

KALKKIKIVEN JAUHATUKSEN TUOTANNON ANALY- SOINTI JA OPTIMOINTI

Kuula Mitro

Opinnäytetyö

Konetekniikka
Insinööri (AMK)

2023

Konetekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Mitro Kuula	Vuosi	2023
Ohjaaja(t)	TkL Timo Kauppi		
Toimeksiantaja	Terrafame Oy		
Työn nimi	Kalkkikiven jauhatuksen tuotannon analysointi ja optimointi		
Sivumäärä	49 + 3		

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia Terrafamen kalkkikiven jauhatuspiirin toimintaa tuotannon kapasiteetin laskemisen vuoksi. Tavoitteena oli kerätä tietoa jauhatuspiirin toimintaan vaikuttavista tekijöistä, jotka ovat jauhinkuulien materiaali, pyörimisnopeus, täyttöaste, kiintoainesuhte, vuoraukset, myllyn kapasiteetti ja tehonkulutus, myllyn kiertokuorma sekä luokituksen toimivuus.

Työssä käsiteltiin yhtenä osa-alueena myös jauhatuskiertoon ja pidemmälle prosessiin päätyviä kuulien sirpaleita, jotka aiheuttavat ongelmia mm. pumpuilla ja putkistoissa prosessia tukkien. Työtä varten teetettiin tutkimus Lapin AMK:lla prosessiin joutuneiden kuulien materiaalista.

Geologian tutkimuskeskuksella tehtiin partikkelikokojakaumatestit jauhatusprosessin eri vaiheille. Näiden pohjalta voitiin analysoida tarkasti jauhatuspiirin nykytilaa ja toimivuutta. Geologian tutkimuskeskus teki myös jauhatuskokeet eri kiintoainepitoisuuksilla. Näin pystyttiin tarkastelemaan kiintoainepitoisuuksien ja jauhatusaikojen vaikutusta jauhatustulokseen.

Tämän työn pohjalta on tarkoitus pystyä tekemään oikeansuuntaisia prosessimuutoksia, kun halutaan muuttaa prosessin toimintaa kustannustehokkaampaan ja laadullisesti parempaan suuntaan. Työn jatkotoimenpiteenä ehdotettu optimaalisen partikkelikokojakauman tarkastelu jatkoprosessissa on looginen, sillä jauhatusprosessin muuttaminen perustellusti on mahdollista.

Työn pohjalta voitiin todeta jauhatuspiirin huonon toiminnan suurimmaksi yksittäiseksi syyksi luokituksen vuorausten kulumisen. Tämä johti suureen kapasiteetin menetykseen jo valmiin tuotteen pysyessä jauhatuspiirissä. Koska myllyjen kapasiteetti on Terrafamen tarpeisiin ylimitoitettu, suurimmaksi syyksi puuttua asiaan nousi energiankulutus, mikä on yksi merkittävimpiä kustannustekijöitä.

Avainsanat

jauhatus, kuulamyly, luokitus, jauhatuspiiri

Mechanical Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Mitro Kuula	Year	2023
Supervisor(s)	Timo Kauppi, Lic.Sc. (Tech.)		
Commissioned by	Terrafame Oy		
Title	Analysis and Optimization of Production in Limestone Grinding		
Number of pages	49 + 3		

The purpose of this thesis was to investigate limestone grinding circuit in Terrafame, because the production capacity had come down. The aim was to collect information about factors, which affect the operation of the grinding circuit. The factors are: material of grinding balls, rotational speed, filling degree, solid density, linings, capacity and power dissipation, circulating load and functionality of classification.

One section of this work was to investigate the shards of grinding balls, which were found in the further process. Shards were causing problems in the pumps and pipes making blockages in the process. Lapland UAS made a research of the material of the grinding ball shards.

GTK made the particle size analysis of the different parts of the grinding process. These analyses made it possible to scrutinize the current condition and functionality of the grinding circuit. GTK made also grinding tests with different solid densities. This made possible to analyze the effects of different solid densities and grinding periods.

The aim is to be able to make proper changes in the process, when it is considered to be necessary in terms of cost efficiency and quality of the product. A suggestion for the future could be to research the optimal particle size in the further process. This suggestion is logical because it is now possible to make justified changes in the process.

The most impactful factor in the malfunction of grinding circuit was to notice wearing of the linings in the classification. This led to capacity loss, because already fine-grained product stayed in the grinding circuit. Because the capacity of the mills is overscaled, the reason to fix this problem is high energy consumption, which is very expensive.

Keywords grinding, ball mill, classification, grinding circuit

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
1.1	Työn tavoitteet	7
1.2	Työn rajaus	8
2	YRITYSESITTELY	9
2.1	Yleistä Terrafamesta	10
2.2	Kalkin käsittely	14
3	JAUHATUKSEN PROSESSIKUVAUS	16
3.1	Jauhatus	16
3.2	Kuulamyly	16
3.3	Luokitus	17
4	TEOREETTISET LÄHTÖKOHDAT	20
4.1	Jauhinkuulien materiaaliluokitus	20
4.2	Pyörimisnopeus	20
4.3	Täyttöaste	21
4.4	Vuoraukset	22
4.5	Myllyn kapasiteetti ja tehonkulutus	22
4.6	Myllyn kiertokuorma	23
4.7	Luokituksen terävyys	25
5	TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	26
5.1	Kuulamylyn lähtötiedot	26
5.2	Luokittimen lähtötiedot	26
5.3	Jauhinkuulien materiaalitutkimus	28
5.4	Partikkelikokojakaumien määrittäminen	32
5.5	Jauhatuskokeet eri kiintoainepitoisuuksilla	35
5.6	Luokituksen terävyys	40
5.7	Pyörimisnopeus	40
5.8	Täyttöaste	40
5.9	Tehonkäyttö ja kapasiteetti	41
5.10	Jauhatuspiirin analysointi	42
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	45

7 POHDINTA.....	47
LÄHTEET.....	48
LIITTEET	49

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

RPM	pyörimisnopeus (rounds per minute)
d	jauhinkuulan halkaisija
D	myllyn sisähalkaisija
$x_{k,f}$	syötteen suurin rae
$x_{k,p}$	tuotteen suurin rae
n	myllyn todellinen pyörimisnopeus
n_c	myllyn kriittinen pyörimisnopeus
n_p	myllyn nopeus kriittisestä
C	myllyn kapasiteetti
k	laitteista ja olosuhteista riippuva kerroin
m	kapasiteetin riippuvuutta nopeudesta osoittava eksponentti
V	Täyttöaste
H	Jauhinkappalepanoksen etäisyys myllyn ”katosta”
Q	on myös myllyn kapasiteetti
C_i	vakio, jonka riippuu eri tekijöistä
ρ	jauhinkappaleiden tiheys
ρ_l	lietteen tiheys
L	myllyn sisäpituus
P	tehonkäyttö
P_{KM}	tehonotto kuulatonnia kohti
V_p	myllyn täyttöaste (myös)
S_s	kuulakokotekijä
GTK	Geologian tutkimuskeskus
CL%	Kiertokuorma
E	Luokituksen terävyys

1 JOHDANTO

Jauhatus on yksi teollisuuden tärkeimmistä yksikköprosesseista (Lukkarinen 1985, 175). Terrafame jauhaa kalkkia tehdäkseen siitä kalkkivilietettä. Kalkkivilietettä käytetään esineutraloinnin sekä raudan saostuksen neutralointikemikaalina. Kalkinjauhatuksen päätarkoitus on saada kalkin raekoko mahdollisimman pieneksi, jotta pystytään maksimoimaan kalkkikiven liuoksen kanssa reagoiva pinta-ala. Prosessin tutkimiseen ja kehittämiseen ei ole käytetty resursseja tuotelaadun ollessa välttävä ja kapasiteetin ollessa aina riittävä. Tästä syystä jauhatuksen tarkempi tarkastelu on jäänyt tekemättä ja tämän työn tarkoituksena onkin selvittää jauhatukseen vaikuttavat asiat sekä niiden yhteisvaikutus. Työn tarkoituksena ei ole saada jauhatuspiiristä ”valmista”, vaan esittää teoria ja miten teorian pohjalta ajo- ja rakennemuutoksilla jauhatuspiiristä saadaan mahdollisimman kustannustehokkaasti mahdollisimman hienojakoista tuotetta. Työn mahdollisena jatkotoimenpiteenä voisi olla prosessin kannalta optimaalisen partikkelikojakauman selvittäminen, jolloin tämän työn pohjalta voitaisiin suhteellisen helposti tehdä ajotavan muutokset jauhatuspiiriin.

1.1 Työn tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on kerätä tietoa jauhatuspiirin toimintaan vaikuttavista tekijöistä, jotka ovat jauhinkuulien materiaali, pyörimisnopeus, täyttöaste, kiintoainesuhde, vuoraukset, myllyn kapasiteetti ja tehonkulutus, myllyn kiertokuorma sekä luokituksen toimivuus. Työssä käsitellään myös myllyn tämänhetkistä toimintaa ja siihen liittyviä haasteita kuten jauhatuskiertoon ja pidemmälle prosessiin päätyviä kuulien sirpaleita sekä luokituksen huonoa toimintaa, joka lisää myllyn kiertokuormaa tarpeettoman suureksi. Tämän työn pohjalta on tarkoitus voida tehdä oikeansuuntaisia prosessimuutoksia, kun halutaan muuttaa prosessin toimintaa kustannustehokkaampaan ja laadullisesti parempaan suuntaan.

1.2 Työn rajaus

Opinnäytetyö rajataan koskemaan jauhatuspiirin optimointia. Jauhatuspiiri koostuu kuulamylystä sekä luokituksesta. Työssä ei oteta kantaa optimaaliseen rae-kokoon itse prosessin kannalta, vaan optimointi tehdään luokittimen mitoitustietoihin perustuen.

2 YRITYSESITTELY

Terrafame on suomalainen monimetalliyhtiö, joka tuottaa nikkeliä, sinkkiä, koboltia ja kuparia. Sillä on Euroopan suurimmat nikkeliavarannot ja se tuottaakin eniten nikkeliä Euroopassa. Lisäksi sen nikkeliintuotantoprosessi on maailmassa ainutlaatuinen. Terrafame perustettiin vuonna 2015 jatkamaan Talvivaara Oy:n konkurssipesän toimintaa. Sen suurimpana omistajana on Suomen valtio. Terrafamen strateginen päämäärä on vähentää liikenteen päästöjä tuottamalla akkukemikaaleja vastuullisesti. Terrafame työllistää noin 800 työntekijää. Lisäksi alueella toimii sen yhteistyökumppaneita, jotka työllistävät toiset noin 800 työntekijää. Terrafamen liikevaihto oli vuonna 2022 noin 584 miljoonaa euroa (Terrafame Oy, 2023d).



