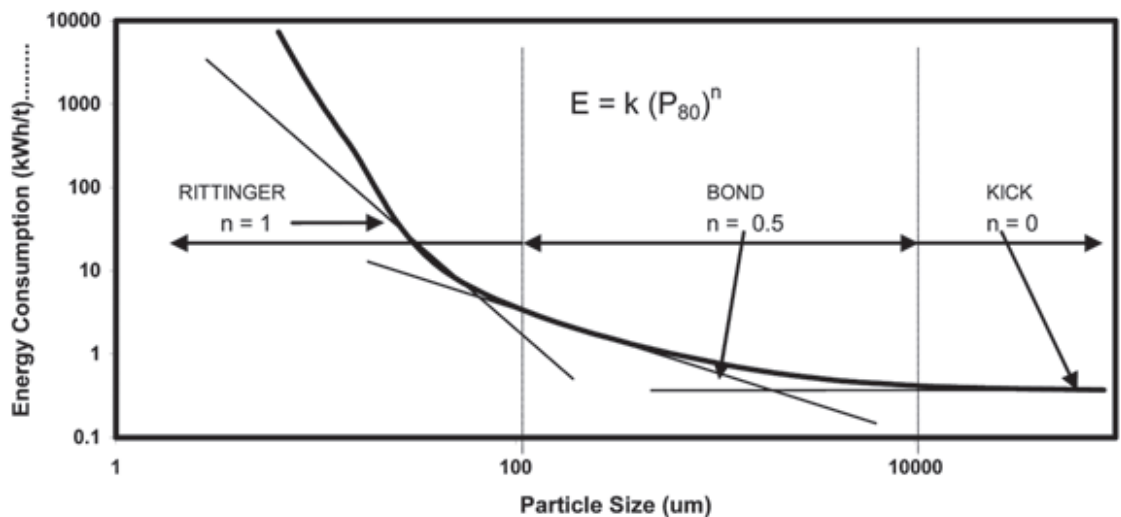
E = jauhatukseen tarvittava energia, (kWh/t)

W_i = materiaalin Work Index- arvo, (kWh/t)

F = syötteen 80 % läpäisyä vastaava arvo (µm)

P = tuotteen 80 % läpäisyä vastaava arvo (µm)

Kolmen edellä mainitun lain yhteys nähdään kuvasta 5. Kulmakertoimella -1 oleva suora osoittaa Rittingerin teorian mukaan kulkevaa energian ja hienousasteen suhdetta. Kulmakerroin -0,5 edustaa Bondin suoraa ja kulmakertoimella 0 oleva Kickin suoraa. Kuvasta 5 voidaan nähdä, että edellä mainitut lait pätevät eri hienousasteilla. R.T. Hukki (1970) havaitsi, että Kickin laki soveltuu parhaiten energian määrittämiseen murskauksessa, Rittingerin laki hyvin hienolla alueella alle 100 µm ja Bondin laki puolestaan sopii parhaiten kaivosteollisuuden jauhatuksessa sekä murskauksessa käytetyllä hienousastealueella. (Hukki 1964).



Kuva 5 Energian ja hienousasteen välistä suhdetta edustava ominaiskäyrä.
(Hukki 1964, 91)

3.3 Jauhinlaitteiston kuluvat osat

Jauhinlaitteiston kuluminen on yleensä energiankulutuksen jälkeen toiseksi suurin kuluerä jauhatusprosessissa. Kulumiseen vaikuttaa jauhettavan materiaalin kuluttavuus sekä materiaali mistä laitteisto ja jauhinkappaleet on valmistettu. Kuivajauhamisessa kulutus on vain n. seitsemäs osa märkäjauhatukseen verrattuna, koska kuivana jauhettavat materiaalit ovat yleensä huomattavasti pehmeämpiä. Märkäjauhatuksessa kulumista lisäävät korroosio ja liukeneminen. Metalliosien kuluminen ilmaistaan lb / kWh. (Bond 1951, 9) Bondin (1951) artikkelissa crushing and grinding calculations 1 & 2 on esitetty laajasti tehty tutkimus jauhinkappaleiden ja myllyjen osien kulumisesta:

Taulukko 4 Metalliosien kuluminen jauhatuksessa, lb = 0,45 kg (Bond 1951)

Myllyn tyyppi	Tanko	Kuula
Jauhinkappaleet: lb / kWh	0,21 tangot	0,14 kuulat
Vuoraus lb / kWh	0,025	0,020

Jauhinpanoksen kuluminen on yleensä sitä suurempaa mitä heikompaa materiaalin jauhautuvuus on. Jauhettaessa materiaalille sopimattomalla menetelmällä voi myllyn kunnossapitokustannukset nousta korkeiksi tai mylly voi vaurioitua. Yleisesti ottaen, mitä kovempaa jauhettava materiaali on, sitä tapauskohtaisemmin menetelmä on valittava ja yleensä sitä kalliimpi menetelmä on.

4 BOND-LABORATORIOMÄÄRITYKSET

4.1 Work Index -määrittäminen

Alunperin Bondin (1951) mukaan Work Index -arvo voidaan määrittää äärettömän suuresta raekoosta 100 µm:n hienouteen, mutta tällaisen kokeen suorittaminen olisi äärimmäisen hankalaa. Todellisuudessa jauhautuvuuskokeet suoritetaan syötteen alkukoosta F_{80} haluttuun tuotteen P_{80} hienousasteeseen, joka yleensä vastaa todellisuudessa tapahtuvaa jauhatustapahtumaa, johtuen malmien heterogeenisyydestä. (Hukki 1964) Work Index-arvo on laajalti käytetty parametri arvioitaessa myllyjen energian tarvetta sekä myllyjen suunnittelussa. Wi-arvo kuvaa materiaalin kykyä vastustaa hienonnusta ja se ilmaistaan kilowattitunteina tonnia kohden (kWh/t). Itse jauhautuvuus määritetään kierrosta kohden saatavana tuotemääränä grammoina. Materiaalit voidaan luokitella Wi-arvon perusteella helposti jauhautuviin pehmeisiin materiaaleihin sekä heikosti jauhautuviin koviin materiaaleihin.

Taulukko 5 Work Index -arvon perusteella tehty kovuus luokitus (JKTech)

Property	Soft	Medium	Hard	Very Hard
Bond Wi (kWh/t)	7 - 9	9 - 14	14 - 20	> 20

Bond-kokeilla saatu Wi-arvo kuvaa nettoenergiantarvetta tietyntyyppisessä jauhatusprosessissa. Näin ollen suunniteltaessa jauhatusprosessia Bondin kaavaan (9) lisätään tehokkuuskertoimia (EF) (kappale 4.3) olosuhteiden poiketessa alkuperäisestä. Samoin myllyn mitoittamiseen on laadittu laskentamenetelmä, kun poiketaan Bondin metodilla saatavan halkaisijaltaan 2,44 metrin myllyn alkuperäisistä mitoista (kappale 4.2).

$$E \text{ (kWh/t)} = 10 * W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) * EF \quad (9)$$

Standardi Bond- jauhautuvuuskoe suoritetaan suljettuna piirinä kuivajauhatuksena käyttämällä seulaa luokittimen sijasta. Myllyjen kierronnopeus on säädetty vakioksi, joten kierrosmäärää säätämällä vaikutetaan jauhatusaikaan ja samalla materiaalin hienonnusasteeseen. Menetelmän ollessa empiirinen, täytyy kokeita suoritettaessa huolehtia välineiden ja jauhinkuormien oikeellisuudesta, jotta luotettavat tulokset olisivat saavutettavissa. Kokeita suoritettaessa on kiinnitettävä huomiota seulonnan laatuun, joka korostuu hienonnusasteen käytä hienommaksi. Tällöin kerrallaan seulottavaa materiaalmäärää tulisi vähentää. Jauhautuvuuskoe suoritetaan kolmen muuttujan suhteen syöte (F_{80}), tuote (P_{80}) ja nettotuotemäärä (G_p) kierrosta kohden. Bondin Wi-kaava on herkin kierrosta kohden tuotetun materiaalin määrän suhteen (G_p). Seuraavaksi herkin se on arvolle P_{80} ja vähiten herkkä arvolle F_{80} . (Kurki 2006, 27.)

Bond- jauhautuvuskokeita suoritettaessa ei voida täysin välttää materiaalin hävikiltä. Hävikin voidaan olettaa johtuvan suurimmalta osin hienon materiaalin pölyämisestä sekä adsorpoitumisesta jauhinkappaleiden pintoihin sekä myllyn seinämiin. Laskennassa tämä tulisi ottaa huomioon siten, että syntynyt häviö lisätään alitteen painoon. Hävikin käytyä suuremmaksi laskenta vääristyy kiertokuorman osalta ja syntyneet kierroskohtaisen tuotteen osalta, mikä vaikuttaa laskettavaan Work Index -arvoon.

Vaikka Bondin metodi on todettu luotettavaksi tavaksi määrittellä materiaalien jauhautuvuuksia tietyissä olosuhteissa on sille asetettu muutamia rajoituksia. Esimerkiksi tarkasteltaessa kaksivaiheisen jauhinsiirin toimintaa täytyy ottaa huomioon ettei prosessissa toimivan ensimmäisen myllyn toiselle myllylle syöttämä syöte ole valttämättä raekooltaan tai hienontumisominaisuuksiltaan samanlainen kuin Bond-kokeita varten murskattu näyte. Muita listattuja poikkeuksia ovat mm. (Science of comminution, Outokumpu):

- Metodi on suunniteltu arvioitaessa märkäjauhatuspiirin energiankulutusta kiertokuorman ollessa 250 %. Poiketessa näistä olosuhteista tulosten tarkkuus heikkenee
- Menetelmällä ei voida arvioida suurten lohcareiden käyttäytymistä jauhatuspiirissä, missä hienontuminen tapahtuu pääasiassa iskusta
- Menetelmä ei sovellu hyvin hienoille hienonnusasteille n. 10 μm .

Bondin menetelmästä on tehty useita versioita, joista esimerkkinä Berryn ja Brucen (1966) kehittämä Work index -määritysmenetelmä. Menetelmässä käytetään hyväksi referenssinäytettä, minkä jauhautuvuus ja energiankulutus tiedetään. Analysoitavaa näytettä (t) ja referenssinäytettä (r) varataan saman verran. Analysoitavaan näytettä jauhetaan saman verran energiankulutuksen osalta kuin referenssinäytettä. Laskennassa käytetään Bondin kaavaa, joka muutetaan muotoon:

$$W_{it} = W_{ir} \left(\frac{10}{\sqrt{P_r}} - \frac{10}{\sqrt{F_r}} \right) / \left(\frac{10}{\sqrt{P_t}} - \frac{10}{\sqrt{F_t}} \right) \quad (10)$$

4.2 Myllyn mitoitus

Myllyn mitoittamiseen käytettäviä metodeja on lukuisia. Pääsääntöisesti ne perustuvat laboratoriokokeista saaduista tuloksista, mitkä skaalataan vastaamaan tehdasmittakaavan myllyä käyttäen eri jauhatusmenetelmille laadittuja tehokkuuskertoimia. Bondin Work Index -arvon perusteella tehty myllyn mitoitus on yleisimmin käytetty menetelmä. Bondin menetelmä voidaan jakaa viiteen osaan (Schlantz 1987, 23):

- Standardi Bond- jauhautuvuustesti.
- Empiirinen yhtälö, joka on suunniteltu muuttamaan testitulokset vastaamaan 2,44 m halkaisijaltaan olevan suljetussa piirissä toimivan märkäjauhatusmyllyn 250 %:n kiertokuormalla.
- Empiirinen yhtälö sallimaan kokonaisvaltaisen tuotteen hienontumisen suljetussa piirissä.
- Skaalaus suhde tehdasmyllykokoon.
- Tehokkuuskertoimet eri olosuhteille.

Work Index-arvon avulla voidaan määrittää nettoenergiankulutus käyttämällä kaavaa 9. Skaalaus isompaan myllykokoon kuin halkaisijaltaan (D) 2,44 m, Work Index-arvo täytyy skaalata seuraavan kaavan mukaan:

$$Wi = (Wi)_{test} \left(\frac{2,44}{D} \right)^{0,2}, \quad D < 3,81 \text{ m} \quad (11)$$

$$Wi = (Wi)_{test} (0,914), \quad D > 3,81 \text{ m} \quad (12)$$

Tämä mahdollistaa uuden kokonaisenergian määrittämisen suuremmalle myllylle Bondin kaavan 9 mukaan. Käytettäessä määritettyä kokonaisenergian arvoa E haluttuun myllyn halkaisijaan nähden, voidaan vaadittu akselin teho (Mp) tietyllä syöttövirtauksella (Q) määrittää kaavasta:

$$Mp \text{ (kW)} = QE \quad (13)$$

Akselin tehoa voidaan käyttää myllyn tehona kaavassa:

$$Mp = 7,33J C_s (1 - 0,937J) \left(1 - \frac{0,1}{2^9 - 10\phi_c} \right) (P_b LD^{2,3}) \quad (14)$$

P_b = jauhinkappaleiden ominaispaino, (t/m³)

C_s = kierrosnopeus kriittisestä (%)

J = käytettävä jauhinkuorma (kg)

L = myllyn pituus, (m) ja D = myllyn halkaisija, (m)

4.3 Tehokkuuskertoimet

Tehokkuuskertoimia käytetään Bondin kolmannen hienonnusteorian yhteydessä kertoimena, minkä avulla tulos saadaan muutettua valitulle prosessityypille. Seuraavassa on esitetty yhdeksän eri tilanteen muuntokertoimet. (Outokumpu, Science of Comminution.)

1. EF1 kuivajauhatus

Useimmissa tapauksissa jauhettaessa kuivana prosessi tarvitsee 1,3 kertaa enemmän energiaa kuin märkajauhatuksessa, arvon vaihdella 1,1 - 2,0 välillä.

$$W_i (\text{kuiva}) = 1,3 * W_i (\text{märkä}) \quad (15)$$

2. EF2 avoinpiiri

Avoimelle piirille on laadittu korjauskerroin avoimessa piirissä tapahtuvan ylijauhautumisen takia, mikä vaikuttaa energian kulutukseen kasvavasti. Kerroin riippuu tuotteen prosentuaalisesta määrästä (taulukko 6):

$$W_i (\text{avoin märkäpiiri}) = W_i (\text{suljettu märkäpiiri}) * \text{tehokkuuskerroin} \quad (16)$$

Taulukko 6 Avoimen märkajauhatuspiirin kerroin

Tuotteen läpäisy (%)	Kerroin	Tuotteen läpäisy (%)	Kerroin
50	1,035	90	1,40
60	1,05	92	1,46
70	1,10	95	1,57
80	1,20	98	1,70

3. EF3 myllyn halkaisijan vaikutus

Normaalisti Bondin menetelmällä määritetty energian kulutus vastaa halkaisijaltaan 2,44 m myllyä.

$$EF = (2,44/D)^{0,2} \quad (17)$$

4. EF4 erittäin hienon materiaalin jauhatus

Kun haluttu tuotteen raekoko on alle 75 µm ja suurempi kuin 15 µm käytetään kaavaa:

$$F_R = \frac{P_{80+10,3}}{1,145P_{80}} \quad (18)$$

5. EF5 ylisuuri syötteen raekoko

$$EF5 = \frac{R_r + (Wi-7)*(F-F_0)/F_0}{R_r} \quad (19)$$

R_r = hienonnussuhde, (F_{80} / P_{80})

Wi = Work Index kuulamyly (kWh / t)

F_0 = optima syötteen raekoko = $Zf(13/RWi)^{0,5}$

Zf = vakio, tankomyly = 16000 ja kuulamyly = 4000

RWi = Work Index tankomyly (kWh/t)

6. EF6 matala/korkea hienonnussuhde tankojauhatusessa

Yhtälöä käytetään ellei R_r ole välillä $R_{r0} = -2...+2$:

$$EF6 = 1 + \frac{(R_r - R_{r0})^2}{150} \quad (20)$$

$R_{r0} = 8 + 5L/D$

D = myllyn sisähalkaisija, (m)

L = myllyn pituus, (m)

7. EF7 matalahienonnussuhde kuulamyly

Kerointa käytetään kun hienonnussuhde syöttestä tuotteeksi on alle 6.

$$EF7 = \frac{2*(R_r - 1,35) + 0,26}{2*(R_r - 1,35)} \quad (21)$$

8. EF8 tankomylysyöte

Laskettaessa ainoastaan tankomylyn energiankulutusta, käytetään EF7 arvoa 1,4, kun syöte on esivalmisteltu avoimessa murskainpiirissä ja 1,2 kun näyte on esivalmisteltu suljetussa murskainpiirissä. Tanko- ja kuulamylypiirissä arvoa 1,2 käytetään tankojauhatusvaiheessa ainoastaan jos syöte on murskattu avoimessa piirissä.

9. EF9 kumisen vuorauksen käyttö

Sovelletaan käytettäväksi myllyille, jotka sisältävät kumiset nostopalkit. Palkit pienentävät myllyn jauhintilaa sekä jauhettava materiaali kiinnittyy palkkien pintaan huonontaan jauhautuvuutta. Outokumpu-yhtiö suosittelee käytettävän kerointa 1,07 myllyille, joissa käytetään kyseisiä palkkeja.

4.4 Testauslaitteistot

Tässä työssä testattiin Labtech Essan valmistamia Bond-kuulamylyä, Bond-tankomylyä ja Bond-abraasio indeksi testauslaitetta. Jauhautuvuuskokeet suoritetaan suljetussa piirissä kuivajauhatuksena. Kutakin laitetta käytettäessä on huomioitava jauhin- ja testilaitteiden kuluminen. Luotettavien tulosten saavuttamiseksi kuluneet jauhinkappaleet ja abraasio indeksi testilaitteessa käytettävä testauslaippa vaihdetaan, kun niissä havaitaan kulumista.

4.4.1 Bond-kuulamyly

Kuulamyly on sisältä tasainen, pyöreä kulmainen ja myllyn mitat ovat 305 mm * 305 mm (kuva 6). Myllyä pyörittää kolmivaihemoottori ja kokeissa käytetty kierrosnopeus on 70 rpm. Myllyn saa käännettyä 45 asteen kulmaan ylöspäin täyttöä varten ja alaspäin tyhjennystä varten. Myllyn kannen alapuolella on ritiliäkaukalo johon näytteet sekä kuulat kaadetaan. Kuulien kulumisesta sekä valmistajien tarjoamista erikokoisista kuulista johtuen kuulille on määritetty ylä- ja alarajat. Kuulapanos tulisi punnata joka kymmenennen kokeen jälkeen. Panosta tulisi muokata kun havaitaan yli 10 gramman kulumishäviö. (Mosher&Tague 2001)

Kuulapopulaatio tulisi sisältää 285 kpl viittää eri kokoa olevaa kuulaa taulukon 7 mukaisesti. Mosher ja Taguer (2001) esittivät, että kuulien kokonaislukumäärän toteutumisesta voidaan olla montaa mieltä, mutta tärkeämpää on, että kuulien koon ja kumulatiivisen massan suhde säilyy. Bond suositteli seuraavaa kuulapopulaatiota:

Taulukko 7 Bondin kuulapopulaatio ja kuulien raja-arvot

Kpl	halkaisija,mm	massa, g	yläraja,mm	
	mm		mm	alaraja, mm
43	36,83	8 730	38,1	31,8
67	29,72	7 197	31,8	28,4
10	25,40	705	28,4	22,3
71	19,05	2 058	22,3	16,0
94	15,49	1 441	16,0	12,7

Kokeita varten muodostettu kuulapanos oli taulukon 8 mukainen.

Taulukko 8 Kokeissa käytetty kuulapopulaatio

	kpl	Halkaisija (mm)	Massa (g)
	40	38,10	9 012
	60	31,70	7 824
	10	25,40	667
	68	19,05	1 911
	86	12,75	722
Yht.	265		20 136

Myllyn kriittinen nopeus (n_c)

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{D-d}} = \frac{42,3}{\sqrt{0,305 - 0,0248}} = 79,9 \text{ Kierr./min} \quad (22)$$

D = myllyn sisähalkaisija (m)

d = jauhinkappaleen halkaisija ka. (m)

Myllyn nopeus kriittisestä (n_p)

$$n_p = \frac{n}{n_c} * 100 \% = 87,6 \% \quad (23)$$

n = myllyn nopeus (kierr. / min)

Myllyn täyttöaste

$$V = 113 - 126 \left(\frac{H}{D} \right) = 113 - 126 \left(\frac{0,23m}{0,305m} \right) = 18 \% \quad (24)$$

H = Jauhinkappalepanoksen yläpinnan etäisyys myllyn katosta (m)

D = Myllyn sisähalkaisija (m)

4.4.2 Bond-kuulamylymenetelmä

Syötenäytettä varataan 8-10 kg ja näyte murskataan vaiheittain alle 3,35 mm:n (6 mesh) raekokoon. Jauhatus voidaan tehdä mihin tahansa hienouteen alle 600 µm, mutta yleisimmät tuotehienoudet ovat 106 µm, 150 µm ja 212 µm. Syötenäytteelle tehdään seula-analyysi, jolloin voidaan määrittää valmiin tuotteen prosentuaalinen osuus syötteessä. Näyte asetetaan 700 ml:n astiaan tiiviisti täytintä apuna käyttäen. Näyte punnitaan ja massa säilytetään kokeen ajan vakiona. Punnitusta näytteestä määritetään näytteen ominaispaino. Kokeen alussa myllyä pyöritetään 100–150 kierrosta. Normaalisti tämä vastaa n. 400 grammaa lopputuotetta. (Weiss 1985 30–67.) Tuotteen katkaisuseulakoko määritetään vaaditun hienousasteen P_{80} perusteella, joka on yleensä seuraava suurempi $\sqrt{2}$ -seulasarjakoko. Kokeessa pyritään saavuttamaan toistuvasti 250 %:n kiertokuorma, joten jakson aikana saatavaksi ideaaliseksi tuotemääräksi (IPP) saadaan:

$$IPP = \text{syötteen paino (g / 700 ml)} / 3,5 \quad (25)$$

Jos syötenäyte sisältää valmista tuotetta yli 28 %, ensimmäisellä jaksolla myllyä ei pyöritetä. Syötenäyte seulotaan katkaisuseulalla ja alite korvataan lajittumattomalla syöteellä. Ensimmäiselle jaksolle kierrosmääräksi merkitään 0.

Kun 250 %:n kiertokuorma saavutetaan kolme kertaa peräkkäin, lasketaan kolmen viimeisen jakson nettotuotemäärän keskiarvo kierrosta kohden (Gbp), joka kuvaa materiaalin jauhautuvuutta (g/kierros). Laskentaan otettavien kierrosten tuotemäärän vaihtelu matalimman ja korkeamman välillä ei saa ylittää 3%. Kolmen viimeisen jakson tuotteet yhdistetään ja jaetaan jakolaitteella edustava seula-analyysinäyte.

Work index lasketaan kaavalla:

$$Wi_{bm} = \frac{49,1}{Pi^{0,23} * Grp^{0,82} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (26)$$

Wi_{bm} = Work Index kuulamyly (kWh/t)

Gbp = kolmen viimeisen jakson tuotteen määrä kierrosta kohden (g/kierros)

Pi = katkaisuseulan koko (µm)

P_{80} = tuotteen d_{80} (µm)

F_{80} = syötteen d_{80} (µm)

Määritetyn Wi -arvon ja Bondin kolmannen lain mukaan voidaan laskea syötteestä tuotteeksi tarvittava nettoenergia jauhettaessa märkänä 250 %:n kiertokuormalla

ylitemyllyllä suljetussa piirissä, sisähalkaisijan ollessa 2,44 m. Jos jauhaminen suoritetaan kuivana tulisi saatu Wi-arvo kertoa 1,3.



Kuva 6 Bond-kuulamyly ja "likainen" kuulapopulaatio

4.4.3 Bond-tankomylly

Tankomylly sisältää nostinpalkit ja on mitoiltaan 305 mm * 610 mm (Kuva 7). Myllyä pyörittää kolmivaihemoottori nopeudella 46 rpm ja mylly on varustettu kierroslukulaskimella. Mylly kääntyy 45 asteen ja 5 asteen kulmaan sekä ylös- että alaspäin. Kokeissa käytettävä tankopanos oli taulukon 8 mukainen.

Taulukko 9 Tankomyllykokeissa käytetty tankopanos

Kpl	Halkaisija, mm	Pituus, mm
2	45	533
6	32	533

Tankopanosen yhteispaino 33,380 kg.

Myllyn kriittinen nopeus (n_c)

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{D-d}} = \frac{42,3}{\sqrt{0,305 - 0,0385}} = 81,9 \text{ Kierr./min} \quad (27)$$

D = myllyn sisähalkaisija (m)

d = jauhinkappaleen halkaisija ka. (m)

Myllyn nopeus kriittisestä (n_p)

$$n_p = \frac{n}{n_c} * 100 \% = 56,2 \% \quad (28)$$

n = myllyn nopeus (kierr. / min)

Myllyn täyttöaste

$$V = 113 - 126 \left(\frac{H}{D} \right) = 113 - 126 \left(\frac{0,258 \text{ m}}{0,305 \text{ m}} \right) = 6,4 \% \quad (29)$$

H = Jauhinkappalepanoksen yläpinnan etäisyys myllyn katosta (m)

D = Myllyn sisähalkaisija (m)

4.4.4 Bond-tankomyllymenetelmä

Syötteeksi varataan n.15–20 kg alle 12,7 mm:n raekokoon murskattua näytettä. Jauhatus voidaan suorittaa mihin tahansa hienouteen välillä 4760–210 µm, mutta yleisin tuotehienous on 1 180 µm (Bond). Syötenäytteestä tehdään seula-analyysi. Analyysin tuloksista määritetään valmiin tuotteen prosentuaalinen osuus syötteessä sekä F_{80} . Näytettä asetetaan 1250 ml:n astiaan tiiviisti tärytintä apuna käyttäen. Näyte punnitaan ja määritetään ominaispaino (g/l). Näytteen paino säilytetään samana koko kokeen ajan. Tuotteen leikkaava seulakoko määritetään vaaditun hienousasteen P_{80} perusteella, joka on yleensä seuraava suurempi $\sqrt{2}$ -seulasarjakoko. Kokeen tavoitteena on saavuttaa toistuvasti 100 %:n kiertokuorma, jolloin ideaalinen jauhatusjaksossa tavoiteltava tuotemäärä (IPP) on:

$$IPP = \text{syötteen paino (g/1250 ml)} / 2 \quad (30)$$

Jos syöte sisältää yli 50 % valmista tuotetta, seulotaan näyte ja alite korvataan lajittumattomalla syötenäytteellä. Kierrosluvuksi merkitään 0.

Kun 100 %:n kiertokuorma saavutetaan kolme kertaa peräkkäin, lasketaan kolmen viimeisen jakson nettotuotemäärän keskiarvo kierrosta kohden (G_{rp}), joka kuvaa materiaalin jauhautuvuutta g/kierros. Kolmen viimeisimmän jakson tuotteet yhdistetään ja tehdään seula-analyysi. Laskentaan otettavien kierrosten tuotteen matalimman ja korkeimman määrän vaihtelu ei saa ylittää 3 %. Näytteet yhdistetään ja jaetaan edustava seulanäyte käyttämällä jakolaitetta.

$$Wi_{rm} = \frac{68,4}{Pi^{0,23} * Grp^{0,625} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (31)$$

Wi_{rm} = Work Index tankomylly (kWh/t)

Grp = kolmen viimeisen jakson tuotteen keskiarvo (g/kierros)

Pi = katkaisuseulan koko (µm)

P_{80} = tuotteen d_{80} (µm)

F_{80} = syötteen d_{80} (µm)

Määritetyn Wi -arvon ja Bondin kolmannen lain mukaan voidaan laskea syötteestä tuotteeksi tarvittava nettoenergia jauhettaessa märkänä 100 %:n kiertokuormalla avoimessa piirissä ylitemyllillä, sisähalkaisijan ollessa 2,44 m. Jos jauhaminen suoritetaan kuivana tulisi Wi -arvo kertoa 1,3.

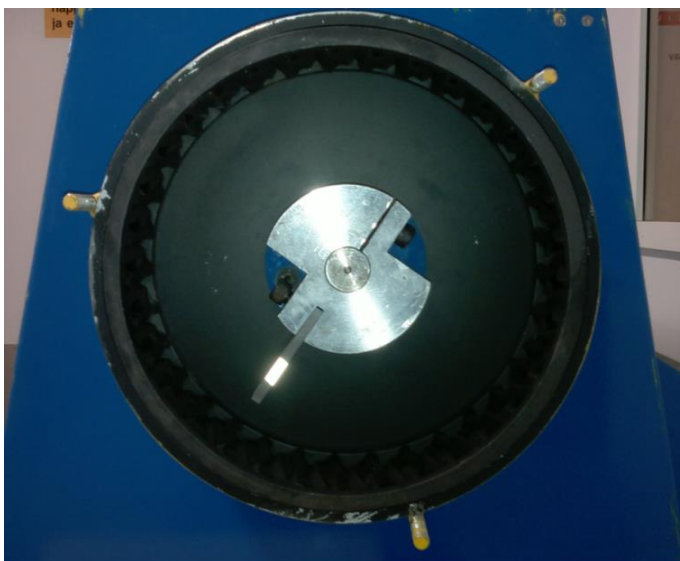


Kuva 7 Bond -tankomylly

4.4.5 Bond abraasio index

Abraasio index -testilaitteella (kuva 8) määritetään prosessoitavan materiaalin kuluttavuutta. Kokeista saatavaa Ai-arvoa käytetään määrittäessä teräksisten jauhinkappaleiden ja myllyjen sekä murskainten osien kulumista prosessissa.

Testauslaitteen rumpu ja sisällä oleva testiläppä pyörivät eri nopeuksilla, testiläppä 632 rpm ja rumpu 70 rpm. Rummun sisään sijoitetaan metallinen nostinverkko, joka nostaa materiaalia pois reunoilta. Roottorissa on kaksi liitäntää testausläpälle, mutta toinen jätetään tyhjäksi. Lämpän tulee olla 2" (5,08cm) esillä roottorista. Läppä on SAE 4325 terästä ja se on mitoiltaan 76,2 * 25,4 * 6,35 mm.



Kuva 8 Abraasio Index -testilaite

4.4.6 Bond abraasio index menetelmä

Syötenäytettä varataan n. 4 kg ja näyte murskataan kokoon välille 12,7–19,0 mm. Näyte jaetaan neljään 400 g:n panokseen. Jokaista panosta pyöritetään 15 minuuttia testilaitteessa. Testiläppä punnitaan ennen kokeen alkua sekä kokeen jälkeen 0,0001 gramman tarkkuudella. Abraasio index -arvo on testiläpän massan vähenemä grammoina. Neljän jakson näytepanokset yhdistetään ja jaetaan edustava seula-analyysinäyte. Pienimmän seulakoon tulisi olla vähintään 75 µm.

Bond määrittä korjaavia kuluttavuusarvojen laskentakaavoja W_r (Wear rate) eri hienonnuksen kuluville osille. Wear rate ilmoitetaan yksikkönä (kuluma paunoina / energiaa kohden jauhatuksessa ja murskauksessa) (Weiss 1985, 30-68)

Tankojauhatus, märkä

$$\text{Tangot: lb / kWh} \quad W_r = 0,35 (A_i - 0,020)^{0,2} \quad (32)$$

$$\text{Vuoraus: lb / kWh} \quad W_r = 0,35 (A_i - 0,015)^{0,3} \quad (33)$$

Kuulajauhatus, märkä

$$\text{Kuulat: lb / kWh} \quad W_r = 0,35 (A_i - 0,015)^{0,33} \quad (34)$$

$$\text{Vuoraus: lb / kWh} \quad W_r = 0,026 (A_i - 0,015)^{0,3} \quad (35)$$

Kuulajauhatus, kuiva

$$\text{Kuulat: lb / kWh} \quad W_r = 0,05 A_i^{0,5} \quad (36)$$

$$\text{Vuoraus: lb / kWh} \quad W_r = 0,005 A_i^{0,5} \quad (37)$$

Murskain (leuka, kartio)

$$\text{Vuoraus} \quad W_r = (A_i + 0,22) / 11 \quad (38)$$

Murskain (valssi)

$$W_r = (0,1 A_i)^{0,667} \quad (39)$$

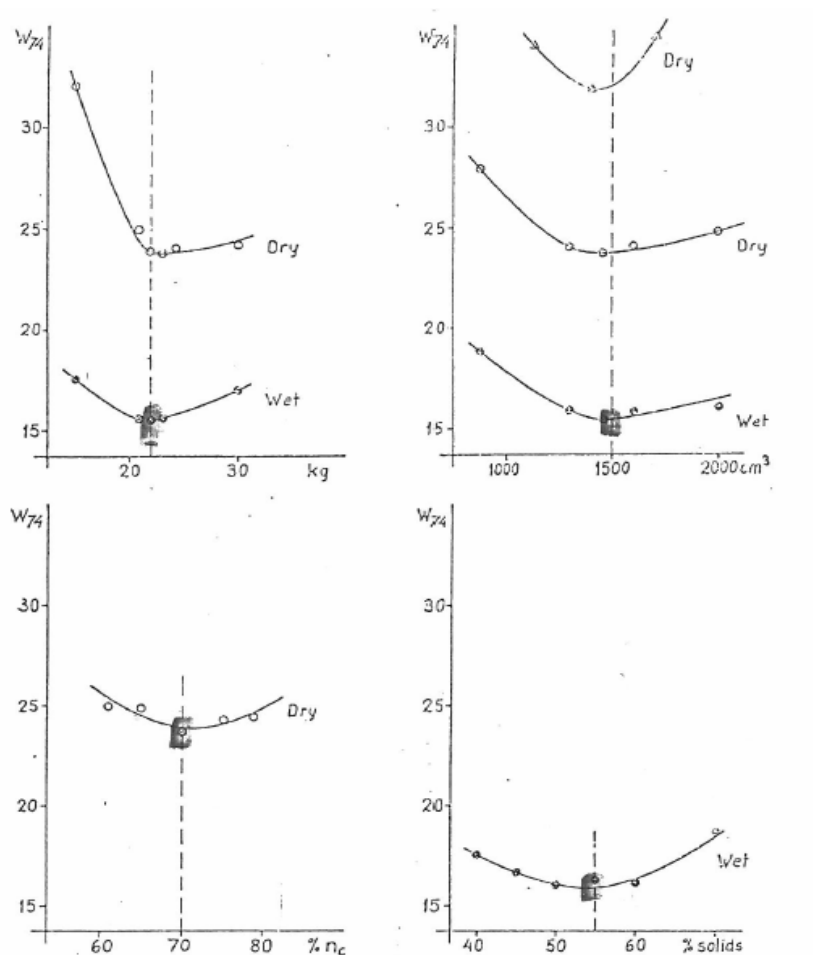
5 MERGAN-LABORATORIOMÄÄRITYS

Mergan-menetelmä on Niitin (1970) kehittämä menetelmä määrittää Work Index (M-Wi). Kehitellessään menetelmää Niitin mielestä oli kokeessa seuraavat asiat toteuduttava:

- Jauhatus on pystyttävä toteuttamaan joko märkä- tai kuivajauhatuksena.
- Energian kulutus on pystyttävä mittaamaan.
- Tuotteen hienousaste on pystyttävä määrittämään tapauskohtaisesti.
- Määritysmenetelmän tulee olla nopea ja yksinkertaisesti toteutettavissa.

Mergan-kuulamyllymenetelmä

Mergan-kuulamyllä (kuva 10) on mitoiltaan 268 * 268 mm, mikä vastaa kooltaan yhtä prosenttia Hukin (1964) määrittämästä perusmyllystä. Kokeissa käytettävä kuulapanos on massaltaan 22,45 kg ja panos sisältää kolmea erikokoista kuulakokoa. Karkeampaa materiaalia jauhettaessa voidaan myllyssä käyttää nostopalkkeja, jolloin jauhatukseen saadaan myös iskevä vaikutus. Energiankulutus mitataan vääntömomentin avulla. Myllyn kylkeen asetetusta energiankulutusmittarista saadaan jauhamisen aikana käytetty energiankulutus. Kokeet suoritetaan panoskokeina, joko märkänä tai kuivana. Märkäjauhatuskokeessa käytetty kiintoainepitoisuus on n. 50 %. Niitti (1970) määrittäi jauhettavan panoksen kooksi 5 kg, joka vastaa useimmissa tapauksissa n. 1 500 millilitraa. Tällöin materiaali täyttää jauhinkappaleiden väliin jäävät välit. Myllyn optimaalinen kierrosnopeus on määritetty olevan 70 % kriittisestä nopeudesta. Myllyn todellinen kierrosnopeus määritetään jauhatusajan ja todellisen kierroslukumäärän mukaan. Myllyn on todettu pyörivän aluksi hitaammin ja materiaalin hienontuessa vauhti hivenen kasvaa. Jauhatusjakson jälkeen panos kuivataan sekä jaetaan edustava seula-analyysinäyte. Tuotteen hienoutta verrataan kokeen alussa asetettuun tavoite arvoon. Jauhatusta jatketaan ellei haluttua hienousastetta saavuteta.