Kuvio 1. Terrafamen ilmakekuva. (Terrafame Oy, 2023b)

2.1 Yleistä Terrafamesta

Terrafame louhii malmia Kuusilammen avolouhokselta (kuvio 2). Malmi sisältää sinkkiä 0,53 %, nikkeliä 0,26 %, kobolttia 0,02 %, kuparia 0,14 % ja uraania 0,0017 %. Malmi murskataan, jonka jälkeen se kasataan ensin primäärikasoiksi (kuvio 3). Primäärikasoja kastellaan kiertoliuksella, jonka pH:ta säädellään rikkipollalla. Kiertoliuksesta johdetaan osavirtauma metallien talteenottolaitokselle metallisulfidien erottamista varten. Talteenottolaitoksen paluuliuos johdetaan takaisin kiertoliukseen. (Terrafame Oy, 2023a)



Kuvio 2. Kuusilammen avolouhos. (Terrafame Oy, 2023b)



Kuvio 3. Primäärikasat. (Terrafame Oy, 2023b)

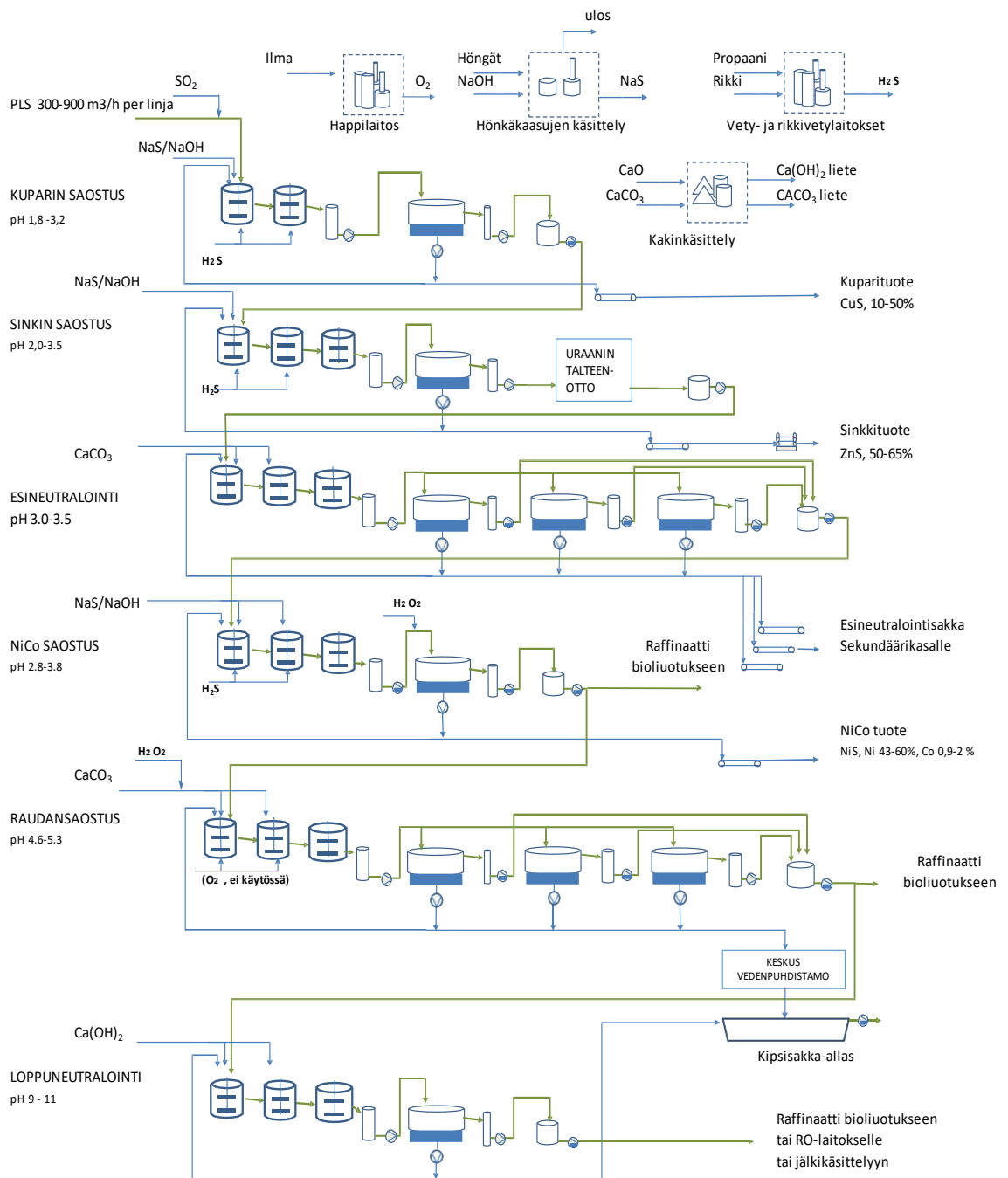
Metallit erotellaan toisistaan saostamalla prosessiliuoksesta metallien talteenotossa (kuvio 4). Metallien talteenoton yksinkertaistettu prosessikaavio on esitetty kuviossa 5. Terrafamella on käytössään kaksi saostuslinjaa, jotka ovat lähes identtisiä prosessivaiheiltaan. Prosessiliuoksesta erotellaan metallit järjestyksessä: kuparisulfidin saostus, sinkkisulfidin saostus sekä nikkeli- ja kobolttisulfidin yhteissaostus. Vuonna 2024 on tarkoitus ottaa käyttöön uraanin talteenotto, joka sijoittuu prosessissa sinkin saostuksen jälkeen (Terrafame Oy, 2023c).



Kuvio 4. Metallien talteenottolaitos. (Terrafame Oy, 2023b)

Liuoksen pH on yksi merkittävimmistä tekijöistä, joka tulee ottaa huomioon metallien saostuksessa, sillä eri metalleilla on usein tarkka pH-arvo, jossa ne alkavat saostumaan. Metallit saostetaan rikkivedyn (H_2S) avulla. Liuoksen pH:n säätökemikaaleina Terrafame käyttää tuotantoprosessissa pääasiassa lipeää ($NaOH$) sekä kalkkikivilietettä ($CaCO_3$). Loppuneutraloinnissa pH:n säätökemikaalina käytetään kalkkimaitoa ($Ca(OH)_2$). Rikkivetyä tuotetaan rikkivetyreaktorissa, johon syötetään vetyä sekä rikkiä, jotka paineen ja lämpötilan avulla saadaan yhdistymään rikkivedyksi. Kalkkikivilietettä varten Terrafamella on murskaus- ja jauhausprosessit, joilla saadaan kalkkikivestä tarpeeksi hienojakoista, jotta sitä voidaan käyttää efektiivisesti pH:n säädössä (Terrafame Oy, 2023a).

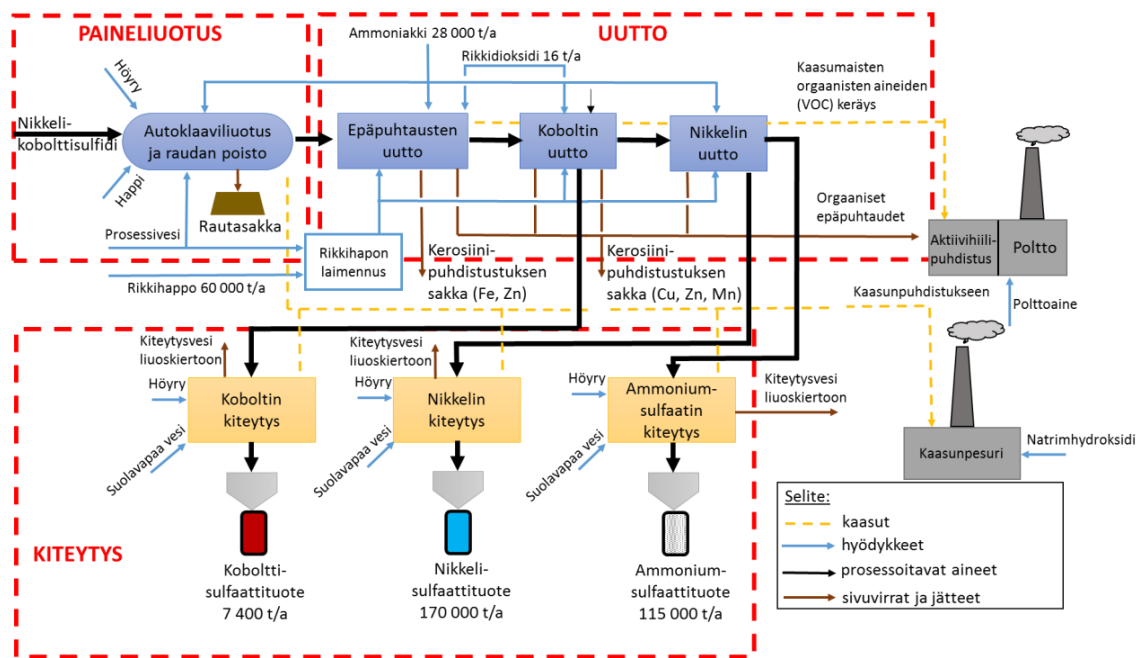
METALLIEN TALTEENOTON VIRTAAUSKAAVIO



Kuvio 5. Metallien talteenottolaitoksen yksinkertaistettu prosessikaavio. (Terra-fame Oy, 2023a)

Tuotteena syntyvä sinkki- ja kuparisulfidi myydään sellaisenaan. Nikkeli- ja kobolttisulfideista jalostetaan akkukemikaalitehtaalla nikkeli- ja kobolttisulfaattia akkuteollisuuden tarpeisiin.

Akkukemikaalitehtaalla on kolme pääprosessia, joista ensimmäisenä on paineliuotus, jossa autoklaavissa kiintoaineen sulfidirikki hapetetaan paineen, lämpötilan ja hapen avulla sulfaatiksi. Toisena pääprosessina on kolme neste-nesteuuttoa, joissa ensimmäisessä poistetaan epäpuhtaudet, toisessa kobolttisulfaatti ja kolmannessa nikkelisulfaatti. Kolmas pääprosessi on kiteytys, jossa koboltti-, nikkelisulfaatit ja sivutuotteena syntyvä ammoniumsulfaatti kiteytetään lopputuotteiksi (kuvio 6). Nikkeli- ja kobolttisulfaatteja käytetään akkukemikaaleina ja ammoniumsulfaattia lannoitusaineena (Terrafame Oy 2018).



Kuvio 6. Akkukemikaalitehtaan yksinkertaistettu prosessikuvaus (Terrafame Oy 2018).