Kuva 9 Niitin määrittämät optimaaliset olosuhteet
Mergan-jauhatuskokeille (Niitti 1970, 42)

W_{74} tarkoittaa energian kulutusta uutta $-74\mu\text{m}$ tuotetta kohden kilowattitunteina tonnia kohden. Menetelmää varten Niitti teki kokeita eri olosuhteissa määrittäessään optimaalisia koeolosuhteita, jotka näkyy kuvassa 9. Kuvassa on neljä kuvaajaa, joiden ala-akseleilla on esitetty jauhinpanoksen optimaalinen massa, jauhettavan materiaalin optimitilavuus, optimaalinen kierrosnopeus kriittisestä sekä optimaalinen lietteen kiintoaineprosentti.

Mergan Work Index (M-Wi) kuvaa jauhamiseen tarvittavaa nettoenergiaa, joka voidaan laskea kaavalla:

$$W = U * \frac{C}{F} \quad (40)$$

W = nettoenergia (kWh/t)

U = energiayksikkölaskurin lukema

C = myllyvakiokerroin

F = näytteen kuivapaino (t)

Work Index -määrittäminen perustuu Bondin kolmanteen hienonnusteoriaan:

$$Wi = 0,1 * W * \frac{\sqrt{X_f} * X_p}{\sqrt{X_f} - \sqrt{X_p}} \quad (41)$$

Wi = Work Index (kWh/t)

W = nettoenergia (kWh/t)

Xf = F₈₀ = syötteen 80 % läpäisyä vastaava raekoko (μm)

Xp = P₈₀ = tuotteen 80 % läpäisyä vastaava raekoko (μm)



Kuva 10 Mergan-kuulamylly ja kuulapanos

Myllyn kriittinen nopeus (n_c)

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{D-d}} = \frac{42,3}{\sqrt{0,305 - 0,027}} = 86,2 \text{ Kierr./min} \quad (42)$$

D = myllyn sisähalkaisija (m)

d = jauhinkappaleen halkaisija ka. (m)

Myllyn nopeus kriittisestä (n_p)

$$n_p = \frac{60}{86,2} * 100 \% = 69,6 \% \quad (43)$$

n = myllyn nopeus (kierr. / min)

Myllyn täyttöaste

$$V = 113 - 126 \left(\frac{H}{D} \right) = 113 - 126 \left(\frac{0,17m}{0,268m} \right) = 33,7 \% \quad (44)$$

H = Jauhinkappalepanoksen yläpinnan etäisyys myllyn katosta (m)

D = Myllyn sisähalkaisija (m)

6 JAUHAUTUVUUSKOKEIDEN SUORITUS

6.1 Laboratoriokokeet

Tässä opinnäytetyössä testattiin erityyppisten malmien jauhautuvuutta Bond- ja Mergan-menetelmällä sekä malmin kuluttavuutta Bond Abrasio Index -testauslaitteella. Jauhautuvuuskokeissa hienonnusasteet pyrittiin saamaan samaksi kuin materiaalit todellisuudessaakin jauhetaan. Bond-jauhautuvuuskokeet suoritettiin suljettussa piirissä kuivana ja Mergan-kokeet märkäjauhatuksena panoskokeina. Abrasion Index -kokeet suoritettiin kuivana.

6.2 Näyte käsittely

Kokeita varten näytteet, jotka olivat menetelmään vaadittavaa hienousastetta karkeammassa raekoossa murskattiin hienompaan raekokoon vaiheittain valssimurskaimella (kuva 11).



Kuva 11 Valssimurskain (leveys 15 cm)

Suuremmat määrät jaettiin kahtiointilaitteella ja siitä edellen pullonjakolaitteella, jolloin näytteestä saatiin mahdollisimman edustava raekokojakauman osalta. Jokaisesta näytteestä tehtiin seula-analyysi ennen ja jälkeen kokeiden. Näyte seulottiin aluksi märkänä hienoimmalla valitulla seulakoolla (kuva 12) ja ylite lopuksi kuivana Ro-Tap-seulontalaitteessa (kuva 13).



Kuva 12 Märkäseulonta



Kuva 13 RO-TAP seulontalaite ja seulasarja

Mergan-kokeissa panos kuivattiin jauhatusjaksojen välissä seula-analyysiä varten. Tällöin saavutetaan luotettavampi näytteen jako kuin märkänä. Näytteet suodatettiin kuvan 14 mukaisesti imupulloilla ja kuivattiin lopuksi lämpölevyllä. Myös märkäseulonnan alite ja ylite suodatettiin ja kuivattiin samalla tavalla.



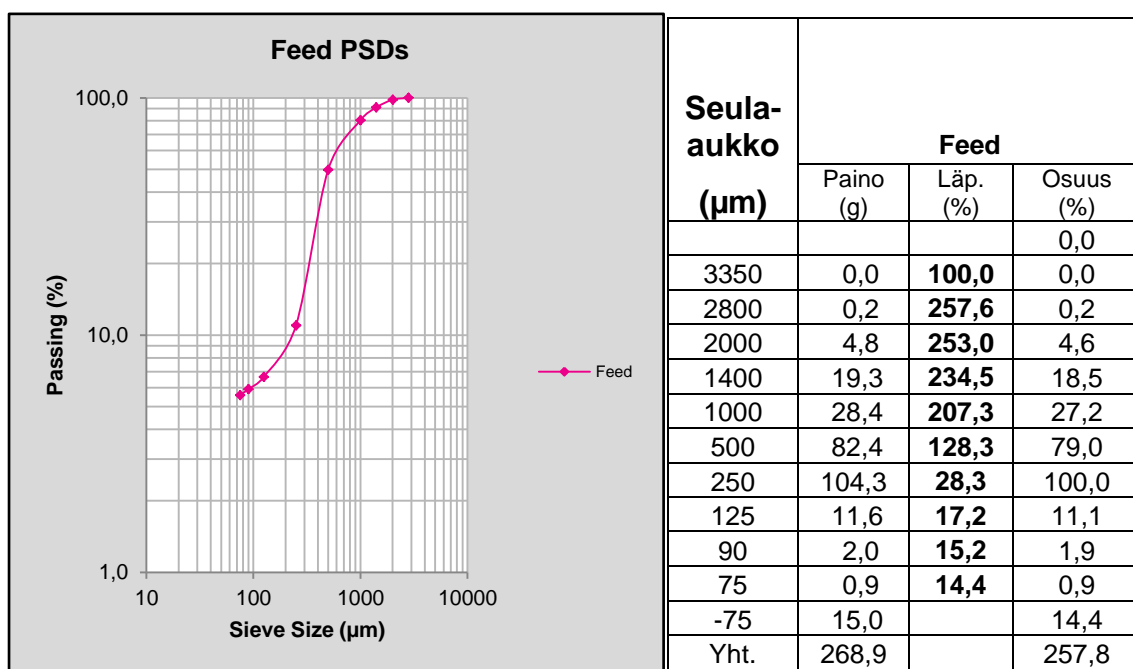
Kuva 14 Näytteen suodatus

Bond-kokeissa näyte seulottiin jaksojen välissä valitulla kaitkaisuseulalla (kuva 15) käyttämällä Ro-tap –seulontakonetta. Alite korvattiin uudella syötteellä, joka jaettiin aikaisemmin mainituilla tavoilla.



Kuva 15 Katkaisuseulonta

Seula-analyysistä saadut tulokset kirjattiin Excel-taulukoon, josta tehtiin logaritminen integraalikuvaaja läpäisyprosentin ja raekokoon suhteesta (kuvio 3). Taulukossa esitetään myös kullekin seulakoolle jäänyt materiaalin paino sekä painon osuus kokonaispainosta.



Kuvio 3 Esimerkki seula-analyysi

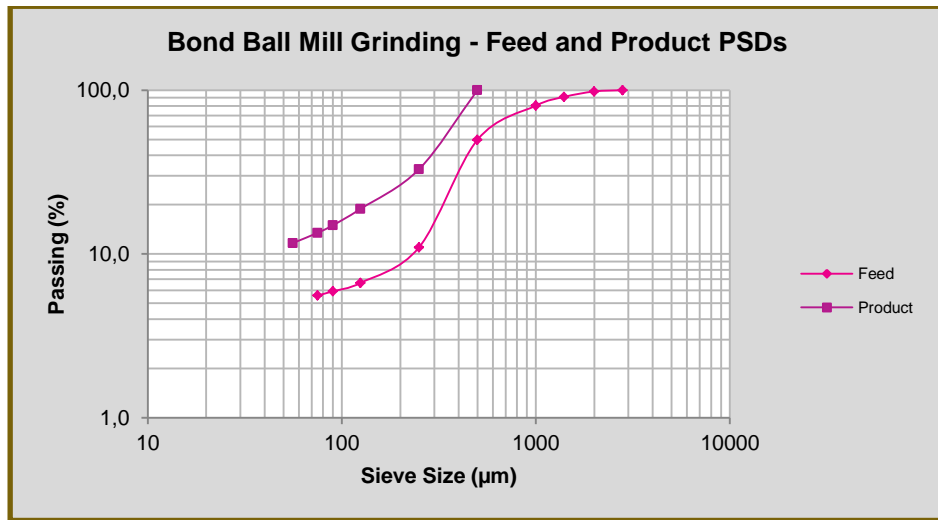
6.3 Tutkittavat näytteet ja tulokset

6.3.1 Pilot-näytteet

Pilotista otetuista näytteistä kaksi oli eri malmilaatua olevaa kuulamylyn syötettä. Toinen tankomylynäytteistä oli tankomyllysyötettä ja toinen magneettierottimen rikastetta, jonka jatkojauhatusta tutkittiin. Tutkittavat näytteet sisälsivät osan helposti jauhautuvaa materiaalia ja osan magnetiittia, jonka jauhautuvuus on huomattavasti heikompaa.

Näyte 1

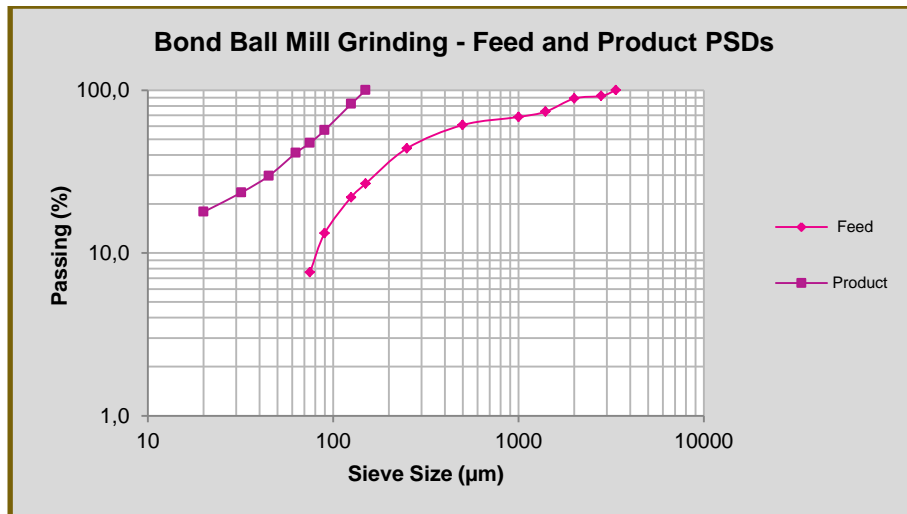
Ensimmäisessä kokeessa käytimme syötettä, jonka F_{80} oli 983 µm ja ominaispaino oli 1 919,6 g/l. Katkaisuseulakooksi valikoitui 500 µm. Ideaaliseksi jauhatusjaksoa kohden tavoiteltavaksi tuotemääräksi (IPP) tuli näin ollen 383,9 g. Valmiin tuotteen prosentuaalinen osuus syötteessä oli 49,76 %, mikä on hyvin korkea. Ensimmäisellä jaksolla myllyä ei pyöritetty ollenkaan, vaan syötteestä seulottiin alle 500 µm:n jae pois ja alite korvattiin lajitumattolla syötenäytteelle alkuperäiseen painoon. Kokeessa suoritettiin 11 jauhatuskierrosta, jolloin saavutettiin kolmen viimeisen kierroksen osalta tasapainotila ja tavoiteltu 250 %:n kiertokuorma. Kierrosta kohden syntyväksi tuotteeksi (Gbp) saatiin 6,429 g/kierros. Tuotteen P_{80} oli 422 µm (kuvio 4) ja Work Index –arvoksi saatiin 15,3 kWh/t, joka vastaa jauhautuvuusominaisuuksiltaan kovaa materiaalia.



Kuvio 4 Näyte 1 Bond-kuulamylykoe Pi 500 µm

Näyte 2

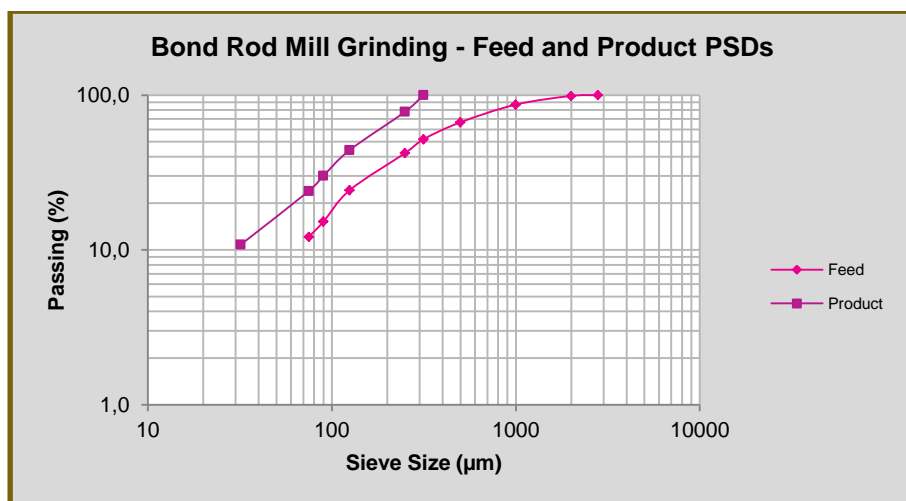
Toisen kuulamylykokeen näytteen ominaispaino oli 2 055,1 g/l. Syötteen F_{80} 1 648 µm ja valmiin tuotteen määrä syötteessä oli 26,70 %. Katkaisuseulan kooksi Pi valittiin 150 µm. Tavoiteltavaksi tuotteen määräksi jaksoa kohden määräytyi 411,0 g. Tasapainotila saavutettiin 9 kierroksen jälkeen. Tuotteen P_{80} oli 122 µm (kuvio 5) ja Work Index –arvoksi saatiin 12,3 kWh/t, joka vastaa jauhautuvuusominaisuuksiltaan keskikovaa materiaalia.



Kuvio 5 Näyte 2 Bond-kuulamylykoe Pi 150 µm

Näyte 3

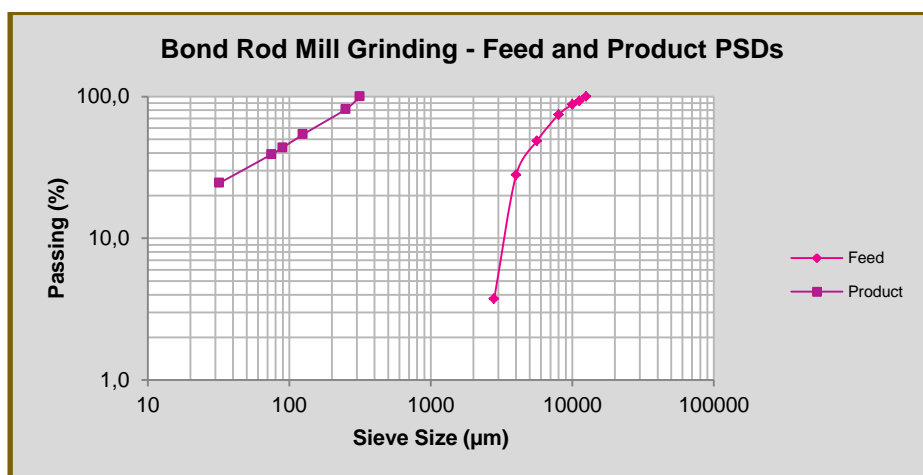
Ensimmäisessä tankomyllykokeessa käytimme materiaalina ominaispainoltaan raskasta magnetiittirikastesta. Syötteen F_{80} oli 883 μm (kuvio 6) ja katkaisuseulakooksi valittiin 315 μm . Syötteen paino oli 4 167 g ja IPP:ksi määräytyi 2 083,5 g. Tasapainotila saavutettiin kahdeksan kierroksen aikana. Kierrosta kohden saatavaksi tuotemääräksi muodostui kolmen viimeisen kierroksen keskiarvon osalta 2,604 g. Work Index -arvoksi saatiin 36,0 kWh/t, joten materiaali voidaan luokitella erittäin huonosti jauhautuvaksi.



Kuvio 6 Näyte 3 Bond-tankomyllykoe Pi 315 μm

Näyte 4

Kokeen näyte oli varsinaista tankomyllysyötettä, joka tulee murskaimelta. Syöteenraekoko oli liian karkea Bond-kokeisiin, joten yli 12,5 mm:n rakeet murskaettiin hienommaksi. Murskatun syötteen F_{80} oli 8 835 μm (kuvio 7) ja katkaisuseulaksi valittiin 315 μm . Kolmen viimeisen jakson kiertokuorman keskiarvoksi tuli 99 % ja kierrosta kohden saatavaksi tuotemääräksi 7,886 g. Work Index -arvoksi tuli 12,7 kWh/t, joten materiaali voidaan määritellä keskikovaksi malmiksi.