2.2 Kalkin käsittely

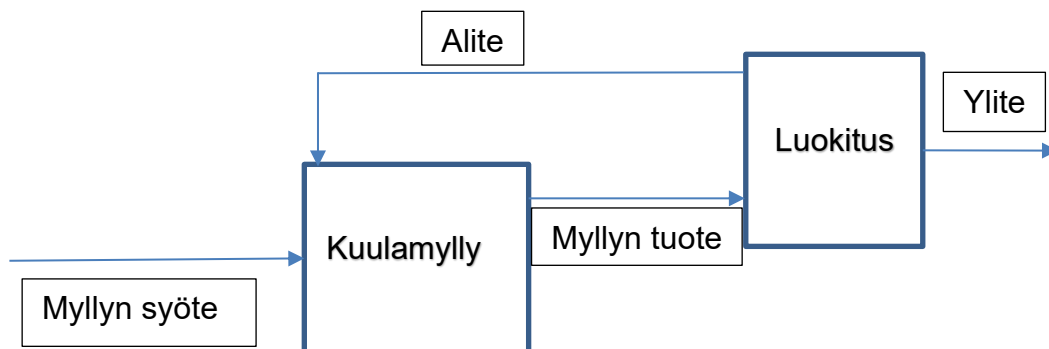
Kalkin käsittelyssä tuotetaan kahta eri tuotetta: kalkkivilietettä sekä kalkkimaitoa. Kalkkivilietteen raaka-aineena käytetään kalkkikiveä, jonka raekoko tehtaalte saapuessaan on 0–150 mm ja se tuodaan tehdasalueelle junakuljetuksella. Kalkkikivi siirretään varastosta kuljettimilla kaksivaiheiseen murskaukseen, jossa se murskataan raekokoon 0–12 mm. Murskauksen jälkeen se siirtyy jauhatukseen. Jauhatuksen jälkeen jauhattu kalkkikivi lietetään kalkkivilietteeksi, jota syötetään prosessiin neutralointiaineena. Kalkkimaidon raaka-aineena käytetään

poltettua kalkkia, joka tulee tehtaalle joko palana 0–90 mm raekoossa tai hienonnettuna 0–15 mm raekoossa. Poltetu kalkki siirretään jauhatuksen kautta kalkinsammuttimeen, jossa se reagoi veden kanssa muodostaen kalsiumhydroksidia eli kalkkimaitoa. Kalkkivilietettä käytetään sinkin erotuksen jälkeisessä prosessivaiheessa eli esineutraloinnissa (kuvio 5). Liuoksen pH:ta nostetaan nikkelin ja koboltin sakeuttamista varten sen ollessa liian hapanta kuparin ja sinkin sakeuttamisen jälkeen. Kalkkivilietettä käytetään myös raudan saostuksessa lähinnä nostamaan pH:ta loppuneutralointia varten, jolloin ei tarvitse käyttää niin paljon kalkkimaitoa. Kalkkimaitoa käytetään prosessiliuoksen loppuneutraloinnissa ja keskusvedenpuhdistamolla kaivosalueen vesien neutraloinnissa (Terrafame Oy, 2023a).

3 JAUHATUKSEN PROSESSIKUVAUS

3.1 Jauhatus

Jauhatus on kaivosteollisuudessa murskausta seuraava prosessivaihe. Mineeraali, tässä tapauksessa kalkkikivi, on tarkoitus hienontaa seuraavan prosessivaiheen vaatimaan raekokoon. Terrafamalla on käytössään kaksi identtistä jauhatuspiiriä (kuvio 7), joita ajetaan vuorotellen. Jauhatuspiiriin kuuluu kuulamyllly sekä luokitus. Kyseessä on suljettu jauhatuspiiri, jossa osa kuulamylllyn tuotteesta joutuu luokituksen kautta takaisin kuulamylllyn jauhettavaksi (Lukkarinen 1985, 277–278).

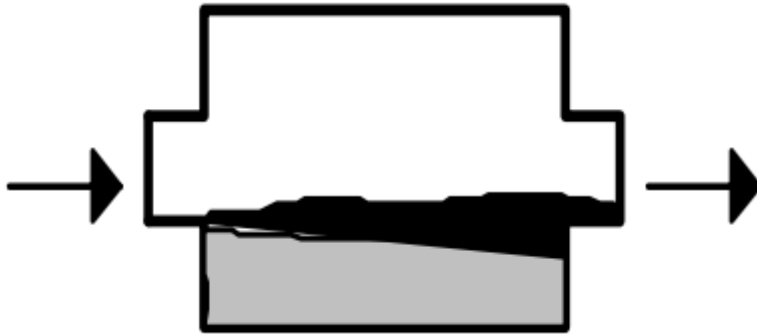


Kuvio 7. Jauhatuspiiri.

3.2 Kuulamyllly

Kuulamyllly on vaakatasossa pyörivä lieriö, jossa on syöttö- ja purkuaukko. Myllyn jauhinkappaleina käytetään yleensä teräskuulia tai keraamisesti valmistettuja kuulia. Jauhatusapahtuma perustuu isku- sekä kiertojauhatuskseen jauhinkuulien käsitellessä jauhettavaa materiaalia kuulamassan välissä sekä vuorausta vasten.

Terrafamen kuulamyly on tyypiltään ylitemyly (kuvio 8), jossa jauhattava materiaali tulee ulos myllystä yliteputken kautta ilman lisälaitteita (Lukkarinen 1985, 198).



Kuvio 8. Ylitemyly (Pöllänen & Kuopanportti 1994)

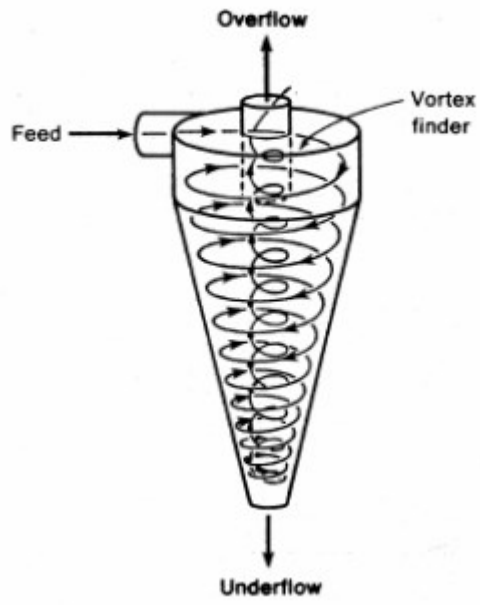
3.3 Luokitus

Luokituksella tarkoitetaan materiaalin erittelemistä kahdeksi tai useammaksi tuotteeksi. Luokitus perustuu kiintoainehiukkasten laskeutumisnopeuteen väliaineessa. Luokittimet jaotellaan kahteen ryhmään väliaineen mukaan: hydraulisiin ja pneumaattisiin (Lukkarinen 1985, 249). Kiintoainehiukkasten laskeutumisnopeuteen vaikuttavat kiintoaineen tiheys, rakeiden läpimitta ja muoto sekä väliaineen tiheys ja viskositeetti. Seulonasta poiketen luokituksessa ylite on hienoa materiaalia ja alite on karkeampaa materiaalia.

Luokituksessa jaotellaan kuulamylyn tuote valmiiseen tuotteeseen ja lisäjauhausta vaativaan materiaaliin. Terrafamen luokitin, koostuu kahdestakymmenestä hydrosyklonista (kuvio 9), joista yhtäaikaisesti ajossa on 15. Hydrosykloneiden toiminta (kuvio 10) perustuu keskipakovoimaan. Suuremmat hiukkaset ajautuvat reunoille ja sitä kautta aliteputkeen, kun taas pienemmät hiukkaset jäävät keskellä olevaan pyörteeseen, jonka imusuunta on puolestaan ylöspäin yliteputkeen (Lukkarinen 1985, 261–262).



Kuvio 9. Terrafamen luokitin



Kuvio 10. Hydrosyklonin toiminta. (Raitolampi 2008)

4 TEOREETTISET LÄHTÖKOHDAT

4.1 Jauhinkuulien materiaaluokitus

Myllyn jauhatustyön tekevät jauhinkappaleet. Kyseisessä myllyssä jauhinkappaleina käytetään kuulia. Jauhinkuulien materiaalin ja koon valinnassa tulee ottaa huomioon jauhettavan materiaalin raekoko sekä kovuus. Syötteen karkeus ja tavoiteltava tuotteen hienous määrittävät käytettävien kuulien koon. Kuulakoon valitsemisessa on yleisesti käytetty Olewskin yhtälöä (Lukkarinen 1985, 207–208):

$$d = 6\sqrt{x_{k,f}} \times \lg x_{k,p} \quad (1)$$

jossa, d on kuulun koko, mm,
 $x_{k,f}$ on syötteen suurin rae, mm,
 $x_{k,p}$ on tuotteen suurin rae, μm

4.2 Pyörimisnopeus

Pyörimisnopeutta on totuttu ilmaisemaan prosentteina kriittisestä pyörimisnopeudesta. Kriittinen pyörimisnopeus tarkoittaa rummun nopeutta, jossa liukumaton kappale myllyn kehällä ei pääse tippumaan myllyn pyöriessä.

Kun kuulakoko otetaan huomioon, saadaan kriittinen pyörimisnopeus n_c laskettua kaavalla

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{D-d}} \quad (2)$$

jossa, D on myllyn sisähalkaisija, m
 d on jauhinkuulan halkaisija, m

Myllyn nopeus kriittisestä n_p saadaan laskettua kaavalla

$$n_p = \left(\frac{n}{n_c}\right) 100\% \quad (3)$$

Pyörimisnopeuden vaikutus kapasiteettiin voidaan laskea kaavalla

$$C = kn_p^m \quad (4)$$

jossa, C on myllyn kapasiteetti
 k on laitteista ja olosuhteista riippuva kerroin
 m on kapasiteetin riippuvuutta nopeudesta osoittava eksponentti.

(Lukkarinen 1985, 178–181)

4.3 Täyttöaste

Myllyn täyttöasteella tarkoitetaan jauhinkappaleiden määrää verrattuna vuoraton myllyn sisätilavuuteen. Hyvän jauhatustuloksen saavuttamiseksi tulee myllyn täyttöasteen olla 30–50 % myllyn tilavuudesta. Koska Terrafamen mylly on tyy-piltään ylitemylly, määräytyy enimmäistäyttöaste suoraan yliteputken alimman kohdan mukaan.

Täyttöaste voidaan laskea Bondin kaavalla

$$V = 113 - 126(H/D) \quad (5)$$

jossa, H on jauhinkappalepanoksen yläpinnan etäisyys myllyn katosta, m
 D on myllyn sisäläpimitta, m.

(Lukkarinen 1985, 183)

4.4 Vuoraukset

Jauhinmyllyt vuorataan rakenneosien kulumisen ehkäisemiseksi sekä energian siirtämiseksi jauhinkappalepanokseen. Tyypillisimpiä vuorausmateriaaleja ovat: teräs, valurauta, keraamiset materiaalit, kumi ja elastomeerit. Vuorauksen materiaalinvalinta riippuu jauhettavasta materiaalista, jauhinkappaleiden materiaalista sekä jauhatustyyppistä esim. märkäjauhatuksessa herkästi esiintyvistä korroosioista.

Terrafame käyttää myllyissään kumivuorausta, jossa vuoraukseen on pultattu kiinni kohopalkkeja. Kohopalkkien tarkoitus on nostaa jauhinkappaleita myllyssä ylöspäin aiheuttaen iskujauhatusta sekä estää jauhinkuulien liukumista myllyssä. Jauhinkuulien liukuminen myllyn vuorausta pitkin johtaa vuorauksen nopeaan kulumiseen. Kohopalkkien korkeus vaikuttaa jauhatustulokseen tuotteen ollessa hienompaa pienemillä kohopalkeilla ja karkeampaa suuremmilla. (Lukkarinen 1985, 220–221) Kohopalkkien välien ja korkeuden suhde vaikuttaa myllyn kapasiteettiin ja energiankulutukseen. Paras kapasiteetin arvo saadaan suhteen ollessa 4,4 ja pienin energiankulutus suhteen ollessa 4,0. (Lukkarinen 1985, 230–231)

4.5 Myllyn kapasiteetti ja tehonkulutus

Jauhinmyllyn kapasiteetti määritetään myllyn tietyssä aikayksikössä käsittelemän materiaalmäärän mukaan. Terrafamen myllyn kapasiteetin on huomattu laske-
neen aikojen saatossa 42 t/h -> noin 31 t/h. Myllyn kapasiteettiin vaikuttavia tekijöitä ovat: myllyn koko, pyörimisnopeus, täyttöaste, jauhettavan materiaalin laatu, jauhinkappaleet, myllyn rakenne sekä vuorausmateriaali.

Tehoyhtälö tarkoittaa jauhamiseen tarvittavaa tehoa. Tätä laskettaessa tulee ottaa huomioon myös tyhjäkäyntiteho. Jauhettua painoyksikköä kohti tarvittava energiamäärä saadaan, kun jaetaan kokonaisteho aikayksikössä jauhetulla tonnimäärällä (mekaaninen prosessitekniikka).

Tehonotto kilowateissa kuulatonnia kohti saadaan laskettua kaavalla

$$P_{KM} = 4,879 \times D^{0,3} (3,2 - 3V_p) \times n_p \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10n_p)}} \right) + S_s \quad (6)$$

Jossa,	P_{KM}	on myllyn tehonotto kuulatonnia kohti, kW
	D	on myllyn sisähalkaisija, m
	V_p	on myllyn täyttöaste, %
	n_p	on kierrosluku kriittisestä, %
	S_s	on kuulakokotekijä

Kuulakokotekijä S_s saadaan laskettua kaavalla

$$S_s = 1,102 \left(\frac{B-12,5D}{50,8} \right) kW \quad (7)$$

Jossa B on kuulan halkaisija, mm

(Lukkarinen 1985, 208–209)

4.6 Myllyn kiertokuorma

Kiertokuorma määräytyy kuulamylyn tuotteen laadun sekä luokittimen toimivuuden mukaan. Luokitin palauttaa ylisuuret rakeet takaisin myllyyn jauhattavaksi, josta ne palaavat taas luokittimeen. Tätä asiaa tarkastellessa tulee ottaa huomioon kiertokuorman määrä, joka vaikuttaa aikaan, jonka jauhattava aine pysyy myllyssä. Mitä suurempi on kiertokuorma, sitä nopeammin jauhattava aine tulee ulos myllystä. Suuri kiertokuorma on yleensä hyvä asia, sillä se estää ylijauhastusta ja nostaa jauhatuspiirin kapasiteettia. Toisaalta suuri kiertokuorma vaikuttaa luokituksen terävyyteen haitallisesti sillä sen mukana myllyyn palaa aina myös hienoa ainesta veden mukana. Suuren kiertokuorman tuoman hyödyn ja alhaisen luokituksen terävyyden aiheuttaman menetyksen välillä onkin tehtävä kompromissi (Lukkarinen 1985, 279–280).

Kiertokuorman voi laskea yhtälöllä:

$$CL\% = \frac{w_u \times U}{F} \times 100\% \quad (8)$$

jossa,	$CL\%$	on kiertokuorma.
	w_u	on luokittimen alitteen kiintoainepitoisuus.
	U	on luokittimen alitteen massavirta, t/h
	F	on myllyn syöttö, t/h

Myllyyn luokittimelta palaavan lietteen tiheyttä ei tunneta. Tiheys voidaan selvittää ottamalla luokittimen alitteesta ja ylitteestä näytteet, joiden kiintoainepitoisuudet punnitaan kuivaamisen jälkeen. Näin saadaan tietoon kiintoaineen määrä tilavuusyksikössä. Tämä antaa suuntaa oikean kiintoainepitoisuuden laskemiseksi myllyssä, mutta eri ainevirtojen punnitseminen on haastavaa ja tuottaa usein isoja epätarkkuuksia (Lukkarinen 1985, 278).

Myllyn kiertokuorman laskemiseksi on olemassa myös toinen yhtälö, joka käyttää hyödyksi seula-analyyseja ja sitä onkin luontevaa käyttää tässä yhteydessä, koska työhön on teetetty partikkelikokojakaumien määrittäykset.

$$CL\% = \frac{o-f}{f-u} \times 100\% \quad (9)$$

jossa,		
f	on raekokoa x pienempien kiintoainepartikkelien massaosuus myllyn tuotteen kiintoaineesta.	
o	on raekokoa x pienempien kiintoainepartikkelien massaosuus syklonin ylitteen kiintoaineesta.	
u	on rakekokoa x pienempien kiintoainepartikkelien massaosuus syklonin alitteen kiintoaineesta.	

Yhtälöä (9) käytettäessä on huomioitava, että se antaa kiertokuormalle eri arvoja riippuen mitä x:n arvoa käytetään. Lukkarisen mukaan luotettavin arvo saadaan käyttämällä x:n arvona ylitteen 90 % läpäissyttä raekokoa (Lukkarinen 1985, 279), joka on partikkelikokojakaumien (taulukko 1) mukaan 45 µm.

4.7 Luokituksen terävyys

Luokituksen terävyydellä ilmaistaan luokituksen tehokkuutta. Käytännössä se tarkoittaa kuinka monta prosenttia raekoon x tuotetta päätyy luokittimen syötteestä luokittimen ylitteeseen (Raitolampi 2008). Luokituksen terävyys voidaan laskea yhtälöllä:

$$E = \frac{o \times (f - u)}{f \times (o - u)} \times 100\% \quad (10)$$

jossa,

E	on luokituksen terävyys, %
o	on ylitteen sisältämä x koon jae, %
u	on alitteen sisältämä x koon jae, %
f	on syötteen sisältämä x koon jae, %

5 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Kuulamylyn lähtötiedot

Kuulamylyn lähtötietoina toimii Terrafamen aineisto kuulamylyistä, kuten tekniset piirustukset, prosessikuvaukset sekä PI-kaaviot. Kuulamylyn syötteestä sekä tuotteesta otettiin myös raekokoanalyysit ennen tuotannon muutosten täytäntöönpanoa. Näitä analyyseja voidaan käyttää tulosten todentamisessa.

Kuulamylyn pääparametrit:

- halkaisija $D = 2,88$ m.
- pituus $l = 10,2$ m
- pyörimisnopeus $n = 20$ RPM.
- uuden syötteen kiintoainesuhde on noin 35 m-%.
- luokittimelta palaavan lietteen kiintoainesuhde on noin 71 m-%
- täyttöaste on noin 25 % kokonaistilavuudesta.
- pystyseulan verkon silmäkoko on 16 mm ja vaakaseulan 12 mm.
- käytössä kaksi eri kuulalaatua $d = 40$ mm ja $d = 50$ mm.
- tehonotto vaihtelee 700–900 kW:n välillä.
- vuoraukset ovat 60 mm paksua kumia.

5.2 Luokittimen lähtötiedot

Tässä luvussa on esitetty luokittimen lähtötiedot.

Lähtötiedot (kuvio 11):

Kun syötteen:

Lietemäärä (feed, slurry) on 218 m³/h,

Kiintoainemäärä (feed, solids) on 68 m³/h ja

vesimäärä (feed, water) on 150 m³/h,

niin:

Ylitteen lietemäärä (overflow, slurry) on 109 m³/h,

Ylitteen kiintoaine määrä (overflow, solids) on 16 m³/h,

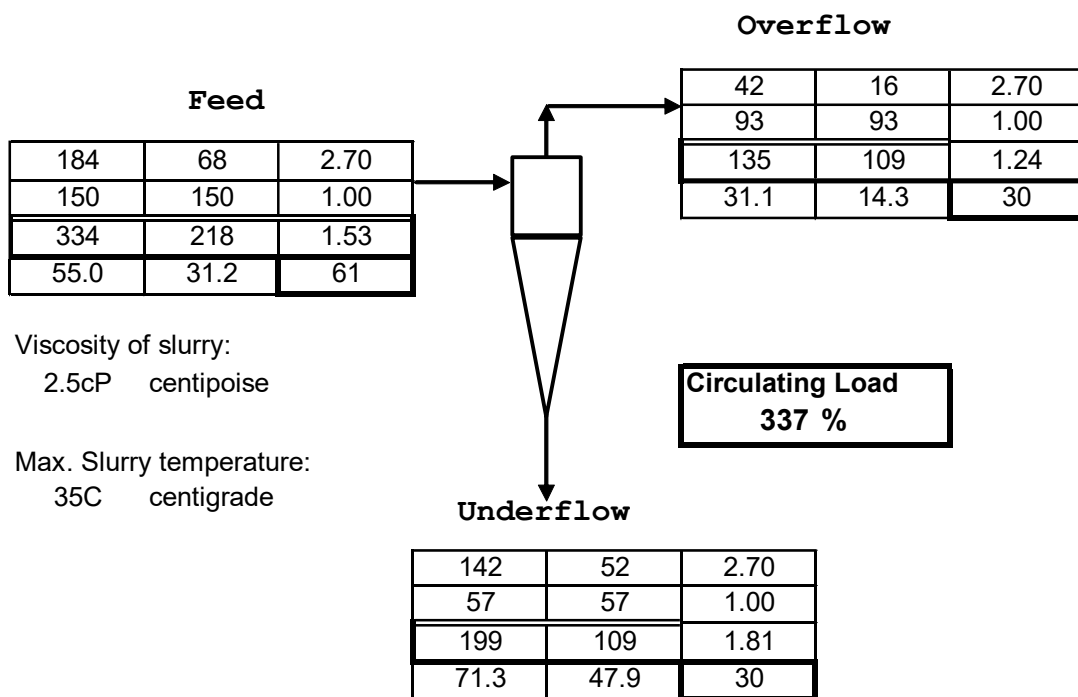
Ylitteen vesimäärä (overflow, water) on 93 m³/h,

Alitteen lietemäärä (underflow, slurry) on 109 m³/h,

Alitteen kiintoainemäärä (underflow, solids) on 52 m³/h ja

Alitteen vesimäärä (underflow, water) on 57 m³/h

S.G ilmoittaa tiheyden.



LEGEND

Solids	TPH	M3/H	S.G.
Water	TPH	M3/H	S.G.
Slurry	TPH	M3/H	S.G.
% Solids	%Cw	%Cv	L/sec

Kuvio 11. Luokittimen suunnitteluarvot (Terrafame Oy, 2023a).

Luokittimen suunnittelun lähtötiedoissa on esitetty myös taulukko luokittimen syötteen eli myllyn tuotteen raekoista (taulukko 1).

Taulukko 1. Luokittimen syötteen raekokojakauma

μm	%
10	15
25	22
45	32
75	42
100	50
200	75
300	90
500	98

Dx- arvo kertoo raekoon. x:n arvo ilmaisee prosenttimäärän, joka menee kyseisestä raekoosta ylitteeseen. Eli D80 kertoo mikä raekoko luokituu 80 prosenttisesti ylitteeseen.

5.3 Jauhinkuulien materiaalitutkimus

Jauhinkuulien materiaalikoostumuksista ja kovuuksista tehtiin työtä varten tilaustutkimus Lapin AMK:lla, johtuen kuulien pääsystä pidemmällä prosessiin. Pystyseulan tarkoituksena on estää kuulien pääsy ylitteeseen tarpeettoman suurina. Vaakaseula puolestaan päästää tuotteen läpi ja sen on tarkoitus vierittää pystyverkosta läpi päässeet kuulat ulos kierrosta. Kuulien halkeilu ja kuluminen epäkeskeisiksi mahdollistivat niiden pääsyn vaakaseulan läpi. Kuviossa 12 on myllyn purkupää, josta nähdään pysty- ja vaakaseula.



Kuvio 12. Myllyn purkupää.

Tutkittavaksi lähetettiin 6 erillistä näytettä prosessin eri vaiheista löydetyistä kuulista (kuvio 13). Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään halkaisijaltaan $d = 40$ mm ja $d = 50$ mm syötteeseen päätyneiden kuulien suhteellinen määrä. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös kuulien halkeamiseen johtaneita syitä mahdollisuuksien mukaan. Tästä haastavaa teki epämuodostuneiden kuulien kulumisen ennen näytteeksi päätymistä.