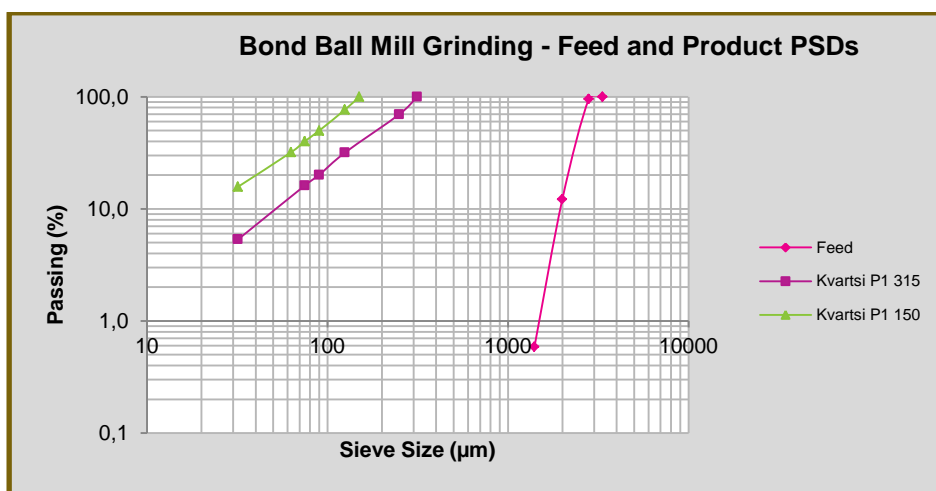


Kuvio 7 Näyte 4 Bond-tankomyllykoe Pi 315 μm

6.3.2 Nilsin kvartsinäyte

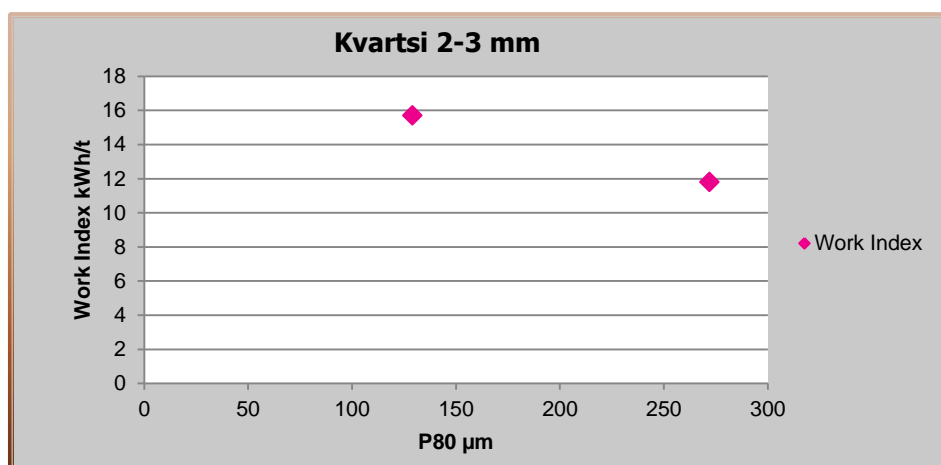
Kvartsinäytteenä käytettiin Nilsin kvartsia, jonka raekoko oli 2-3 mm. Näytteet tilattiin toimittajalta säkkitavarana. Kvartsi valittiin sen tasalaatuisuuden vuoksi ns. tunnetuksi näytteeksi.

Käytimme kahdessa kokeessa samaa näytettä, vain katkaisuseulan koko muuttui. Syötteen F_{80} oli 2 653 μm (kuvio 8). Ensimmäisessä kokeessa katkaisuseulan koko Pi oli 315 μm . Kierrostakohden saatavan tuotteen määräksi saatiin 3,328 g ja Work Index-arvoksi 11,8 kWh/t. Toisessa kokeessa katkaisuseulankoko Pi oli 150 μm . Kierrostakohden saatavaksi tuotteen määräksi tuli 1,550 g ja Wi-arvoksi 15,7 kWh/t.



Kuvio 8 Kvartsinäytteen Bond-kuulamylykoe Pi 315 μm ja Pi 150 μm

Kuviosta 9 voidaan todeta, että Work Index -arvo nousee hienousasteen hienontuessa.

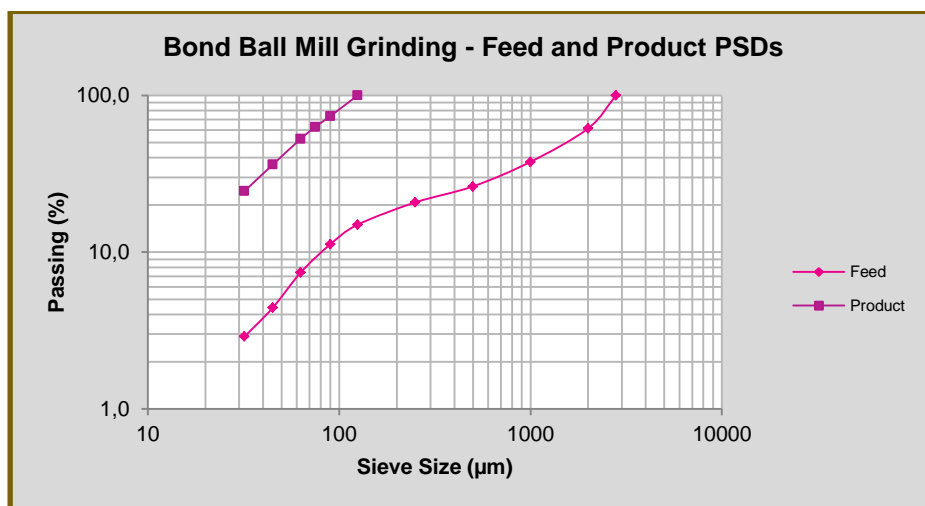


Kuvio 9 Kvartsinäyte Work Index -arvo ja hienousasteen suhde

6.3.3 Pampalon kultamalminäyte

Pampalon kultakaivos sijaitsee Ilomantsissa Hattuvaarassa ns. Karjalan kultalinjalla. Kaivos aloitti toimintansa vuonna 2011 ja sen omistaa Endomines Oy. Kaivoksen kullantuotto vuositasolla on n. 1 000 kg.

Käytimme kokeessa kultamalminäytettä, jonka jauhautuvuus tiedettiin etukäteen suhteellisen helpoksi. Ulkopuolisella toimijalla teetetty Bond-koe antoi Wi-arvoksi 7,42 kWh/t ja GTK :lla tehty Mergan-koe antoi M-Wi-arvoksi 9,9 kWh/t. Work Index -arvoksi saimme 9,6 kWh/t, mikä asettuu kahden edellä mainitun väliin. Tulokseen todennäköisesti vaikuttaa Bond-kokeissa käytetyt hieman erilaiset kuulapopulaatiot, mitkä ovat vaikuttaneet kierrosta kohden syntyvän tuotteen määrään. Malmi voidaan luokitella keskikovaksi.



Kuvio 10 Pampalon kultamalminäyte Bond-kuulamyllykoe Pi 125 µm

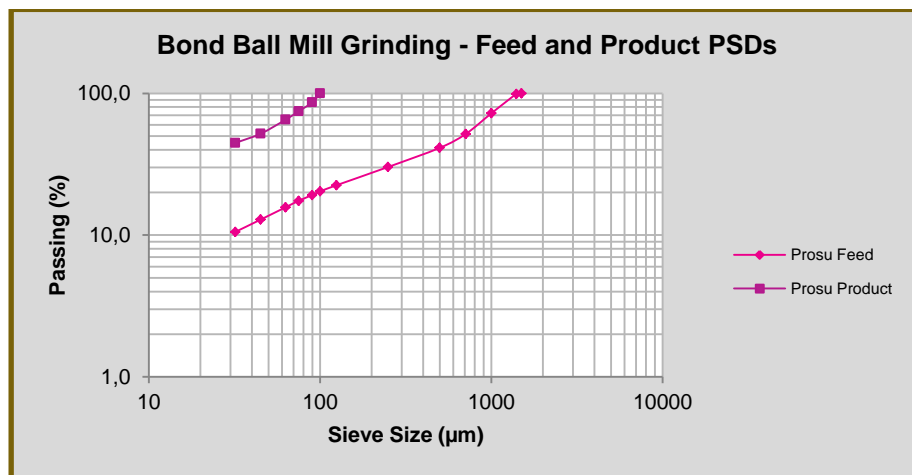
Näytteestä oli tehty vuonna 2008 jauhautuvuuskoe Mergan –menetelmällä, mitä varten näyte oli murskattu alle 4 mm:n raekokoon. Bond kuulajauhatusta varten näyte murskattiin alle 3,35 mm:n raekokoon valssimurkaimella (kuvio 10). Taulukkoon 10 on kerätty samasta malmista saatuja Wi-arvoja.

Taulukko 10 Jauhautuvuuskoetulosten vertailu

	F80 (µm)	P80 (µm)	Wi (kWh/ t)	g / kierr.
Bond ulkopuolinen	2 151	88	7.4	3,141
Bond GTK	2 384	100	9.6	2,484
Mergan	3 097	68	9.9	

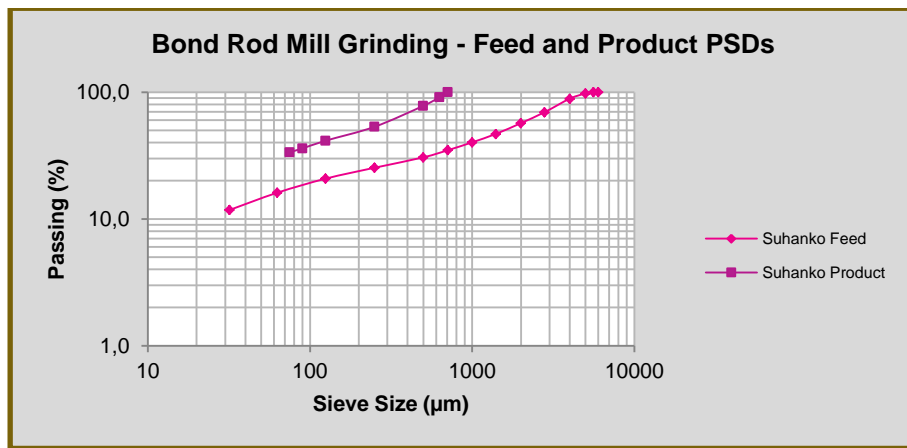
6.3.4 Suhanko

Suhangon kaivos sijaitsee Ranualla ja sen on arvioitu aloittavan toimintansa 2010-luvulla. Kaivoksen on tarkoitus tuottaa platinaryhmän metalleja, lähinnä palladiumia. Kuulamylykokeeseen käytettävä näyte oli murskattu aikaisemmin alle 1,5mm:n raekokoon (kuvio 11) laboratoriokokeita varten. Tämä poikkeaa standardista Bond-koe menettelystä, mutta Bondin (1961) mukaan hienompikin syötenäyte käy tarpeen vaatiessa. Katkaisuseulakooksi valittiin 100 μm , mikä edustaa tavoiteltavaa vaahdotushienoutta. Näytteen paino muodostui 1 363,3g, joten IPP oli 389,5g. Kierrostakohden saatava tuotemäärä oli tasapainotilan saavutettua 1,414 g 250%:n kiertokuormalla. Wi-arvoksi saatiin 15,9 kWh/t, joka vastaa jauhautuvuusominaisuuksiltaan kovaa materiaalia.



Kuvio 11 Suhanko Bond-kuulamylykoe Pi 100 μm

Tankomyllysyötteenä käytettiin -6,7 mm:n raekokoon murskattua näytettä (kuvio 12). Näyte oli samaa malmia kuin kuulamylykokeessakin, mutta karkeampaa. Katkaisuseulankooksi valittiin 710 μm todellisen prosessiraekoon mukaan. Tasapainotila saavutettiin kuudella kierroksella ja kolmen viimeisen kierroksen kierrosta kohden saatavaksi tuotemääräksi saatiin 5,313 g 100 %:n kiertokuormalla. Wi-arvoksi saatiin 19,8 kWh/t, mikä vastaa jauhautuvuusominaisuuksiltaan kovaa materiaalia.

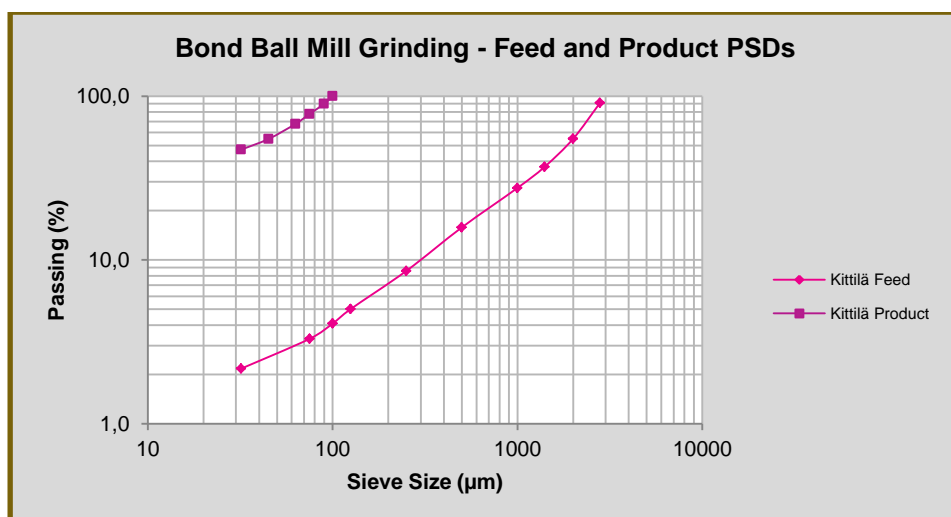


Kuvio 12 Suhanko Bond-tankomyllykoe Pi 710 µm

6.3.5 Kittilän kultamalminäyte

Kittilän kaivos on Agnico-Eagle Finland Oy:n omistama kaivos Suurkuusikon malmiesiintymällä. Kaivos tuotti vuonna 2012 5 000 kg kultaa ja tulevaisuudessa kaivoksen on tarkoitus tuplata vuosittainen kullan saanti. Kaivoksen arvioitu toiminta-aika on näillä näkymin vuoteen 2032.

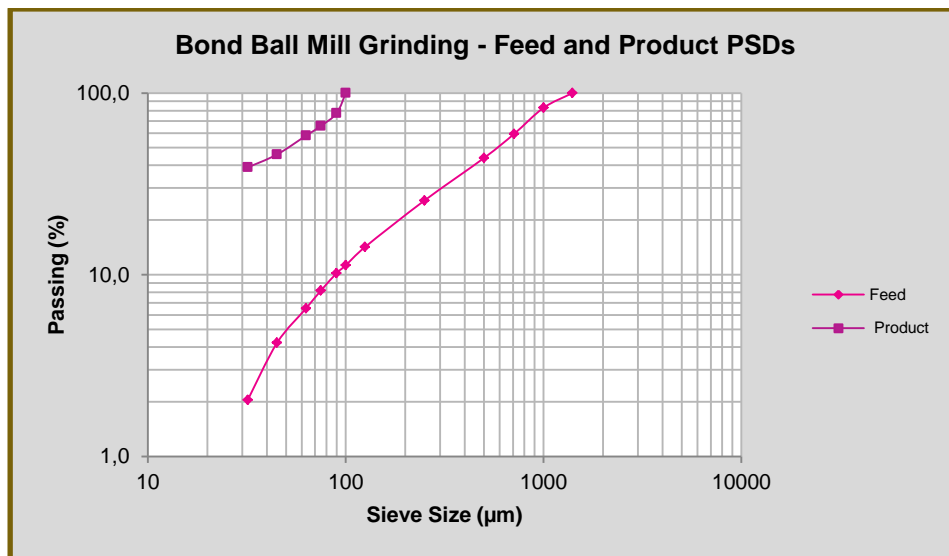
Syötenäytteenä käytettiin kaivoksen SAG-myllyn syötettä, joka oli murskattu alle 3,35 mm:n raekokoon. Tavoiteltu P_{80} oli 75 µm kaivoksen prosessin mukaisesti, joten katkaisuseulan kooksi valittiin 100 µm. Todellisessa prosessissa jauhetulle tuotteelle tehdään hiilen poisto vaahdottamalla, koska hiili haittaa varsinaista rikastusprosessia. Tasapainotila saavutettiin yhdentoista kierroksen aikana ja kierrosta kohden saatavaksi tuotemääräksi G_{bp} saatiin 0,918 g. Tuotteen hienoudeksi P_{80} saatiin 78 µm (kuvio 13). Work Index -arvoksi saatiin 19,5 kWh/t.



Kuvio 13 Kittilä Bond-kuulamylykoe Pi 100 µm

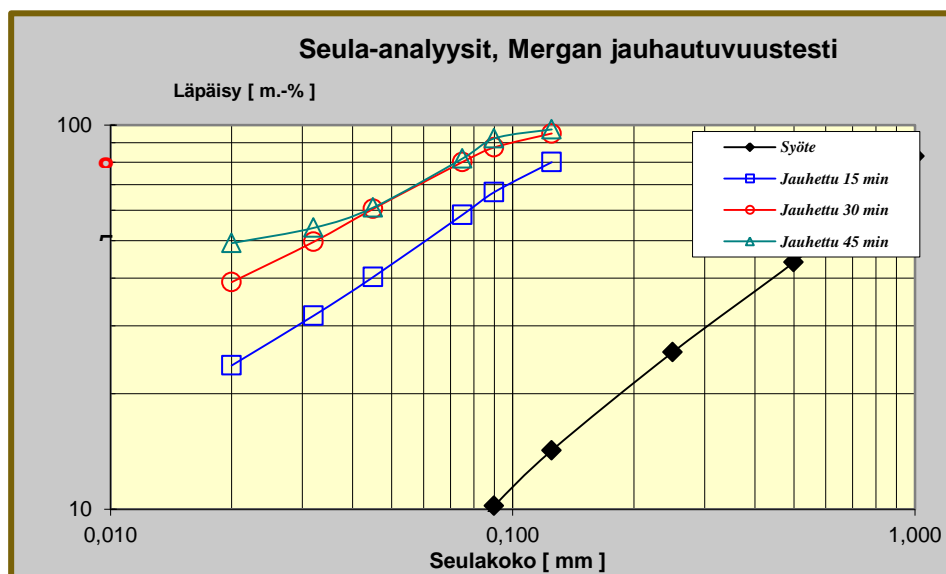
6.3.6 F-näyte

Näyte oli murskattu valssimurskaimella alle 1,5 mm:n raekokoon laboratorioskokeita varten. Näytteestä oli tehty aikaisemmin Mergan-jauhautuvuuskoe. Tavoite hienoudeksi valittiin vaahdotusrikastushienous 75 μm , joten katkaisuseulana käytettiin 100 μm seulaa. Tasapainotila saavutettiin kuuden kierroksen aikana ja tuotetta syntyi kierrosta kohden. Tuotteen loppuhienous oli 91 μm (kuvio 14). Work Index -arvoksi saatiin 11,4 kWh/t. Materiaali voidaan luokitella keskikovaksi



Kuvio 14 F-näyte Bond-kuulamyllykoe Pi 100 μm

Mergan-menetelmällä saatu Work Index -arvo oli 8,66 kWh/t, lopputuotteen hienouden ollessa d_{80} 72,3 μm . Kuvio 15 nähdään raekokojakauman muutos jauhatuksen ajan kasvaessa.



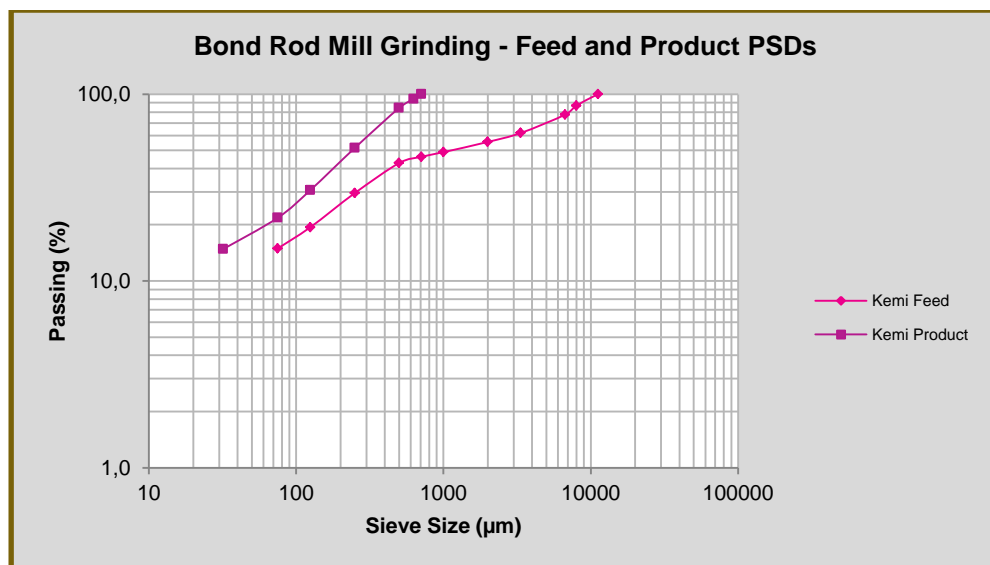
Kuvio 15 F-näyte Mergan-jauhautuvuuskoe, tavoite hienous P_{80} 75 μm

6.3.7 Kemin kromiittimalmi

Kemin kaivos, joka on euroopan ainoa kromikaivos, on perustettu vuonna 1966 ja sen omistaa Outokumpu Chrome. Tällä hetkellä louhintamäärä on 1,3 miljoonaa tonnia vuodessa ja malmivarannot riittävät tuoreimpien tutkimusten mukaan useaksi sadaksi vuodeksi. Kokeessa käytettiin Kemin kaivoksen tankomyllysyötettä. Näytteen d_{80} oli 16 mm, joten näytteestä jouduttiin murskaamaan näytteet tankomyllykoetta ja Abraasion index -koetta varten. Kaivoksella tankomyllyn kanssa sulkeisessa piirissä toimivan Derrick-seulan alitteen raekoko d_{80} on 450 μm .

Bond-koe

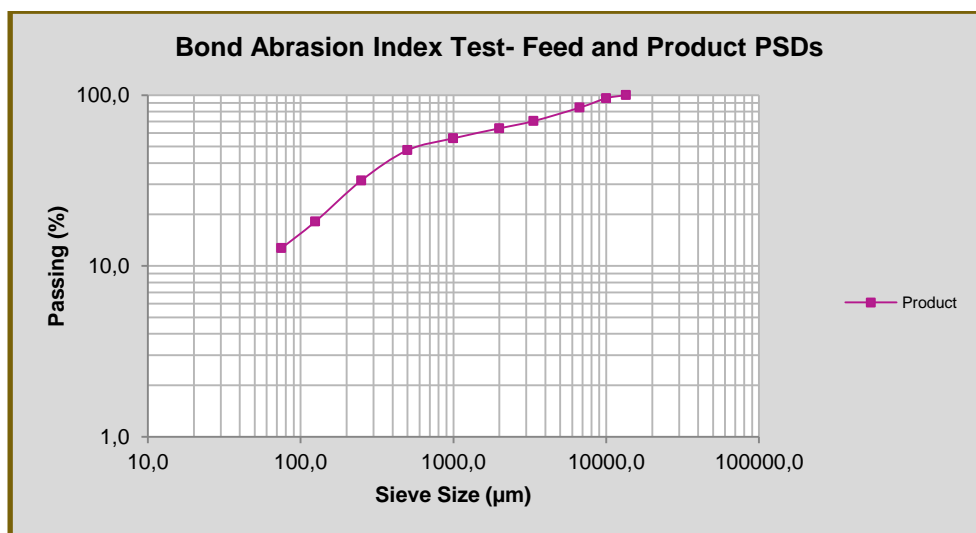
Tasapainotila 100%:n kiertokuormalla saavutettiin kuudella kierroksella ja kierrosta kohden saatavaksi nettotuotemääräksi (G_p) muodostui 14,346 g. Syötteen F_{80} oli 7 026 μm ja tuotteen P_{80} 467 μm (kuvio 16). Katkaisuseulan (Pi) kooksi valittiin 710 μm kaivoksen todellisen jauhatustuotteen hienouden ollessa d_{80} 450 μm . Work Index -arvoksi saatiin 8,3 kWh/t. Materiaali voidaan luokitella pehmeäksi.



Kuvio 16 Kemi Bond-tankomyllykoe Pi 710 μm

Bond Abrasio Index koe

Kemin malmilla tehtiin myös Abrasio Index testi. Syötenäytteestä seulottiin alle 12,5 mm:n näyte pois ja yli 19 mm:n osuus murskattiin valssimurskaimella, niin että näytteen raekokojakauma oli välillä 12,5–19,0 mm. Koetta varten muodostettiin neljä 400 g:n panosta, joita jokaista pyöritettiin rummussa 15 minuuttia. Tämän jälkeen näytteet yhdistettiin ja näytteestä tehtiin seula-analyysi. Ohjeiden mukaan seulasarjan pienimpänä seulana käytetään 75 µm:n seulaa (kuvio 17). Abraasio Index -arvoksi saatiin 0,0566.



Kuvio 17 Kemi Bond Abraasio Index -koe

7 LABORATORIOKOETULOKSET JA TULOSTEN KÄSITTELY

Työssä tutkittiin erityyppisten malmien jauhautuvuusominaisuuksia lähinnä Bondin menetelmällä sekä malmien kuluttavuutta abraasio index testilaitteella. Bond-jauhautuvuuskoe osoittautui yksinkertaiseksi suorittaa. Menetelmässä ei varsinaisesti mitata mitään vaan se perustuu Bondin määrittämään yhtälöön, jonka avulla Work Index määritetään. Yhtälöä varten täytyi kokeellisesti määrittää syötteen ja tuotteen 80%:n läpäisyä vastaavat raekoot, kierrosta kohden saatava tuotteen määrä sekä käytetty katkaisuseulan koko. Kokeita suoritettaessa huomasi kuinka hienonnusasteen käytyä hienommaksi seulonnan laatuun ja tarkkuuteen täytyi kiinnittää entistä enemmän huomiota, mikä osaltaan hidasti työn suoritusta. Seulonnan tehokkuuteen vaikutti myös jauhettavan materiaalin mineralogiset ominaisuudet. Jauhatusjaksoja jatkettiin kunnes tavoiteltu kiertokuorma saavutettiin toistuvasti. Suoritetuissa kokeissa tasapainotila saavutettiin 6–11 kierroksen aikana. Kokeita suoritettaessa jauhatushienoudet pyrittiin samaan samoiksi kuin todellisestikin ovat. Katkaisuseulan koko valittiin halutun P_{80} arvon perusteella siten, että haluttu P_{80} kerrottiin neliöjuuri kahdella ja valittiin sitä lähimpänä oleva seulakoko.

Bondin menetelmään tutustumisvaiheessa havaittiin eri menettelytapoja jauhautuvuuskokeiden suorituksessa, lähinnä jauhipopulaatioitten osalta. Eri lähteissä, toimijoilla ja valmistajilla oli erilaisia mainintoja kuulakokojakauman ja kuulamäärien osalta vaikka Bond-kokeen tulisi olla standardi menetelmä. Kokeissa käytetty kuulapanos ei myöskään edusta Bondin ilmoittamaa kuulapanosta kuulakokojakauman osalta, mutta panoksen kokonaismassa on Bondin ilmoittaman mukainen.

Työssä oli myös tarkoitus vertailla GTK:lla käytössä olevan Niitin Outokumpu-yhtiölle kehittämän Mergan-jauhautuvuuskoemenetelmän tuloksia sekä itse menetelmiä Bondin menetelmään. Suurin ero Bondin menetelmän sekä Mergan-menetelmän välillä on, että Bondin menetelmä on puhtaasti teoreettinen kun taas Mergan-menetelmässä mitataan myllyn vääntömomenttia. Koekäytännöt eroavat myös toisistaan, kun Bond-kokeet suoritetaan suljettua piiriä mallintamalla kuivana ja Mergan-kokeet tehdään panoskokeina sekä kuiva-tai märkäjauhatuksena.

Osasta näytteistä GTK:n yhteistyökumppanit olivat tehneet jauhautuvuuskokeita Bondin menetelmällä ja GTK Mergan-menetelmällä, joiden tuloksia vertasimme itse saamiimme. Pääsääntöisesti saimme hivenen suurempia Wi-arvoja. Tähän johtaneita syitä voidaan olettaa olevan näytteiden laatu sekä Bond-kokeissa käytetyt hivenen erilaiset kuulapopulaatiot. Kokeissa käytetty syötenäyte tulisi olla samasta näytteestä jaettu edustava näyte sekä käytetyt kuulapopulaatiot tulisi olla yhdenmukaiset.

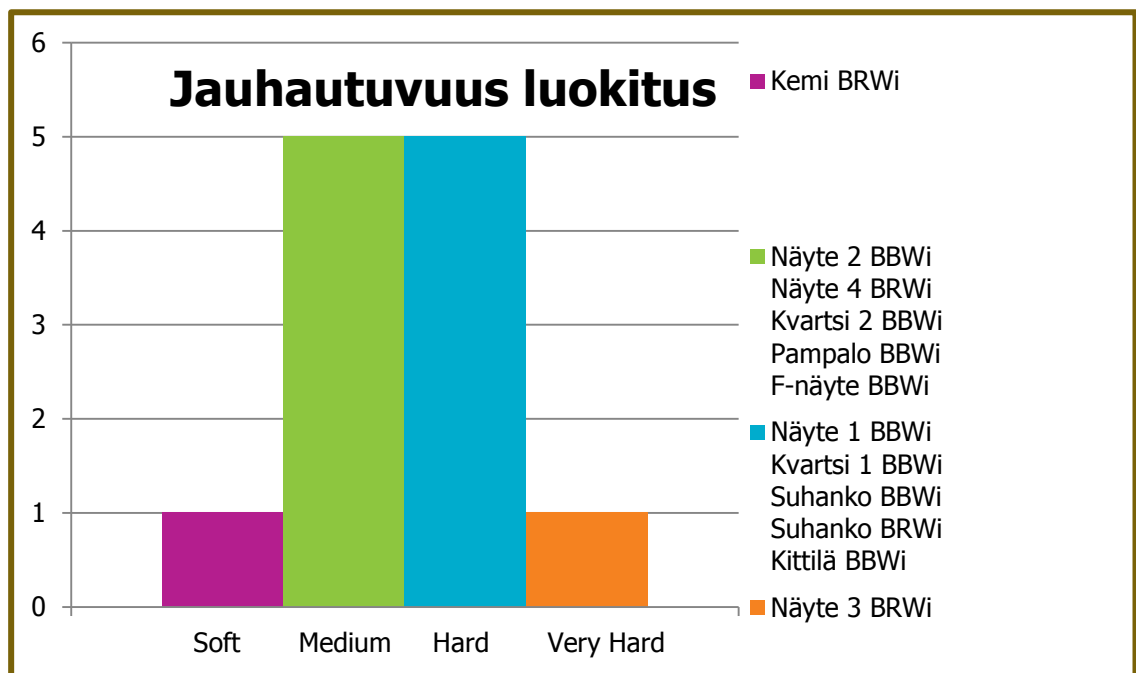
Työn kokeellisessa osuudessa tutkittiin 10 erityyppistä malminäytettä Bond menetelmällä. Suurin osa tutkittavista näytteistä oli syötemalmeja, ainoastaan näyte 3 oli rikastenäyte, jonka jatkojauhatusa tutkittiin. Taulukossa 11 on esitetty kokeista saadut tulokset sekä kokeiden tärkeimmät arvot. Taulukossa oleva BBWi edustaa kuulamylykoetta ja BRWi tankomylykoetta. Wi-arvot asettuivat välille 8,3–36 kWh/t.

Taulukko 11 Bond -jauhautuvuuskokeiden tulokset

Näyte	F ₈₀ (µm)	P ₈₀ (µm)	Pi (µm)	G (g/kierros)	Ominaispaino (g/l)	Wi (kWh/t)
Näyte 1 BBWi	993	422	500	6,429	1919,6	15,3
Näyte 2 BBWi	1648	122	150	2,203	2055,1	12,3
Näyte 3 BRWi	831	256	315	2,604	4167,0	36,0
Näyte 4 BRWi	8835	244	315	4,886	1579,3	12,7
Kvartsi 1 BBWi	2653	129	150	1,550	1525,3	15,7
Kvartsi 2 BBWi	2653	272	315	3,328	1525,3	11,8
Pampalo BBWi	2384	100	125	2,484	1887,0	9,6
Suhanko BBWi	1116	82	100	1,414	1947,6	15,9
Suhanko BRWi	3454	520	710	5,313	2008,8	19,8
Kittilä BBWi	2555	78	100	0,918	1905,9	19,5
F-näyte BBWi	964	91	100	2,421	1996,9	11,4
Kemi BRWi	7026	467	710	14,346	2747,4	8,3

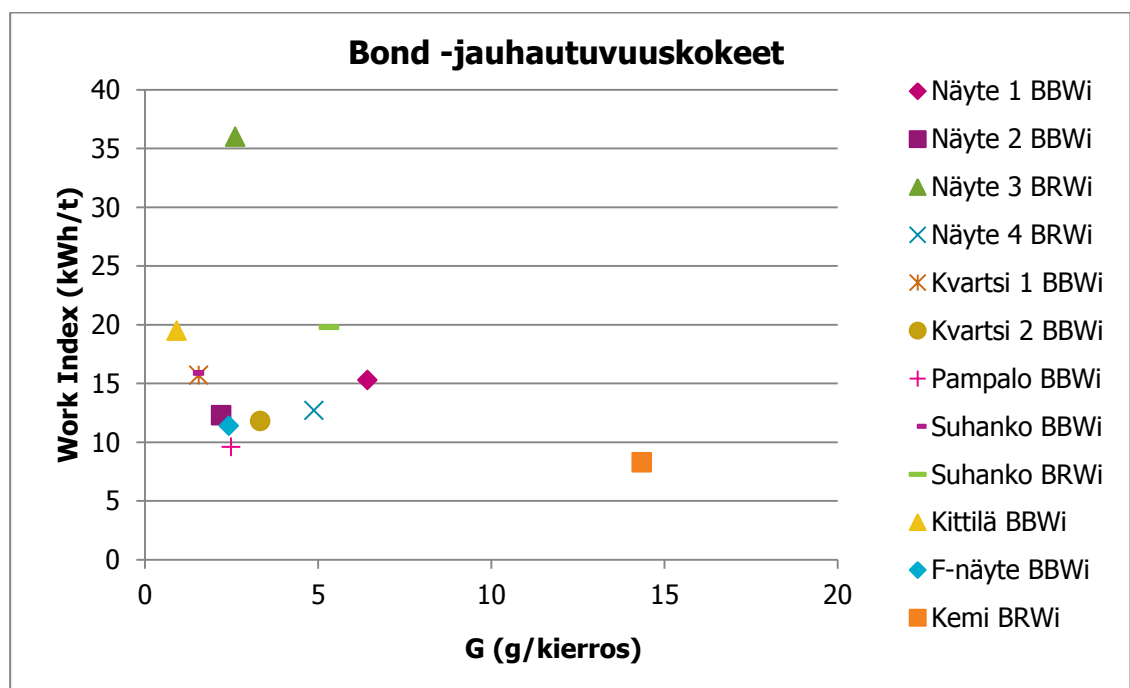
Kysyimme työn ohjaajani kanssa Kemin kaivokselta heidän energiankulutustaan, minkä ilmoittivat olevan kyseisellä hetkellä n. 630–730 kW syötön ollessa 210–230 t/h. RWI-arvoksi arvioivat 8–10 kWh/t ja ominaisenergiankulutuksen 4,65–4,95 kWh/t. Saatu Work Index -arvo 8,3 kWh/t täsmää heidän ilmoittamiin arvoihin.

Kuviossa 18 on esitelty JKTechin menetelmän mukaan tutkitut näytteet niiden jauhautuvuuskovuuden mukaan. Kuvioista voidaan havaita, että kvartsi asettuu kahteen kovuusluokkaan, keskikovaan ja kovaan. Tulokseen vaikuttaa näytteillä olleet eri jauhatushienoudet. Jauhettaessa hienommaksi mineraalin sisäiset rakenteet ja ominaisuudet heikentävät jauhautuvuustehokkuutta. Taulukosta 11 nähdään, että suuremman Wi-arvon saaneella kvartsinäytteellä P₈₀ oli 129 µm ja matalamman saaneella P₈₀ oli 272 µm Wi-arvojen ollessa 15,7 kWh/t ja 11,8 kWh/t.



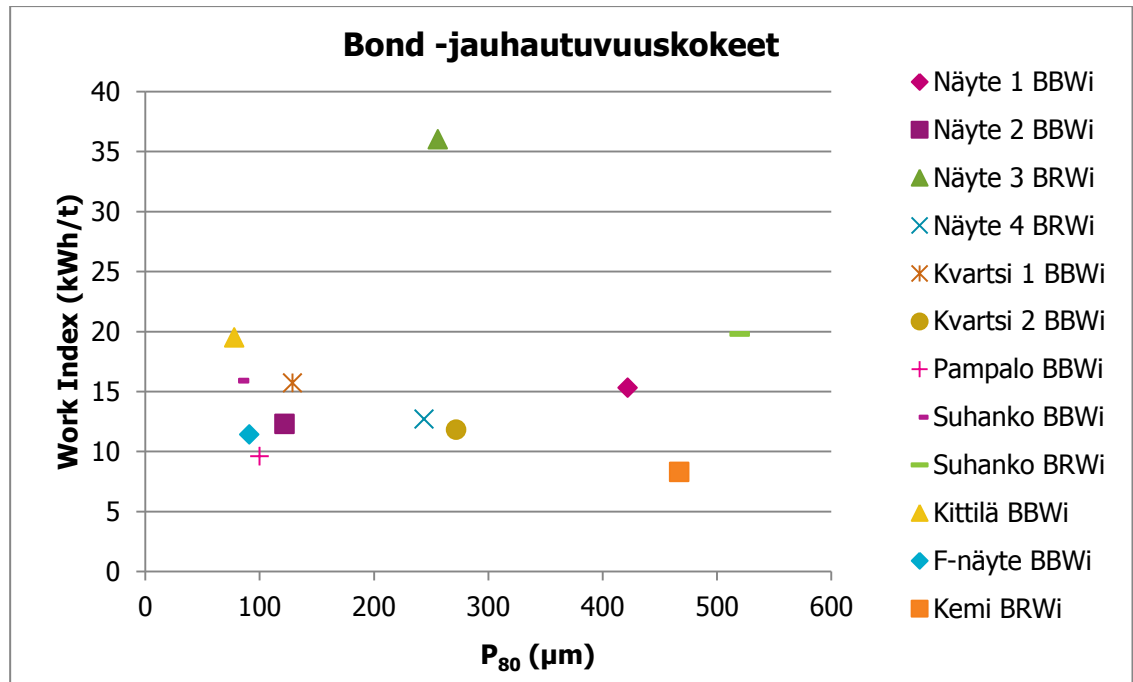
Kuvio 18 Näytteiden jauhautuvuusluokitus JKTechin menetelmän mukaan

Varsinainen jauhautuvuus (G) ilmoitetaan syntyvänä tuotemääränä grammaa kierrosta kohden, jotka on esitetty kuviossa 19.