Kuvio 13. Jauhinkuulien materiaalitutkimuksen näytteet. (Lapin AMK 2022)

Tutkimuksessa pystyttiin erottamaan kuulat toisistaan niiden kromipitoisuuden perusteella. Tutkimuksessa todettiin alitteeseen joutuneiden kuulien olevan pääasiassa halkaisijaltaan $d = 50$ mm kuulia. Tutkittavaksi lähettyjen puolipallo-maiseksi kuluneiden kuulien todettiin olevan todennäköisesti haljenneita $d = 50$ mm kuulia (Taulukko 2).

Johtopäätöksenä todettiin, että $d = 50$ mm kuulat halkeilevat ja kuluvat epäkeskeisiksi, mikä mahdollistaa niiden pääsyn helpommin myllyn alitteeseen ja näin pidemmälle prosessiin, jossa ne aiheuttavat ongelmia. Tutkimuksesta ei käy ilmi mikä on syynä $d = 50$ mm kuulien halkeiluun.

Taulukko 2. 50 mm:n (S1) ja 40 mm:n (S2) suhteellinen osuus näytteissä. (Testausseleste: kuulamylyn kuulien analysointi 2022)

	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3	Näyte 5
Määrä (kpl)	35	35	10	16
Cr ≤ 0,20 %	33	32	9	16
Cr ≥ 0,35 %	2	3	1	0
S1 (%)	94,3	91,4	90,0	100,0
S2 (%)	5,7	8,6	10,0	0,0
Virhemarginaali (± %-yks.)	7,7	9,3	18,6	-
Max (%)	13,4	17,9	28,6	-

Tutkimuksen tulosten perusteella $d = 50$ mm kuulien tilaaminen lopetetaan ja varastossa olevien loputtua siirrytään käyttämään ainoastaan $d = 40$ mm kuulia. Olewskin yhtälön (1) mukaan tämä vaikuttaa tuotteeseen pienentämällä sen raekokoa.

Terrafamen myllyn syötteen suurin rae on kooltaan 12 mm ja tuotteen suurin raekoko on $500 \mu\text{m}$ (taulukko 1). Näillä arvoilla laskettuna kaavalla (1) optimaalinen kuulan halkaisija on $56,1$ mm, mikä on suurempi kuin käytettäväksi valittu 40 mm.

Nykyisellä kuulakoollla $d = 40$ laskettuna kaava (1) antaa myllyn tuotteen suurimmaksi raekooksi noin $80 \mu\text{m}$.

Luokittimen mitoitustietoihin perustuen voidaan siis päätellä, että nykyisin käytettävä kuulakoko $d = 40$ on liian pieni sen antaessa myllyn tuotteen suurimmaksi raekooksi noin $80 \mu\text{m}$. Huomioitavaa on vielä, että kaava (1) on suuntaa antava eikä ota huomioon esimerkiksi kiertokuorman suuruutta tai luokituksen terävyyttä, mitkä myös osaltaan vaikuttavat myllyn tuotteen hienouteen.

5.4 Partikkelikokojakaumien määrittäminen

GTK:n tutkimuslaitos tutki opinnäytetyötä varten partikkelikokojakaumat kuulamylyn syötteestä ja tuotteesta sekä luokittimen ylitteestä ja alitteesta. Partikkelikokojakauma haluttiin tietoon mahdollisten muutosten vaikutusten toteamiseen. Tuloksista saatiin myös vahvoja viitteitä luokittimen huonosta toiminnasta.

GTK:lle lähetettiin yhteensä seitsemän näytettä. Näistä neljä kappaletta oli kuulamylyn syötteestä, jotka kerättiin hihnalta eri ajankohtina. Kuulamylyn tuotteesta sekä luokittimen alitteesta ja ylitteestä jokaisesta otettiin yksi koottinäyte, joka koottiin kahdeksasta erillisestä osanäytteestä.

Näytteet suodatettiin ja kuivattiin, minkä jälkeen ne seulottiin 20, 32, 45, 63, 75, 90, 125 ja 150 μm seuloilla. Seulonnan tuloksista nähdään esimerkki kuviossa 14.



Kuvio 14. Myllyn tuotteen seulotut näytteet. (Geologian tutkimuskeskus 2022)

Taulukossa 1 on annettu seulonnan tuloksia luokittimen ylitteestä ja alitteesta sekä kuulamylyn tuotteesta. Sen perusteella alle 45 μm kokoisia partikkeleita on

ylitteessä 90,7 %, alitteessa 31,7 % ja kuulamylyn tuotteessa 40,1 %. Vastavasti 80 % luokittuneiden kappaleiden raekoot ovat 29 μm luokittimen ylitteessa, 134 μm luokittimen alitteessä ja 121 μm kuulamylyn tuotteessa.

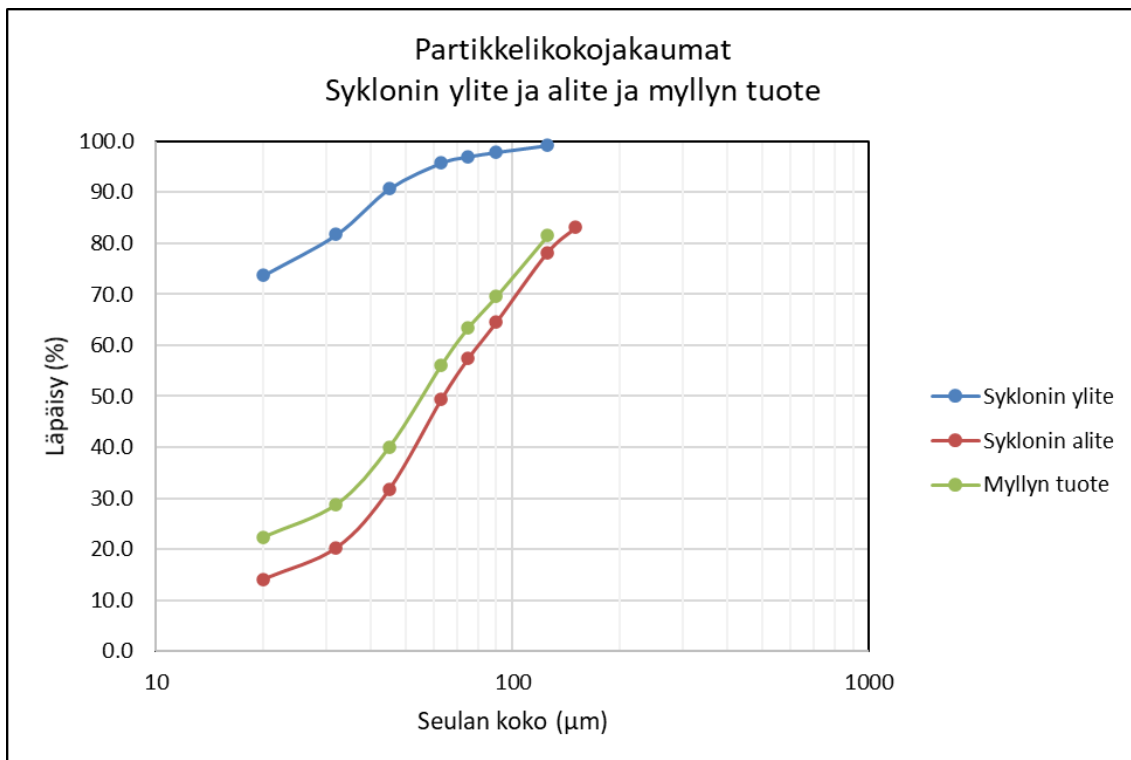
Taulukko 3. Seulonnan tuloksia luokittimen ylitteelle ja alitteelle sekä kuulamylyn tuotteelle.

Seula μm	Syklonin ylite Läpäisy %	Syklonin alite Läpäisy %	Myllyn tuote Läpäisy %
150	100.0	83.1	100.0
125	99.2	78.2	81.5
90	97.9	64.6	69.7
75	97.0	57.4	63.5
63	95.8	49.4	56.2
45	90.7	31.7	40.1
32	81.7	20.3	28.8
20	73.7	14.1	22.4
D80 (μm)	29	134	121

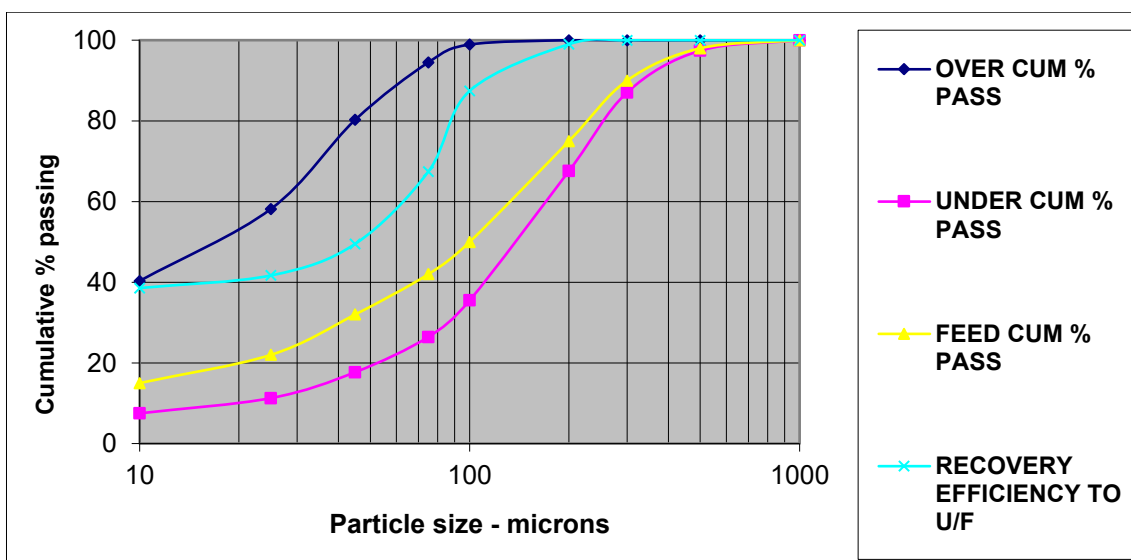
Kuviossa 15 on esitetty seulonnan tulokset ja kuviossa 16 suunnitteluarvot graafisesti. Luokittimen suunnitteluarvojen perusteella (kuvio16) havaitaan, että 45 μm raekoon määrä on noin 80 %, mikä on melkein 10 % enemmän mitä se on käytännössä. Myös myllyn tuote sekä luokittimen alite ovat suunnitteluarvoihin verrattuna liian hienoja. Tulosten perusteella voidaan päätellä kiertokuorman mukana palautuvan myllyn liian hienon raekoon omaavaa tuotetta ja tästä päätellen luokituksen toiminnan olevan huonoa. Teoria tukee päättelyä antaen kaavalla (8) taulukosta 3 otetuilla arvoilla $f = 40,1 \%$, $o = 90,7 \%$ ja $u = 31,7 \%$ kiertokuorman suuruudeksi $CL\% = 602,4 \%$. Luokittimen suunnitteluarvojen perusteella kiertokuorman pitäisi olla $CL\% = 337 \%$ (kuvio 11). Määritettyjen partikkelikokoja-kaumien ja luokituksen suunnitteluarvoja vertaamalla voidaan todeta luokituksen toiminnan olevan huonoa.