Kuvio 19 Materiaalin jauhautuvuus grammoina kierrosta kohden

Kuviossa 20 on esitetty kunkin näytteen kokeissa saavutettu tuotteen hienousaste sekä näytteelle saatu Work Index -arvo.



Kuvio 20 Saavutettu tuotteen hienousaste P_{80} ja Work Index -arvo

8 TARKASTELUA

Opinnäytetyön tavoitteena oli suorittaa käyttöönotto Bond–jauhautuvuuden määrittymenetelmille sekä Bond Abrasio Index -määrittymenetelmälle. Työ aloitettiin tutustumalla tutkimuskirjallisuuteen ja laatimalla katsaus, jossa tarkastellaan jauhatusta ja Bond-menetelmiä. Katsaus sisältää menetelmän kuvauksen Bond- ja Mergan-menetelmille sekä kokeiden suorittamiseen tarvittavat tiedot. Suomenkielistä kirjallisuutta löytyi jauhautuksesta kahden entisen teknillisen yliopiston professoreiden Hukin ja Lukkarisen kirjoittamista kirjoista sekä ulkomaalaisista teoksista. Bond-kokeisiin liittyvä aineisto oli yhtä diplomityötä lukuunottamatta englanninkielistä.

Kokeellinen osuus aloitettiin kun laitteistot ja jauhinvälineistö oli määritelty sekä tarkastettu. Kokeista saatujen tuloksien oikeellisuutta vertailtiin aikaisempiin samoista malminäytteistä tehtyihin kokeisiin, sekä kaivoksilta saamiin tietoihin. Tulosten pohjalta voidaan todeta, että käyttöönotetut menetelmät ovat luotettavia. Työn tavoitteet saavutettiin kokonaisuudessaan hyvin. GTK voi tulevaisuudessa tarjota Mergan-kokeiden lisäksi Bond-jauhautuvuudenmäärittäjiä asiakkailleen sekä hyödyntää menetelmiä omissa malmien prosessointitutkimuksissa.

Itselleni opinnäytetyön tekeminen tarjosi tilaisuuden syventyä materiaalien hienonnustekniikoihin sekä niihin liittyviin teorioihin. Työn teoriaosuudesta muodostui pitkä, koska jauhatusta ja siihen liittyvät teoriat vaativat selventämistä, jotta lukija, joka ei ole jauhatukseen perehtynyt, voi ymmärtää kokeissa käytettyjä ilmaisuja sekä tekniikoita. Työn suorittamiseen sain asiantuntija-apua työnohjaajalta erikoistutkija Pekka Mörskyltä sekä muulta GTK:n henkilökunnalta.

LÄHTEET

- Aaltonen, R., Alapassi, M., Karhula, M., Karhunen, E., Korhonen, I., Loukola-Ruskeeniemi, K., Nybergh, P., Peltonen, P. & Uusisuo, M. 2012. Suomen kaivosteollisuuden tilannekatsaus vuonna 2012. Työ- ja elinkeinoministeriö. Elinkeino- ja innovaatio-osasto.[verkkodokumentti]. [viitattu 1.4.2013]. Saatavissa: https://www.tem.fi/files/34066/TEMrp_23_2012.pdf.
- Austin, L. klimpel, R. & Luckie, P. 1984. Process engineering of size reduction: Ball Milling. New Jersey: Guinn printing Inc.
- Bond, F. 1961. Crushing and grinding calculations. Milwaukee: Allis-Chalmers industrial.
- Herbs, J., Grandy, G. & Fuerstenau, D. 1973. Comparison of work indices calculated from operating data with those from laboratory test data. Tenth international mineral processing congress. London:IMM.
- Hukki, R. 1964. Mineraalien hienonnus ja rikastus. Keuruu: Otava.
- JKTech www-sivu [viitattu 2.2.2013]. Saatavissa: <http://www.jktech.com>.
- Kauppila, P. Räisänen M-J. & Myllyoja, S. 2011. Metallimalmikaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt. Suomen ympäristö 29/2011. Helsinki: Edita prima Oy.
- Kurki, P. 2006. Jauhautuvuuden määrittäminen panos-jauhatuskokeilla: Helsingin Teknillinen korkeakoulu. Materiaalitekniikka. Diplomityö
- Liimatainen, A. 2012. Dispergointiaineet märkäjauhatuksessa: Jyväskylän yliopisto. Pro gradu / erikoistyö
- Lukkarinen, T. 1985. Mineraali tekniikka, osa 1, hienonnus. 2. painos. Helsinki: Insinööritieto Oy.
- Lameck, N. 2005. Effects Of grinding media shapes on ball mill performance. [verkkodokumentti]. [viitattu 26.1.2013]. Saatavissa: <http://wiredspace.wits.ac.za>.
- Mosher, J., & Tague, C. 2001. Conduct and precision of Bond grindability testing. USA: Elsevier science Ltd.
- Mörsky, Pekka. 2012. Opintomonisteet. GTK.
- Niitti, T. 1970. Rapid evaluation of grindability by a simple batch test. Paper in the 9th IMPC proceedings: Outokumpu Oy.

Outokumpu., Science of comminution. [Verkkojulkaisu].[viitattu 2.2.2013]. Saatavissa: <http://www.google.fi>.

Pihkala, J. 2011. Prosessitekniikka. Prosessiteollisuuden yksikkö- ja tuotantoprosessit. 1. Pianos: Opetushallitus.

Schlan, J. 1987. Grinding: An overview of operation and design. [Verkkodokumentti]. [viitattu 26.2.2013]. Saatavissa: http://mrl.ies.ncsu.edu/reports/87-31-P_Grinding_Operations_Design.pdf.

Suomen mineraalistrategian www-sivu [viitattu 13.3.2013]. Saatavissa: <http://www.mineraalistrategia.fi>.

Turunen, M. Mineraalit. [verkkosivu]. [viitattu 30.3.2013]. Saatavissa: <http://www.geologia.fi/>.

Wang, Y. & Forssberg, E. 2007. Enhancement of energy for mechanical production of fine and ultra-fine particles in comminution. Volume 5. Issue 3: China particuology.

Weiss.N. 1985. SME Mineral processing handbook. United states: Kingsport press.

Will's, B. & Napier-Munn.T. 2006, Mineral Processing Technology. Seventh edition. Great Britain: Elsevier Ltd.



Mineral Processing

BOND BALL MILL GRINDABILITY TEST [D * L = 305 mm * 305 mm]

Client :

Done by : AMK

Purpose :

Bond Ball Mill Test

Project code :

Grinding media : 20.13 kg (steel balls)

Sample :

Media sizes (dia.) : 12,75...37,8 mm

Test No. :

1

P1 :

500 μm

Date :

24.1.2013

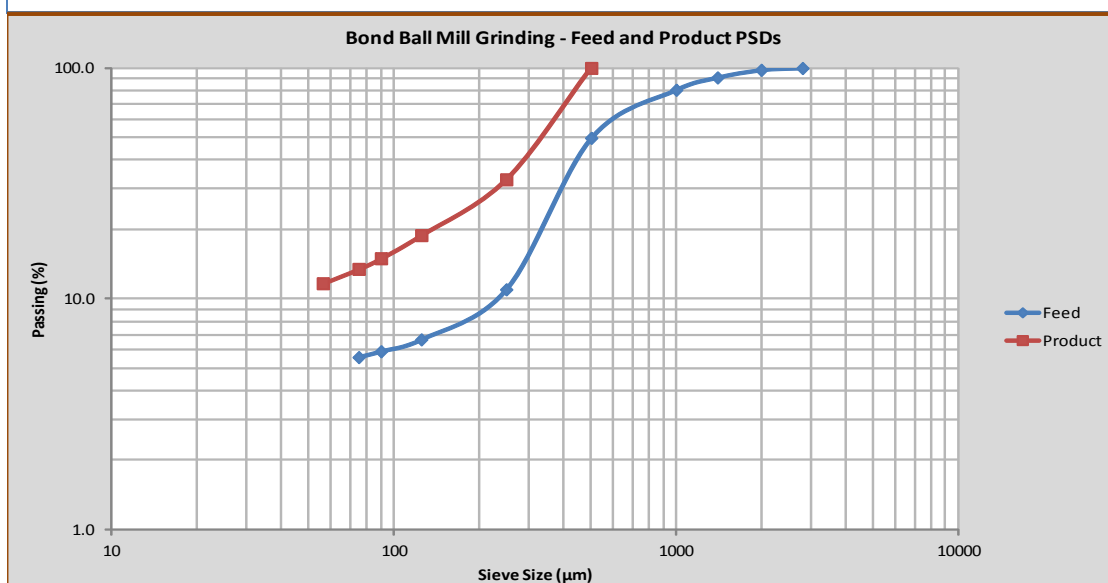
Bulk density :

1919.6 g/dm³

Period	Revs. of Mill	Feed g	New Feed g	Screen O/S g	Screen U/S g	Net U/S/r g	Net Screen U/S g	Circ. Load %	Wt. of Fresh Feed Added to Next Cycle, g	Wt. of U/Size in Feed to Next Cycle g
1	0	1343.7	1343.7	737.4	606.3			121.6	606.3	301.7
2	100	1343.7	606.3	472.8	866.2	564.5	5.645	54.6	866.2	431.0
3	10	1343.7	866.2	873.7	470.0	39.0	3.900	185.9	470.0	233.9
4	25	1343.7	470.0	924.8	417.7	183.8	7.353	221.4	417.7	207.8
5	24	1343.7	417.7	963.8	376.7	168.9	7.036	255.9	376.7	187.4
6	27	1343.7	376.7	966.8	374.1	186.7	6.913	258.4	374.1	186.2
7	28	1343.7	374.1	967.3	373.4	187.2	6.687	259.1	373.4	185.8
8	32	1343.7	373.4	947.3	393.0	207.2	6.475	241.0	393.0	195.6
9	29	1343.7	393.0	956.0	383.7	188.1	6.488	249.2	383.7	190.9
10	30	1343.7	383.7	955.2	378.2	187.3	6.242	252.6	378.2	188.2
11	30	1343.7	378.2	958.0	384.9	196.7	6.557	248.9	384.9	191.5

Product in the feed 49.76 %
 Bulk Density 1919.6 g/dm³
 Ideal Potential Product 383.9 g
 Average equilibrium load 250 %
 Average product 6.429 g/rev
 80 % passing feed size 993 μm
 80 % passing product size 426 μm

Bond Ball Mill Work Index (kWh/t dry) 15.3





Mineral Processing

BOND BALL MILL GRINDABILITY TEST [D * L = 305 mm * 305 mm]

Client :

Done by : AMK

Purpose :

Bond Ball Mill Test

Project code :

Grinding media : 20.13 kg (steel balls)

Sample :

Media sizes (dia.) : 12,75...37,8 mm

Test No. :

2

P1 :

150

 μm

Date :

29.1.2013

Bulk density :

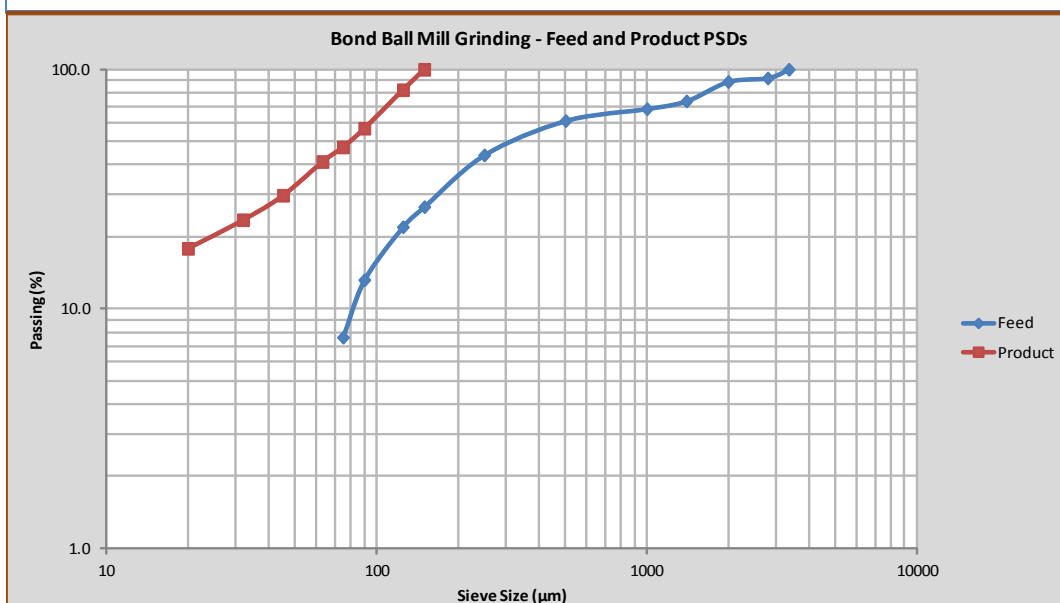
2055.1

g/dm³

Period	Revs. of Mill	Feed g	New Feed g	Screen O/S g	Screen U/S g	Net U/S/r g	Net Screen U/S g	Circ. Load %	Wt. of Fresh Feed Added to Next Cycle, g	Wt. of U/Size in Feed to Next Cycle g
1	50	1438.6	1438.6	960.7	470.8	86.6	1.733	204.1	470.8	125.7
2	30	1438.6	470.8	1210.0	225.3	99.6	3.320	537.1	225.3	60.2
3	90	1438.6	225.3	1084.0	350.0	289.8	3.220	309.7	350.0	93.5
4	98	1438.6	350.0	1108.0	327.8	234.4	2.391	338.0	327.8	87.5
5	135	1438.6	327.8	1024.0	411.4	323.9	2.399	248.9	411.4	109.8
6	126	1438.6	411.4	1039.6	396.0	286.2	2.271	262.5	396.0	105.7
7	134	1438.6	396.0	1031.6	401.4	295.7	2.206	257.0	401.4	107.2
8	138	1438.6	401.4	1021.3	413.7	306.5	2.221	246.9	413.7	110.5
9	135	1438.6	413.7	1026.6	405.1	294.6	2.183	253.4	405.1	108.2

Product in the feed 26.70 %
 Bulk Density 2055.1 g/dm³
 Ideal Potential Product 411.0 g
 Average equilibrium load 252 %
 Average product 2.203 g/rev
 80 % passing feed size 1648 μm
 80 % passing product size 122 μm

Bond Ball Mill Work Index (kWh/t dry) 12.3





Mineral Processing

BOND ROD MILL GRINDABILITY TEST [D * L = 305 mm * 610 mm]

Client :

Done by : AMK

Purpose :

Bond Rod Mill Test

Project code :

Grinding media :

33,380

kg (steel rods)

Sample :

Media sizes (dia.) :

32...45

mm

Test No. :

3

P1 :

315

µm

Date :

12.2.2013

Bulk density :

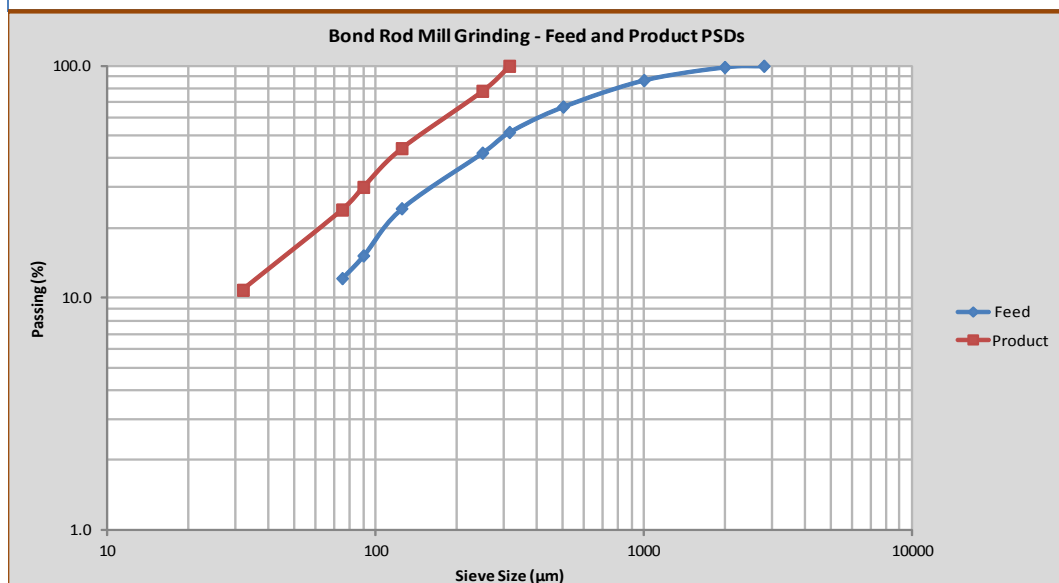
3333.6

g/dm³

Period	Revs. of Mill	Feed	New Feed	Screen O/S	Screen U/S	Net U/S/r	Net Screen U/S	Circ. Load	Wt. of Fresh Feed Added to Next Cycle, g	Wt. of U/Size in Feed to Next Cycle g
		g	g	g	g	g	g	%		g
1	0	4167.0	4167.0	1920.0	2247.0			85.4	2247.0	1163.9
2	50	4167.0	2247.0	2712.0	1446.8	282.9	5.657	187.4	1446.8	749.4
3	200	4167.0	1446.8	2674.7	1492.5	743.1	3.715	179.2	1492.5	773.1
4	353	4167.0	1492.5	2369.6	1791.3	1018.2	2.884	132.3	1791.3	927.9
5	400	4167.0	1791.3	2200.0	1963.8	1035.9	2.590	112.0	1963.8	1017.2
6	412	4167.0	1963.8	2088.6	2072.0	1054.7	2.560	100.8	2072.0	1073.3
7	395	4167.0	2072.0	2040.9	2124.0	1050.7	2.660	96.1	2124.0	1100.2
8	370	4167.0	2124.0	2102.8	2059.6	959.4	2.593	102.1	2059.6	1066.9

Product in the feed	51.80 %
Bulk Density	3333.6 g/dm ³
Ideal Potential Product	2083.5 g
Average equilibrium load	100 %
Average product	2.604 g/rev
80 % passing feed size	831 µm
80 % passing product size	256 µm

Bond Rod Mill Work Index (kWh/t dry)	36.0
--------------------------------------	------





Mineral Processing

BOND ROD MILL GRINDABILITY TEST [D * L = 305 mm * 610 mm]

Client :

Done by : AMK

Purpose :

Bond Rod Mill Test

Project code :

Grinding media : 33,380 kg (steel rods)

Sample :

Media sizes (dia.) : 32...45 mm

Test No. :

4

P1 :

315

 μm

Date :

12.2.2013

Bulk density :

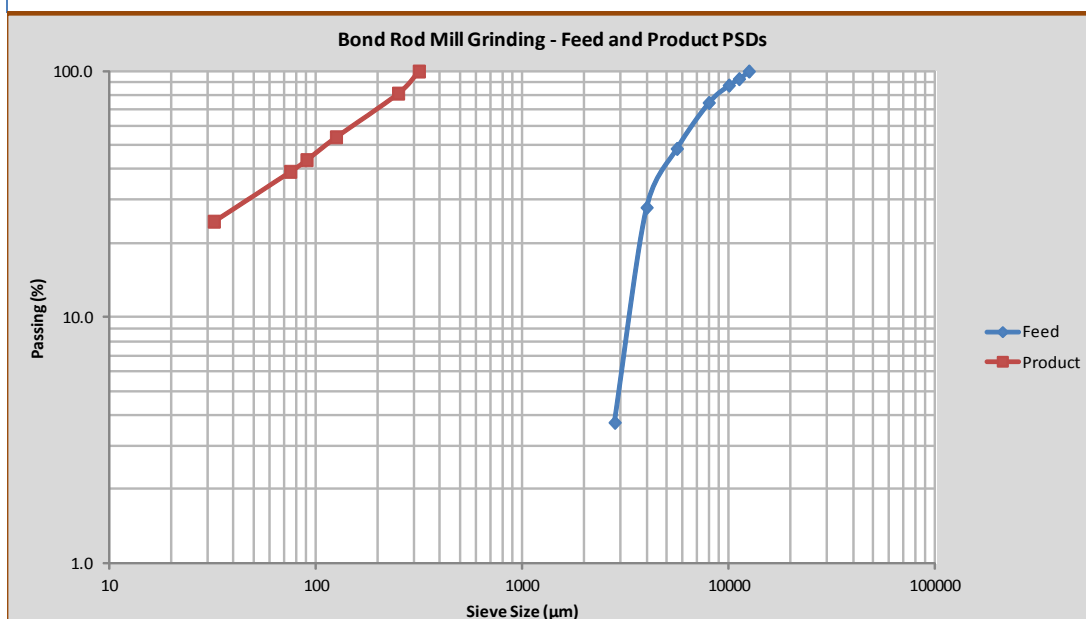
1579.3

g/dm³

Period	Revs. of Mill	Feed g	New Feed g	Screen O/S g	Screen U/S g	Net U/S/r g	Net Screen U/S g	Circ. Load %	Wt. of Fresh Feed Added to Next Cycle, g	Wt. of U/Size in Feed to Next Cycle g
1	200	1974.1	1974.1	933.5	1023.6	1023.5	5.118	91.2	1023.6	0.0
2	180	1974.1	1023.6	1084.3	883.8	883.8	4.910	122.7	883.8	0.0
3	201	1974.1	883.8	1041.1	927.2	927.2	4.613	112.3	927.2	0.0
4	214	1974.1	927.2	1020.8	946.4	946.4	4.422	107.9	946.4	0.0
5	223	1974.1	946.4	903.6	1062.6	1062.6	4.765	85.0	1062.6	0.0
6	203	1974.1	1062.6	975.8	989.3	989.3	4.873	98.6	989.3	0.0
7	203	1974.1	989.3	978.8	990.8	990.8	4.881	98.8	990.8	0.0
8	201	1974.1	990.8	983.4	985.7	985.7	4.904	99.8	985.7	0.0

Product in the feed 0.00 %
 Bulk Density 1579.3 g/dm³
 Ideal Potential Product 987.1 g
 Average equilibrium load 99 %
 Average product 4.886 g/rev
 80 % passing feed size 8835 μm
 80 % passing product size 244 μm

Bond Rod Mill Work Index (kWh/t dry) 12.7





Mineral Processing

BOND BALL MILL GRINDABILITY TEST [D * L = 305 mm * 305 mm]

Client :

Done by : AMK

Purpose :

Bond Ball Mill Test

Project code :

Grinding media : 20.13 kg (steel balls)

Sample : Kvartsi 2-3 mm

Media sizes (dia.) : 12,75...37,8 mm

Test No. : 5

P1 : 150 μm

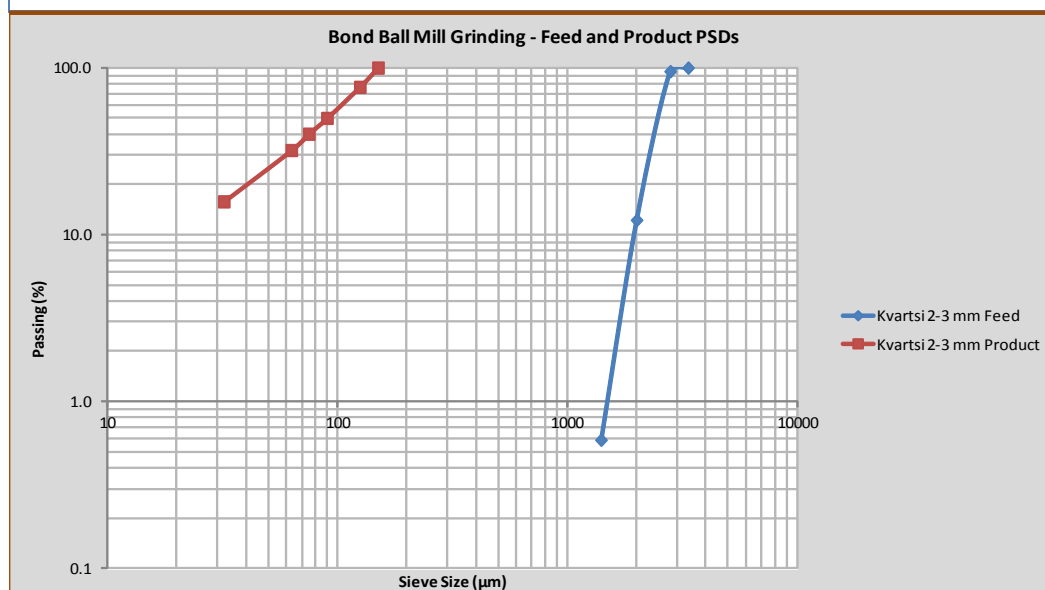
Date : 15.2.2013

Bulk density : 1525.3 g/dm³

Period	Revs. of Mill	Feed g	New Feed g	Screen O/S g	Screen U/S g	Net U/S/r g	Net Screen U/S g	Circ. Load %	Wt. of Fresh Feed Added to Next Cycle, g	Wt. of U/Size in Feed to Next Cycle g
1	150	1067.7	1067.7	858.6	201.3	209.1	1.394	410.6	209.1	0.0
2	219	1067.7	201.3	762.1	295.8	305.6	1.395	249.4	305.6	0.0
3	219	1067.7	295.8	744.9	312.3	322.8	1.474	230.8	322.8	0.0
4	207	1067.7	312.3	751.8	306.2	315.9	1.526	238.0	315.9	0.0
5	200	1067.7	306.2	757.0	304.6	310.8	1.554	243.6	310.8	0.0
6	196	1067.7	304.6	764.2	295.5	303.5	1.549	251.8	303.5	0.0
7	197	1067.7	295.5	761.9	199.0	305.8	1.552	249.1	305.8	0.0
8										
9										
10										
11										

Product in the feed	0.00 %
Bulk Density	1525.3 g/dm ³
Ideal Potential Product	305.1 g
Average equilibrium load	250 %
Average product	1.550 g/rev
80 % passing feed size	2653 μm
80 % passing product size	129 μm

Bond Ball Mill Work Index (kWh/t dry) 15.7





Mineral Processing

BOND BALL MILL GRINDABILITY TEST [D * L = 305 mm * 305 mm]

Client :

Done by : AMK

Purpose :

Bond Ball Mill Test

Project code :

Grinding media : 20.13 kg (steel balls)

Sample : Kvartsi 2-3 mm

Media sizes (dia.) : 12,75...37,8 mm

Test No. :

1

P1 :

315

 μm

Date :

15.2.2013

Bulk density :

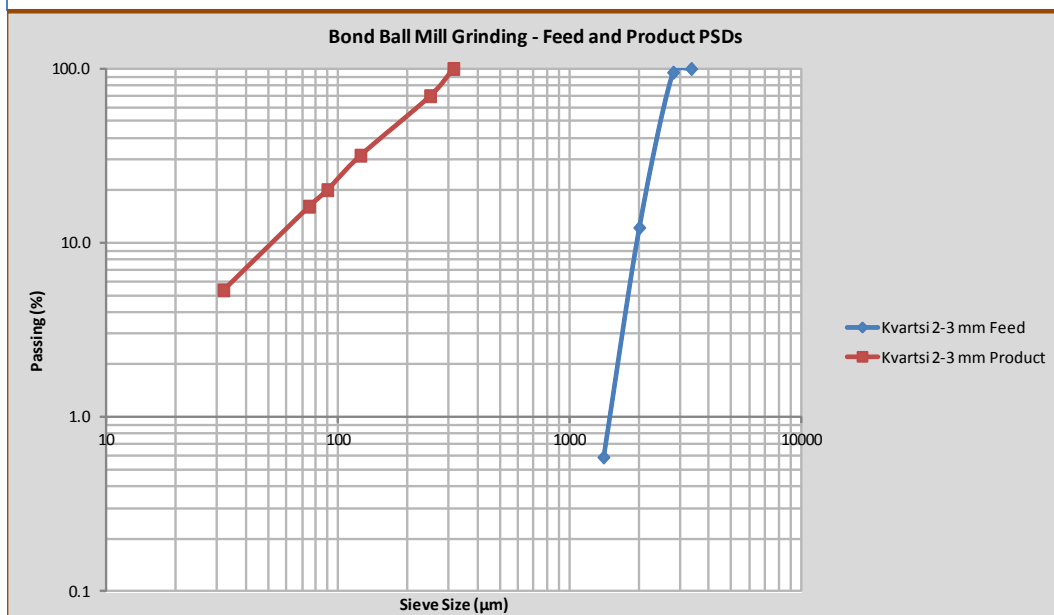
1525.3

g/dm³

Period	Revs. of Mill	Feed	New Feed	Screen O/S	Screen U/S	Net U/S/r	Net Screen U/S	Circ. Load	Wt. of Fresh Feed Added to Next Cycle, g	Wt. of U/Size in Feed to Next Cycle g
		g	g	g	g	g	g	%		
1	95	1067.7	1067.7	780.2	276.4	287.5	3.026	271.4	287.5	0.0
2	101	1067.7	276.4	752.5	307.6	315.2	3.121	238.7	315.2	0.0
3	98	1067.7	307.6	756.6	304.5	311.1	3.174	243.2	311.1	0.0
4	95	1067.7	304.5	761.2	300.9	306.5	3.226	248.4	306.5	0.0
5	95	1067.7	300.9	756.6	304.7	311.1	3.275	243.2	311.1	0.0
6	93	1067.7	304.7	759.5	301.6	308.2	3.314	246.4	308.2	0.0
7	91	1067.7	301.6	765.1	297.2	302.6	3.325	252.8	302.6	0.0
8	92	1067.7	297.2	760.0	300.8	307.7	3.345	247.0	307.7	0.0

Product in the feed	0.00 %
Bulk Density	1525.3 g/dm ³
Ideal Potential Product	305.1 g
Average equilibrium load	249 %
Average product	3.328 g/rev
80 % passing feed size	2653 μm
80 % passing product size	272 μm

Bond Ball Mill Work Index (kWh/t dry)	11.8
---------------------------------------	------





Mineral Processing

BOND BALL MILL GRINDABILITY TEST [D * L = 305 mm * 305 mm]

Client :

Done by : AMK

Purpose :

Bond Ball Mill Test

Project code :

Grinding media :

20.13 kg (steel balls)

Sample :

Pampalo

Media sizes (dia.) :

12,75...37,8 mm

Test No. :

7

P1 :

125 μm

Date :

25.2.2013

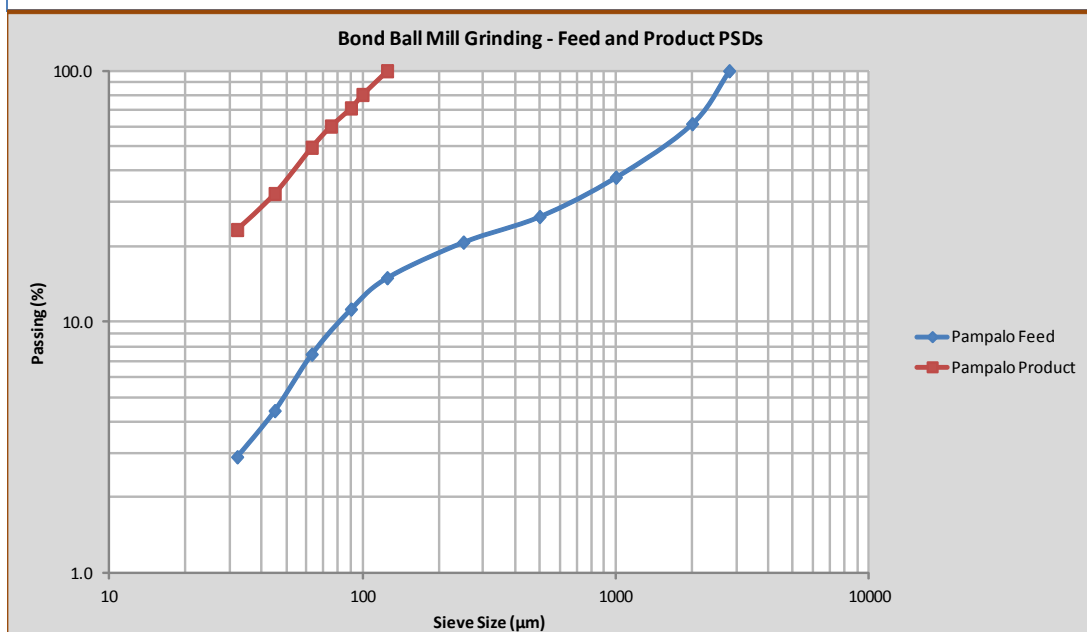
Bulk density :

1887.0 g/dm³

Period	Revs. of Mill	Feed	New Feed	Screen O/S	Screen U/S	Net U/S/r	Net Screen U/S	Circ. Load	Wt. of Fresh Feed Added to Next Cycle, g	Wt. of U/Size in Feed to Next Cycle g
		g	g	g	g	g	g	%		
1	90	1320.9	1320.9	932.7	381.0	190.1	2.112	240.3	388.2	58.2
2	80	1320.9	275.8	1045.1	270.6	234.4	2.930	378.9	275.8	41.4
3	120	1320.9	337.9	983.0	328.9	287.2	2.393	290.9	337.9	50.7
4	132	1320.9	370.5	950.4	365.4	314.9	2.386	256.5	370.5	55.6
5	133	1320.9	388.4	932.5	382.3	330.1	2.482	240.1	388.4	58.3
6	128	1320.9	373.5	947.4	367.6	317.5	2.480	253.7	373.5	56.0
7	130	1320.9	380.4	940.5	374.1	323.3	2.487	247.2	380.4	57.1

Product in the feed	15.00 %
Bulk Density	1887.0 g/dm ³
Ideal Potential Product	377.4 g
Average equilibrium load	250 %
Average product	2.484 g/rev
80 % passing feed size	2384 μm
80 % passing product size	100 μm

Bond Ball Mill Work Index (kWh/t dry)	9.6
---------------------------------------	-----





Mineral Processing

BOND BALL MILL GRINDABILITY TEST [D * L = 305 mm * 305 mm]

Client :

Done by : AMK

Purpose :

Bond Ball Mill Test

Project code :

Grinding media : 20.13 kg (steel balls)

Sample :

Suhanko

Media sizes (dia.) : 12,75...37,8 mm

Test No. :

1

P1 : 100 μm

Date :

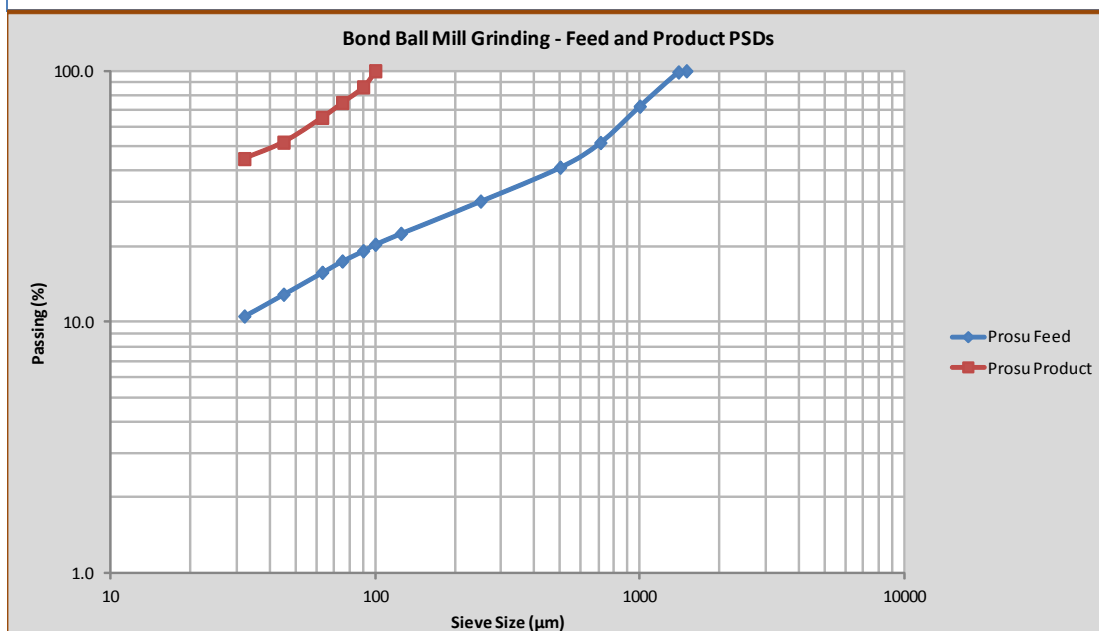
1.3.2013

Bulk density : 1947.6 g/dm³

Period	Revs. of Mill	Feed g	New Feed g	Screen O/S g	Screen U/S g	Net U/S/r g	Net Screen U/S g	Circ. Load %	Wt. of Fresh Feed Added to Next Cycle, g	Wt. of U/Size in Feed to Next Cycle g
1	150	1363.3	1363.3	895.8	460.6	189.4	1.263	191.6	467.5	95.4
2	94	1363.3	249.1	1114.2	243.9	198.3	2.109	447.3	249.1	50.8
3	190	1363.3	335.5	1027.8	330.1	267.1	1.406	306.3	335.5	68.4
4	214	1363.3	379.2	984.1	369.1	301.8	1.410	259.5	379.2	77.4
5	217	1363.3	386.3	977.0	379.0	307.5	1.417	252.9	386.3	78.8
6	219	1363.3	389.7	973.6	385.5	310.2	1.416	249.8	389.7	79.5
7	218	1363.3	385.7	977.6	381.8	307.0	1.408	253.5	385.7	78.7