Syklonien vuoraukset ovat hyvin vanhat ja niihin on ollut pitkään vaikeuksia saada uusia. Huonon luokitustuloksen voidaan olettaa johtuvan edellä mainitusta syystä. Esimerkiksi aliteputken halkaisija vaikuttaa huomattavan paljon syklonien luokitustehoon (Lukkarinen 1985, 266). Mitä suurempi aliteputken sisähalkaisija, sitä enemmän myllyn tuotetta päätyy takaisin myllyyn. Oletettavasti aliteputken vuoraukset ovat kuluneet ja sen sisämitta on kasvanut. Tätä oletusta tukee myös

partikkelikokojakaumien avulla laskettu kiertokuorma 602,4 % luokittimen mitoitustiedoissa ilmoitetun kiertokuorman ollessa 337 %.



Kuvio 15. Jauhatuspiirin partikkelikokojakaumat (Geologian tutkimuskeskus 2022).



Kuvio 16. Luokittimen suunnitteluarvot partikkelikokojakaumille. (Terrafame Oy 2023a)

Kuulamylyn syötteen neljän näytteen partikkelikokojakaumat on esitetty taulukossa 4. Kuulamylyn syötteen raekokojakaumasta voidaan havaita sen olevan suhteellisen tasalaatuista. Tuotteeksi sellaisenaan kelpavaa raekokoa 45 µm on noin 5–10 % syötteen kokonaismassasta.

Taulukko 4. Kuulamylyn syötteen partikkelikokojakaumat neljästä erillisnäytteestä.

Seula µm	Myllyn syöte 1 Läpäisy %	Myllyn syöte 2 Läpäisy %	Myllyn syöte 3 Läpäisy %	Myllyn syöte 4 Läpäisy %
16000	98.7	98.8	98.3	98.0
14000	98.0	97.9	97.1	97.4
12500	97.2	95.8	93.6	95.7
11200	95.6	93.7	90.1	93.6
10000	93.9	91.1	83.6	90.8
9000	90.3	87.4	78.7	86.5
6700	82.7	75.0	63.6	75.2
5000	71.6	64.1	51.8	61.4
3350	60.2	53.1	41.8	49.0
2000	47.6	41.8	32.3	36.9
1600	42.7	37.3	28.5	32.7
1400	40.3	35.3	26.9	30.8
1000	35.1	30.7	23.3	26.6
630	28.6	25.3	19.1	22.0
400	23.3	20.5	15.6	18.2
250	18.5	16.4	12.6	15.0
180	16.4	14.0	10.8	13.0
125	14.1	11.7	9.1	11.2
90	12.4	9.9	7.9	9.8
63	10.9	8.6	6.8	8.6
32	8.5	6.8	5.3	6.7
D80 (µm)	6286	7626	9272	7681

5.5 Jauhatuskokeet eri kiintoainepitoisuuksilla

Kiintoainesuhteen tutkimista varten teetettiin testejä eri kiintoainepitoisuuksilla GTK:n koelaboratoriossa.

Kokeita varten näytteet murskattiin $\leq 1,5$ mm raekokoon. Näytteille suoritettiin jauhatuskokeet neljällä eri kiintoainepitoisuudella lietteen määrän pysyessä vakiona. Jauhatuskokeet tehtiin ruostumattomasta teräksestä valmistetulla laboratoriomittakaavan kuulamylyllä, jonka halkaisija oli 200 mm ja pituus 225 mm (kuvio 17). Jauhinkappaleina käytettiin ruostumattomasta teräksestä valmistettuja kuulia $d = 20$ mm ($m = 8$ kg).

Testeissä käytettiin vertailukohtana jauhatuspiirin tuotteen D80 tavoiteraekokoa $45 \mu\text{m}$. Tuloksista käy ilmi, että mitä pienempi kiintoainesuhde, sitä suurempi prosenttimäärä tuotteesta oli $<45 \mu\text{m}$ (kuvio 18). Toisaalta isommilla kiintoainesuhdeilla $<45 \mu\text{m}$ tuotteen määrä oli huomattavasti suurempi (kuvio 20). Taulukossa 5 on esitetty kiintoaineen (syöte) ja veden suhde jauhatuskokeille.

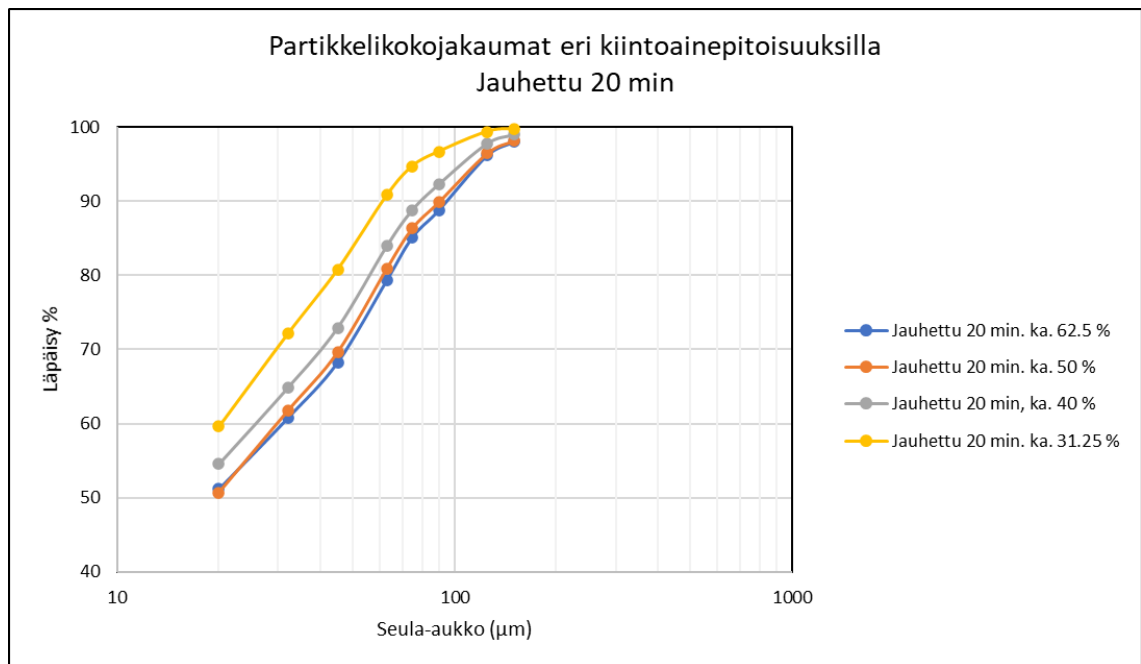


Kuvio 17. Laboratoriomittakaavan kuulamyly ja siinä käytettävät jauhinkuulat (Geologian tutkimuskeskus 2023).

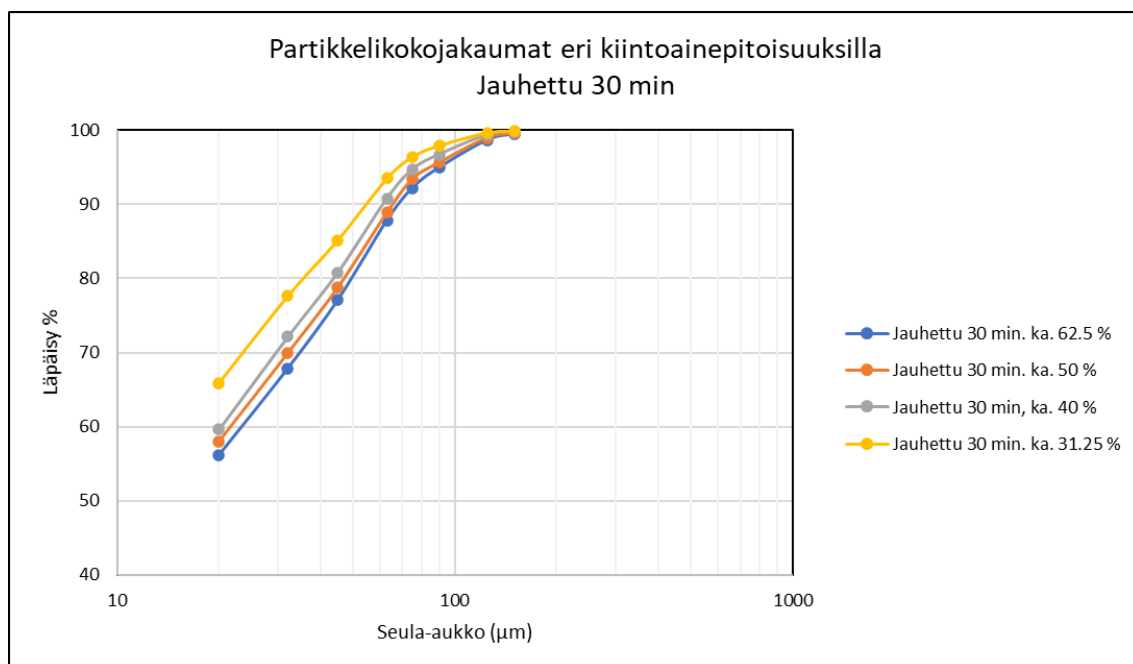
Taulukko 5. (Geologian tutkimuskeskus 2023)

syöte kg	Vesi kg	Yhteensä kg	kiintoaine m-%
1,00	0,60	1,60	62,50
0,80	0,80	1,60	50,00
0,64	0,96	1,60	40,00
0,50	1,10	1,60	31,25

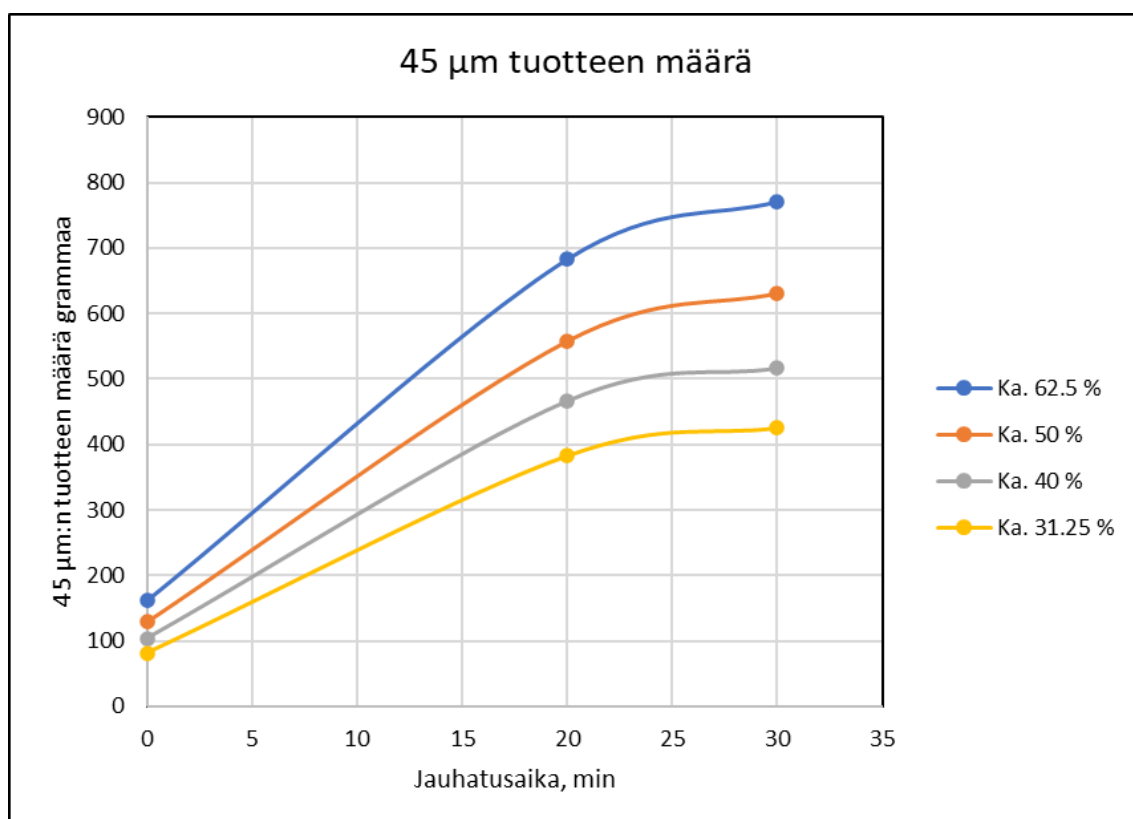
Jauhatus testeistä havaitaan pienimmällä kiintoainepitoisuudella 31,25 % olevan prosentuaalisesti eniten hienoa raekokoa (kuvio 18 ja 19), kun taas määrällisesti sitä on eniten suurimmalla kiintoainepitoisuudella (kuvio 20). Suurempi kiintoainepitoisuus siis nostaa kuulamylyn kapasiteettia.