Product in the feed	20.40 %
Bulk Density	1947.6 g/dm ³
Ideal Potential Product	389.5 g
Average equilibrium load	252 %
Average product	1.414 g/rev
80 % passing feed size	1116 μm
80 % passing product size	82 μm

Bond Ball Mill Work Index (kWh/t dry) 15.9





Mineral Processing

BOND ROD MILL GRINDABILITY TEST [D * L = 305 mm * 610 mm]

Client :

Done by : AMK

Purpose :

Bond Rod Mill Test

Project code :

Grinding media :

33.38

kg (steel rod)

Sample :

Suhanko

Media sizes (dia.) :

32...45

mm

Test No. :

9

P1 :

710

µm

Date :

26.2.2013

Bulk density :

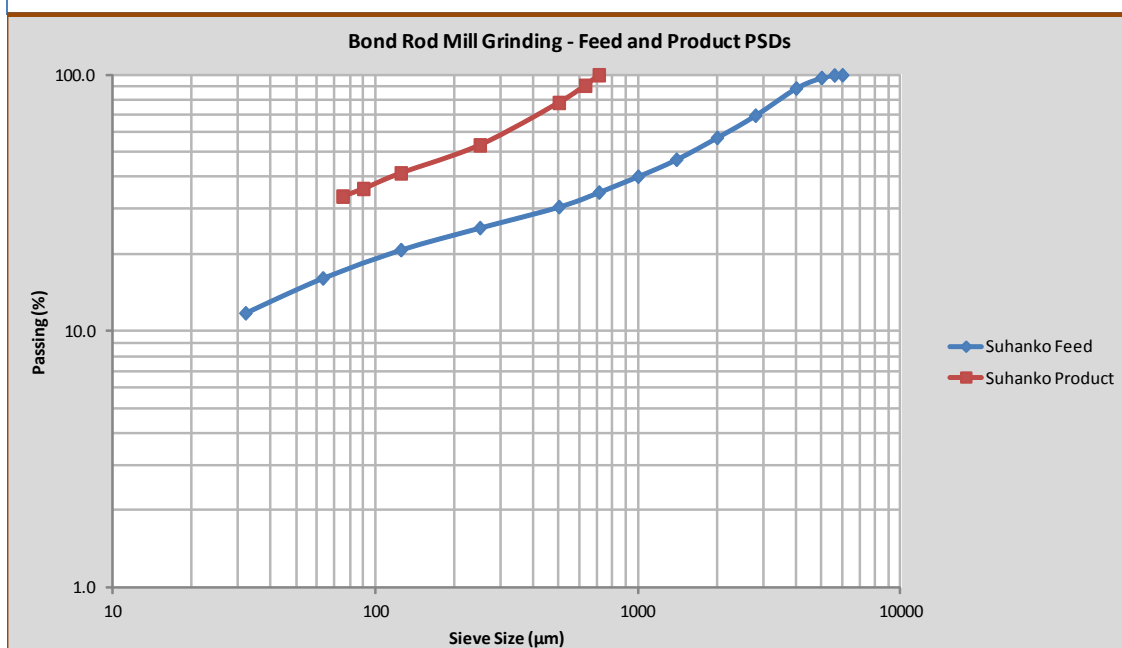
2008.8

g/dm³

Period	Revs. of Mill	Feed	New Feed	Screen O/S	Screen U/S	Net U/S/r	Net Screen U/S	Circ. Load	Wt. of Fresh Feed Added to Next Cycle, g	Wt. of U/Size in Feed to Next Cycle g
		g	g	g	g	g	g	%		
1	200	2511.0	1596.9	914.1	1585.4	1039.6	5.198	57.2	1596.9	557.3
2	87	2511.0	1017.0	1494.0	1013.4	662.1	7.610	146.9	1017.0	354.9
3	160	2511.0	1215.6	1295.4	1211.0	791.4	4.946	106.6	1215.6	424.2
4	153	2511.0	1254.1	1256.9	1249.9	816.4	5.336	100.2	1254.1	437.7
5	151	2511.0	1236.0	1275.0	1231.7	804.6	5.329	103.2	1236.0	431.4
6	153	2511.0	1239.4	1271.6	1233.5	806.8	5.274	102.6	1239.4	432.6

Product in the feed 34.90 %
 Bulk Density 2008.8 g/dm³
 Ideal Potential Product 1255.5 g
 Average equilibrium load 102 %
 Average product 5.313 g/rev
 80 % passing feed size 3454 µm
 80 % passing product size 520 µm

Bond Rod Mill Work Index (kWh/t dry) 19.8





Mineral Processing

BOND BALL MILL GRINDABILITY TEST [D * L = 305 mm * 305 mm]

Client :

Done by : AMK

Purpose :

Bond Ball Mill Test

Project code :

Grinding media : 20.13 kg (steel balls)

Sample :

Media sizes (dia.) : 12,75...37,8 mm

Test No. :

10

P1 :

100 μm

Date :

6.3.2013

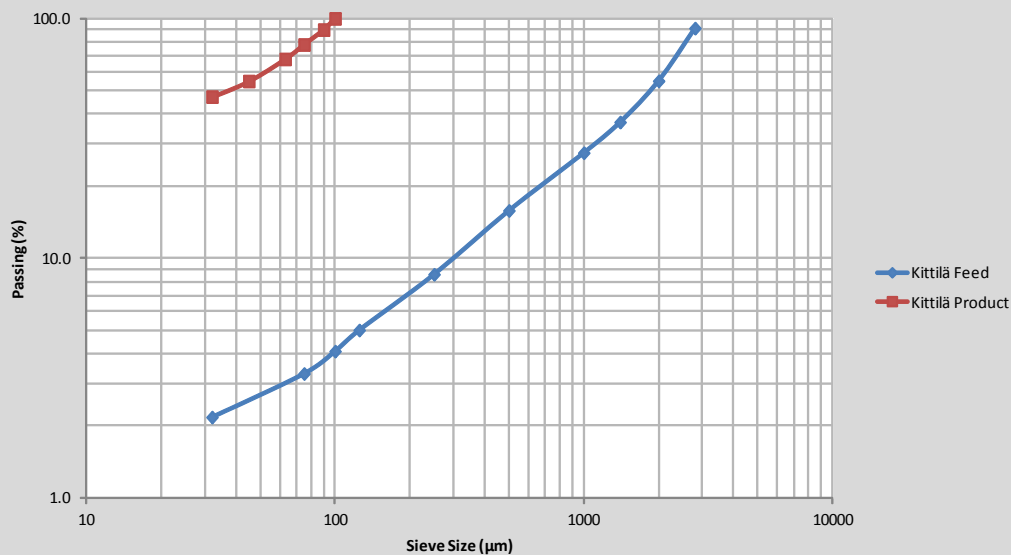
Bulk density :

1905.9 g/dm³

Period	Revs. of Mill	Feed	New Feed	Screen O/S	Screen U/S	Net U/S/r	Net Screen U/S	Circ. Load	Wt. of Fresh Feed Added to Next Cycle, g	Wt. of U/Size in Feed to Next Cycle, g
		g	g	g	g	g	g	%		g
1	100	1334.1	1334.1	1190.7	135.8	88.7	0.887	830.3	143.4	5.9
2	240	1334.1	197.7	1136.4	192.1	189.6	0.790	574.8	197.7	8.1
3	400	1334.1	333.1	1001.0	327.9	319.4	0.799	300.5	333.1	13.7
4	460	1334.1	409.2	924.9	404.6	392.4	0.853	226.0	409.2	16.8
5	424	1334.1	407.7	926.4	395.9	391.0	0.922	227.2	407.7	16.7
6	395	1334.1	388.5	945.6	385.4	372.6	0.943	243.4	388.5	15.9
7	388	1334.1	379.2	954.9	373.4	363.7	0.937	251.8	379.2	15.5
8	391	1334.1	395.7	938.4	390.8	379.5	0.971	237.1	395.7	16.2
9	377	1334.1	367.6	966.5	361.0	352.5	0.935	262.9	367.6	15.1
10	389	1334.1	371.8	962.3	365.2	356.6	0.917	258.8	371.8	15.2
11	399	1334.1	382.4	951.7	376.9	366.7	0.919	248.9	382.4	15.7

Product in the feed 4.10 %
 Bulk Density 1905.9 g/dm³
 Ideal Potential Product 381.2 g
 Average equilibrium load 254 %
 Average product 0.918 g/rev
 80 % passing feed size 2555 μm
 80 % passing product size 78 μm

Bond Ball Mill Work Index (kWh/t dry) 19.5

Bond Ball Mill Grinding - Feed and Product PSDs



Mineral Processing

BOND BALL MILL GRINDABILITY TEST [D * L = 305 mm * 305 mm]

Client :

Done by : AMK

Purpose :

Bond Ball Mill Test

Project code :

Grinding media : 20.13 kg (steel balls)

Sample : F-näyte

Media sizes (dia.) : 12,75...37,8 mm

Test No. :

P1 : 100 µm

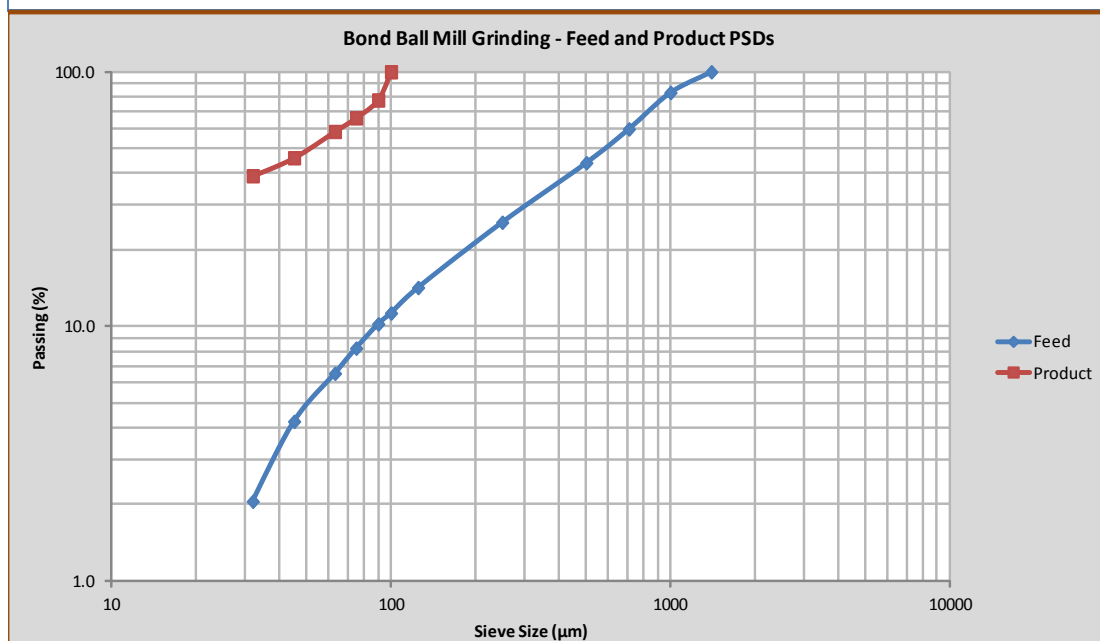
Date : 11.3.2013

Bulk density : 1996.9 g/dm³

Period	Revs. of Mill	Feed g	New Feed g	Screen O/S g	Screen U/S g	Net U/S/r g	Net Screen U/S g	Circ. Load %	Wt. of Fresh Feed Added to Next Cycle, g	Wt. of U/Size in Feed to Next Cycle g
1	100	1397.8	1397.8	1019.8	368.7	220.0	2.200	269.8	378.0	42.7
2	94	1397.8	378.0	1118.8	273.1	236.3	2.514	401.0	279.0	31.5
3	140	1397.8	279.0	1024.3	364.4	342.0	2.443	274.2	373.5	42.2
4	146	1397.8	373.5	1006.6	384.1	349.0	2.390	257.3	391.2	44.2
5	149	1397.8	391.2	990.9	401.2	362.7	2.434	243.5	406.9	46.0
6	145	1397.8	406.9	998.2	393.7	353.6	2.439	249.8	399.6	45.2

Product in the feed	11.30 %
Bulk Density	1996.9 g/dm ³
Ideal Potential Product	399.4 g
Average equilibrium load	250 %
Average product	2.421 g/rev
80 % passing feed size	964 µm
80 % passing product size	91 µm

Bond Ball Mill Work Index (kWh/t dry) 11.4





Mineral Processing

BOND ROD MILL GRINDABILITY TEST [D * L = 305 mm *610 mm]

Client :

Done by : AMK

Purpose :

Bond Rod Mill Test

Project code :

Grinding media : 33.38 kg (steel rod)

Sample :

Kemi

Media sizes (dia.) : 32...45 mm

Test No. :

P1 : 710 μm

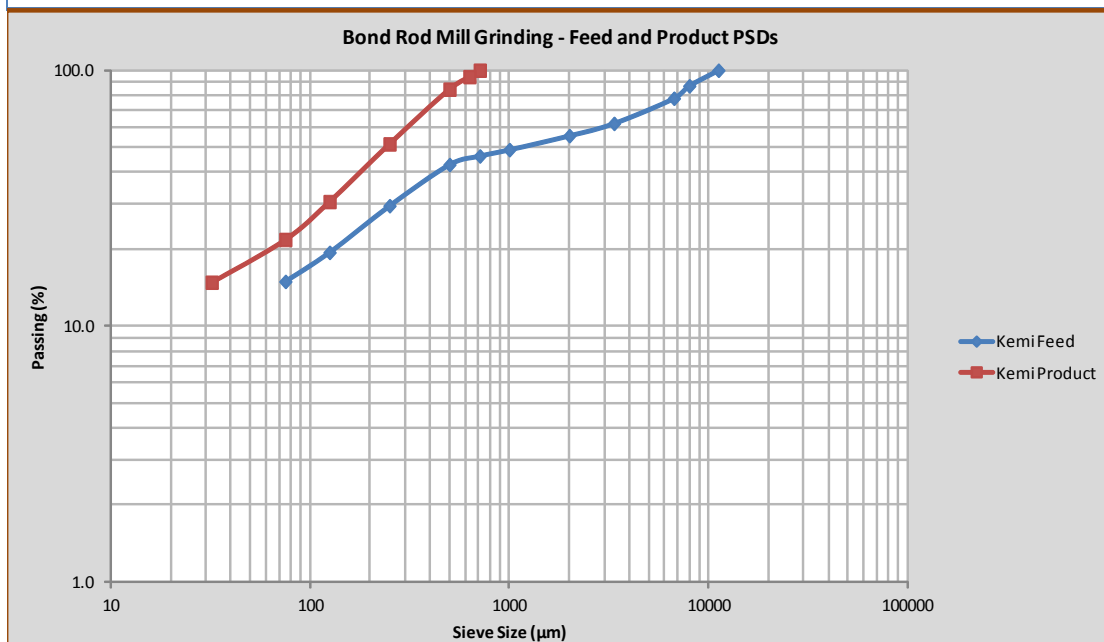
Date : 21.3.2013

Bulk density : 2747.4 g/dm³

Period	Revs. of Mill	Feed g	New Feed g	Screen O/S g	Screen U/S g	Net U/S/r g	Net Screen U/S g	Circ. Load %	Wt. of Fresh Feed Added to Next Cycle, g	Wt. of U/Size in Feed to Next Cycle g
1	100	3434.3	3434.3	655.8	2762.7	1191.9	11.919	23.6	2778.5	1283.7
2	20	3434.3	2778.5	1766.0	1655.9	384.6	19.232	105.9	1668.3	770.8
3	49	3434.3	1563.3	1871.0	1544.0	841.1	17.164	119.7	1563.3	722.2
4	62	3434.3	1661.1	1773.2	1648.7	893.7	14.414	106.7	1661.1	767.4
5	64	3434.3	1719.0	1715.3	1710.4	924.8	14.450	99.8	1719.0	794.2
6	63	3434.3	1659.9	1774.4	1674.4	893.0	14.175	106.9	1659.9	766.9

Product in the feed	46.20 %
Bulk Density	2747.4 g/dm ³
Ideal Potential Product	1717.2 g
Average equilibrium load	104 %
Average product	14.346 g/rev
80 % passing feed size	7026 μm
80 % passing product size	467 μm

Bond Rod Mill Work Index (kWh/t dry)	8.3
--------------------------------------	-----





Mineral Processing

BOND ABRASION INDEX TEST

Client :

Done by : AMK

Purpose : **Bond Abrasion Index Test**

Project code :

Paddle

SAE 4325 Steel, 3" * 1" * 0.25"

Sample : Kemi tankomyllysyöte

Brinell 500 Hardness

Test No. : 1

Date : 25.3.2013

Paddle weight before the test 95.6131 g

80 % passing product size

5641 µm

Paddle weight after the test 95.5565 g

Bond Abrasion Index (Ai)**0.0566****Size analysis: Bond Abrasion Product**

Size (µm)	Weight (g)	Weight (%)	Weight (%) <	
10000	8.1	4.2	95.8	
6700	21.6	11.3	84.4	
3350	26.7	14.0	70.4	
2000	12.5	6.6	63.8	
1000	15.3	8.0	55.8	
500	15.9	8.3	47.5	
250	30.3	15.9	31.7	
125	25.7	13.5	18.2	
75	10.5	5.5	12.7	
-75	24.2	12.7		
Total	190.6	100.0		

Bond Abrasion Index Test- Feed and Product PSDs