Kuvio 18. Partikkelikokojakaumat eri kiintoainepitoisuuksilla 20 minuutin jauhatusajalla (Geologian tutkimuskeskus 2023).

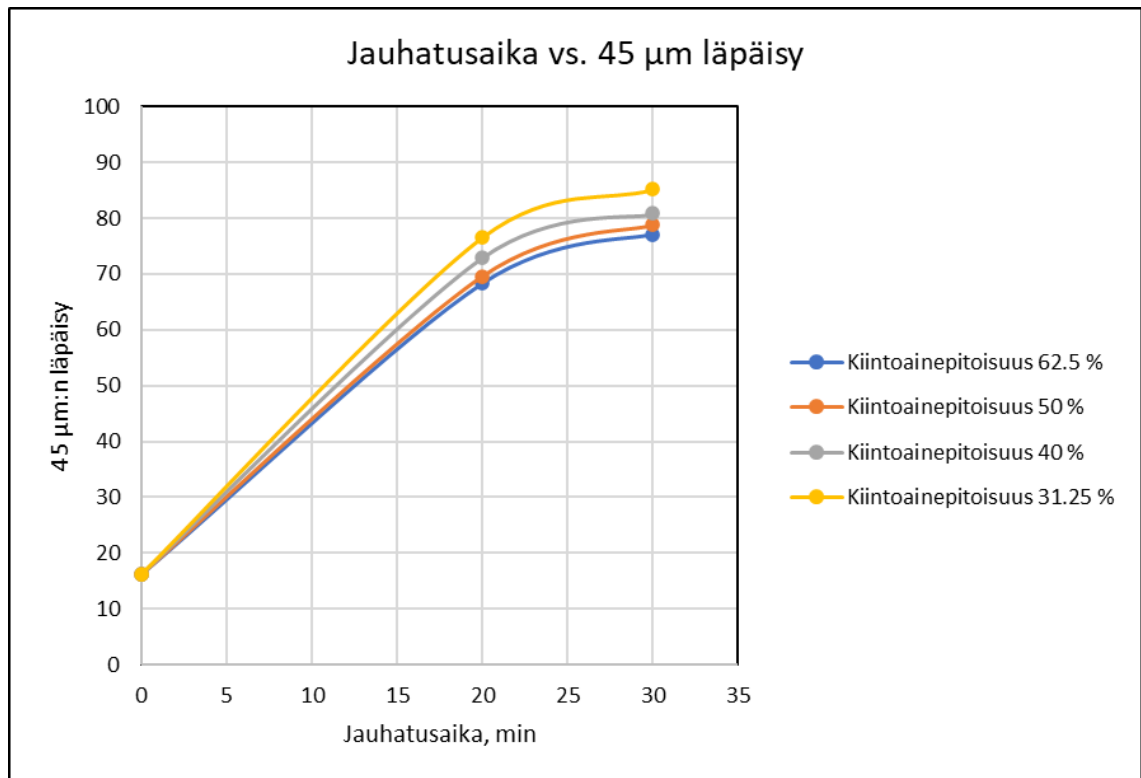


Kuvio 19. Partikkelikokojakaumat eri kiintoainepitoisuuksilla 30 minuutin jauhatusajalla (Geologian tutkimuskeskus 2023).



Kuvio 20. 45 μm tuotteen määrä verrattuna jauhatusaikaan eri kiintoainepitoisuuksilla (Geologian tutkimuskeskus 2023).

Myllyn syötteen läpimenoajaksi voidaan laskea kuulien väliin jäävän tilavuuden $5,64 \text{ m}^3$ ja luokittimen suunnittelumitoituksesta (kuvio 11) otetun luokittimen syötteen 218 m^3 arvoilla 1,55 minuuttia. Varsinaista jauhatusaikaa on hyvin vaikeaa arvioida suljetussa piirissä. Jauhatusaika sopiikin paremmin avoimen piirin tarkasteluun.



Kuvio 21. 45 µm tuotteen määrä verrattuna jauhatusaikaan eri kiintoainepitoisuuksilla. (Geologian tutkimuskeskus 2023)

Taulukko 6. (Geologian tutkimuskeskus 2023)

Jauhatus min	45 µm:n läpäisy %			
	Ka. 62.5 m-%	Ka. 50 m-%	Ka. 40 m-%	Ka. 31.25 m-%
0	16	16	16	16
20	68	70	73	77
30	77	79	81	85

5.6 Luokituksen terävyys

Arvolla $x = 45 \mu\text{m}$ ja partikkelikokojakaumien määrittämisen mukaan laskettuna luokituksen todelliseksi terävyydeksi saadaan laskettua kaavalla (9): $E = 32,2 \%$.

Vertailuna luokittimen mitoitustiedoilla lasketuilla arvoilla luokituksen terävyydeksi saadaan kaavalla (9) $E = 86,0 \%$.

Luokituksen mitoituservoihin verrattuna nykyisen luokituksen terävyyden voidaan todeta olevan kaavan (9) mukaan lähes kolmanneksen huonompi.

5.7 Pyörimisnopeus

Terrafamen arvoilla saadaan pyörimisnopeus kriittisestä n_p laskettua kaavalla (3)

$$n = 20 \text{ RPM}, D = 2,76 \text{ m ja } d = 0,04 \text{ m}, n_p = 78,0 \%$$

Pyörimisnopeuden voidaan todeta olevan normaalilla tasolla myllyjen nopeuden ollessa tyypillisimmillään 75 % kriittisestä (Lukkarinen 1985, 181).

5.8 Täyttöaste

Täynnä ollessaan Terrafamen kuulamylyn maksimi täyttöaste on 60 mm vuorauksilla kaavan (5) mukaan 24,32 %.

Kuviosta 22 voidaan havaita kuulien pinnan olevan purkuaukkoa huomattavasti matalammalla. Täyttöastetta tarkkaillaan myllyn tehonoton mukaan ja tehonoton laskiessa tietyn pisteen alle myllyä käydään täyttämässä.



Kuvio 22. Kuulamyly sisältä.

5.9 Tehonkäyttö ja kapasiteetti

Kaavalla (6) saadaan laskettua kuulakokotekijäksi $S_S = 0,1193 \text{ kW}$, jota käytetään kaavassa (7). Kaavaa (7) käytetään tehonoton laskemisessa kuulatonnia kohti (P_{KM}). Arvoilla $B = 40 \text{ mm}$, $D = 2760 \text{ mm}$, $V_p = 0,24$, $n_p = 0,78$ ja $S_S = 0,1193 \text{ kW}$

$$P_{KM} = 12,31 \text{ kW}$$

Myllyn tilavuus on $\pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times L = 61,03 \text{ m}^3$ ja jauhinkappaleiden täyttämän tilan tilavuus täyttöasteen ollessa 24,32 % on $61,03 \times 0,2432 = 14,84 \text{ m}^3$

Muut tehonkäyttöön vaikuttavat tekijät huomioiden täytyy laskea jauhinkappaleiden tiheys, jossa käytetään arvoa 7800 kg/m^3 . Kuulien välissä oletetaan olevan 38 % tyhjää tilaa (Lukkarinen 1985, 209). Edellä mainittuja arvoja käyttäen jauhinkappaleiden tiheys saadaan laskemalla $14,84 \text{ m}^3 \times 0,62 \times 7,8 \text{ t}$, jolloin tiheydeksi saadaan $4,835 \text{ t/m}^3$.

Tästä saadaan laskettua kuulien vaatima tehonotto myllyn ollessa täynnä:

$$12,31 \text{ kW} \times \left(4,835 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \times 14,84 \text{ m}^3\right) = 883,25 \text{ kW}$$

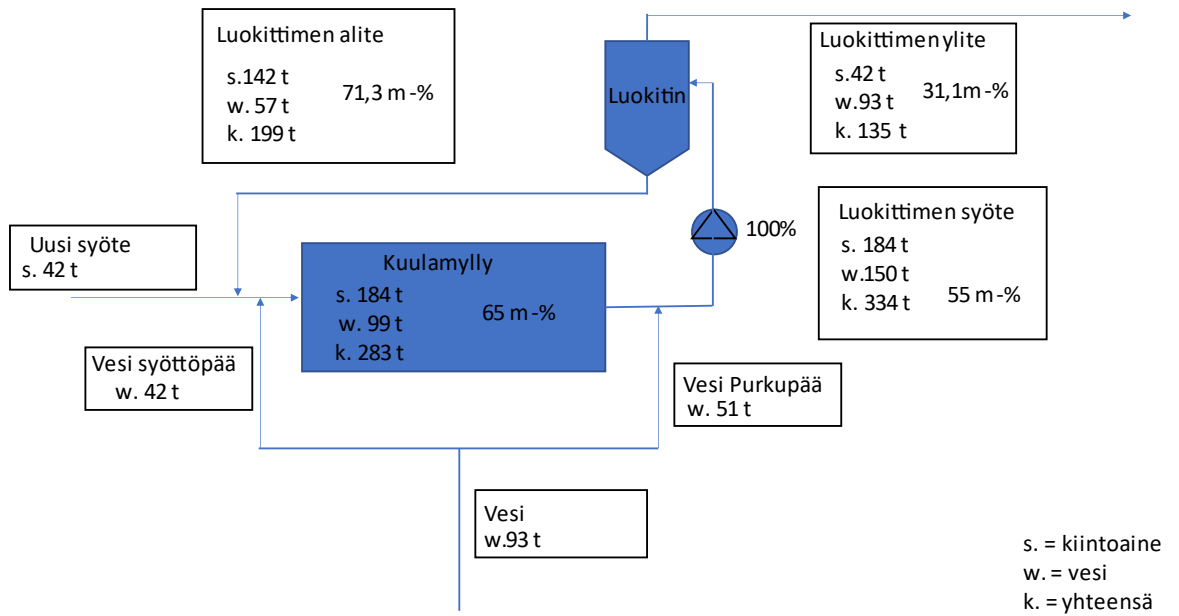
Lukema vaikuttaa oikeansuuntaiselta kuulamyllyn tehonoton vaihdellessa täyttöasteen mukaan 700–900 kilowatin välillä.

Kapasiteetin 31 t/h ja suunnitteluarvojen mukaisen kapasiteetin 42 t/h välillä voidaan laskea tehoa menevän hukkaan 26,2 %. Tämä tarkoittaa 231,4 kilowattia tunnissa, kun mylly on täynnä.

5.10 Jauhatuspiirin analysointi

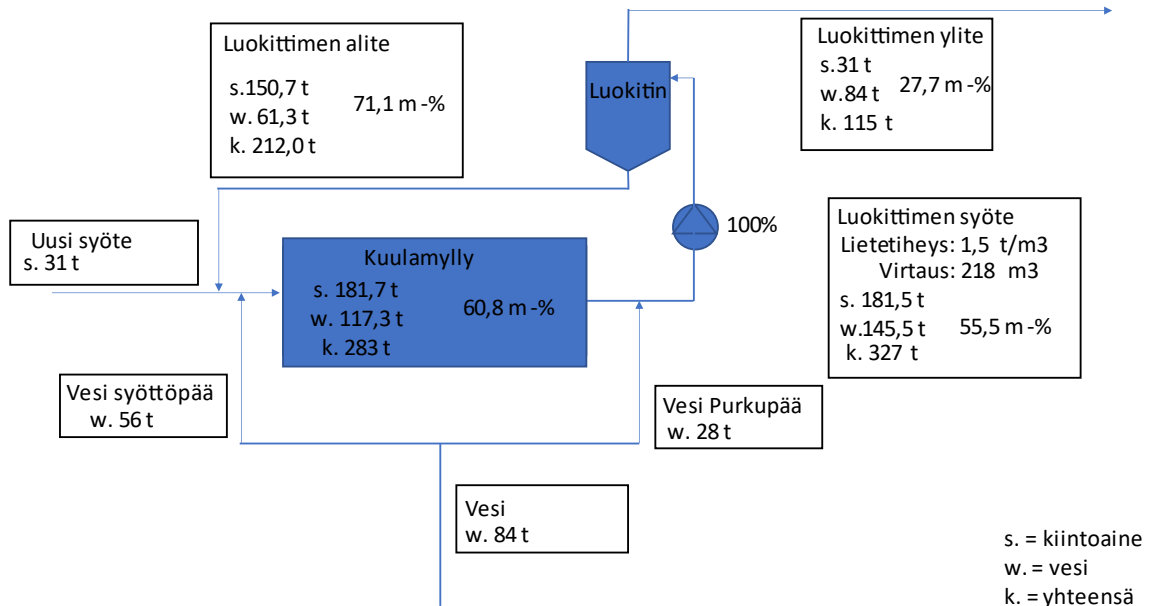
Kuviossa 23 on esitetty jauhatuspiirin kiintoaine-vesijakaumat suunnitteluarvojen pohjalta. Kuulamyllyn kiintoainepitoisuudeksi on päätetty 65 m-% pohjaten Terrafamen kuulamyllyn ajo-ohjeissa ilmoitettuun 60–70 m-% sekä jauhatusasteissa (kuvio 20) todettuun myllyn kapasiteetin nousuun suuremmilla kiintoainepitoisuuksilla.

Jauhatuspiirin suunnitteluarvot



Kuvio 23. Jauhatuspiirin tarkastelu suunnitteluarvoilla.

Jauhatuspiirin nykytilanne



Kuvio 24. Jauhatuspiirin tarkastelu nykytilanteella.

Kuviossa 24 on esitetty jauhatuksiin toimintaa nykytilanteessa, kun luokittimen syöttöpumpun on oletettu pumppaavan suunnitteluarvoissa annettu määrä 218

m³/h. Uuden syötteen sekä veden määrä on otettu nykyisistä ajoarvoista. Logiikka tässä on ollut, että jauhatuspiiriin syötettävän aineen ja siitä lähtevän aineen määrä on sama. Luokittimen syötteestä mitataan tiheyttä, jonka avulla on laskettu syötteen kiintoainemäärä käyttämällä kalsiitin tiheyttä 2,7 t/m³. Loput syötteestä on vettä. Luokittimen alitteeseen joutuu siis se osa syötteen kiintoaineesta ja vedestä mikä ei mene ylitteeseen. Kun luokittimen alitteen kiintoainepitoisuus tiedetään, voidaan laskea kuulamylyn kiintoainepitoisuus laskemalla se ja uuden syötteen määrä yhteen.

Suunnitteluarvoihin verrattuna kiintoainepitoisuudet eivät ole nykytilassa poikkeuksellisen eri tasolla. Näillä lietetiheyksillä ja luokittimen syötteen virtauksilla laskettuna kiertokuormaksi voidaan laskea 486,1 % mikä on raekokojakaumilla laskettuun kiertokuormaan 602,4 % verrattuna alhainen. Tähän eroon voi vaikuttaa joko oletetun virtauksen oikeellisuus tai lietetiheyden mittauksen epätarkkuus. Virtaus vaikuttaa kiertokuorman suuruuteen suurentamalla sitä isommilla virtauksilla. Terrafamelta ei löydy kunnollisia tietoja lietepumpusta. Jatkotarkasteluna olisi hyvä varmistaa onko pumppu sopiva kyseiseen kohteeseen. Lietetiheyden mittaus voi myös vaikuttaa kiertokuormaan suurentaen, jos se ilmoittaa todellista pienemmän lietepitoisuuden. Lietteen pumppauksessa on ollut ongelmia liian suuren kiintoainepitoisuuden takia ja pumppu ei ole jaksanut enää pumpata. Lietetiheyden mittaus perustuu putkiston läpi pääsevän säteilyn määrään ja voi olla, että syötteen partikkelikokojakauman vaihdellessa tai putken sisäpinnalle kertyneen kiintoaineen takia voi tulla mittausepävarmuuksia. Vuoro teki suuntaa antavan lietetiheyden mittauksen kalibroinnin ottamalla yhden litran näytteen lietteestä ja punnitsemalla sen todellisen painon. Tätä painoa verrattiin näytteenottohetkellä mittarin näyttämään lukemaan. Näytteen ottohetkellä mittaus näytti lukemaa 1470 g/l. Kun näyte punnittiin, se painoi 1482 g/l. Tuloksen ero mittaukseen verrattuna oli 12 g/l mistä voidaan päätellä mittauksen toimivan hyvin.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Suurin yksittäinen syy jauhatuspiirin huonoon toimintaan on luokituksen huono toiminta. Tähän johtopäätökseen viittaa suuri kiertokuorma ja luokituksen alhainen terävyys. Vaikka kiertokuorman suuruus ja luokituksen terävyys kompensoivatkin toisiaan ylijauhatuksen osalta (Lukkarinen 1985, 280), suljetussa piirissä jauhatuspiirin kapasiteetin määrittää suurimmalta osalta luokitin. Luokituksen terävyydeksi lasketun 32,2 % ja suunnittelutietojen 86 % välillä voidaan kapasiteetin laskuksi laskea 37,2 %. Suunnitellun kapasiteetin 42 t/h ja nykyisen kapasiteetin 31 t/h välinen lasku on 26,2 %. Näiden kahden luvun välistä eroa selittää osaltaan ylijauhatus, jolloin luokittimen syötteessä (taulukko 3) on enemmän hienoainesta kuin mitoitustiedoissa (taulukko 1) on ilmoitettu, jolloin sitä myös pääsee luokittimen ylitteeseen enemmän tasaten hieman luokituksen terävyyden aiheuttamaa kapasiteetin laskua. Ongelma saadaan ratkaistua vaihtamalla syklonien vuoraukset, jolloin luokituksen terävyys parantuu ja kapasiteetti kasvaa.

Kuulien päätyminen pidemmälle prosessiin todettiin todennäköisesti johtuvan $d = 50$ mm kuulista. Toimenpiteenä tehtiin $d = 50$ mm kuulista luopuminen toisessa myllyssä. Toimenpiteen jälkeen on tullut havaintoja, että kuulien määrä pidemmällä prosessissa on vähentynyt. Kuitenkin $d = 40$ mm kuula on kaavalla (1) laskettuna, luokittimen mitoitustiedoista saadun suurimman raekoon mukaan, liian pieni. Optimaalinen kuulakoko on kaavan (1) mukaan $d = 56,1$ mm ja koska kaava ei ota huomioon kiertokuormaa todellinen optimaalinen kuulakoko on tätäkin suurempi.

Teorian pohjalta myllyn täyttöaste tulisi hyvän jauhatustuloksen aikaansaamiseksi olla 30–50 %. Terrafamen myllyn maksimitäyttöasteeksi on ilmoitettu 35 %, mutta myllyn yliteputken mukaan maksimitäyttöaste on 24,32 %. Asia vaatii mahdollisesti jatkotarkastelua.

Jauhatuspiirin toiminnan analysoinnin perusteella voidaan todeta nykytilassa, että pumpun syöttömäärä on väärä syklonin suunnittelutietoihin perustuen, kun verrataan laskettua kiertokuormaa 602,4 % jauhatuspiirin tarkastelussa todettuun

kiertokuormaan 486,1 %. Tämä voi johtua viskositeetin muutoksista tai vääränlaisesta pumpusta. Asia vaatii jatkoselvitystä.

7 POHDINTA

Työn aihe meni kone- ja tuotantotekniikan lisäksi prosessitekniikan alueelle, mikä teki työstä mielenkiintoisen. Aiheena jauhatuspiiri oli haastava, koska eri tekijöitä oli niin paljon ja yhden tekijän säätö yhteen suuntaan liikautti toista tekijää toiseen suuntaan. Myös työssä käytetty teoria ja yhtälöt olivat suurimmaksi osaksi koekallisesti tehtyjä, joten absoluuttinen matemaattinen tarkkuus ei voi olla varmaa.

Työssä oppi prosessin kokonaisuuden hahmottamista ja uskon, että työstä on hyötyä myös tulevaisuudessa, sillä jauhatus on teollisuudessa hyvin yleinen yksikköprosessi. Tulevina toimenpiteinä työstä voidaan selvästi erottaa syklonien ennakoivan kunnossapidon vaativan parannusta, koska ne ovat kriittisin osa jauhatuspiirin kapasiteettia tarkasteltaessa. Kunnossapidon parantamista varmasti motivoi myös tehonottoon kantaa ottavat laskelmat. Syklonien huono toiminta aiheuttaa energiankulutuksessa suuren kuluerän jopa tässä mittakaavassa.

Jauhatuspiirin toiminnan seuranta raekokoanalyysien muodossa on myös yksi varteenotettava toimenpide, koska sillä voidaan seurata tehokkaasti esimerkiksi syklonien toimintaa. Jauhatuspiiri on käsittelemääni teoriaan pohjaten suunniteltu, eikä siitä voida kunnossa ollessaan isompia rakenteellisia tai ajoteknisiä vikoja löytää. Jatkotutkimuksena voitaisiin selvittää optimaalinen raekokojakauma jatkoprosessin kannalta ja jos raekokojakauman muuttaminen nähtäisiin tarpeelliseksi, voitaisiin tätä työtä käyttää jauhatuspiirin muutosten tekemisessä.

Työssä yllätti luokituksen suuri vaikutus jauhatuspiiriin, koska työn alussa ajattelin työn olevan suurimmalta osalta vain kuulamylyyn liittyvää. Lopussa kuitenkin osoittautui, että luokitus määrää jauhatuspiirin tahdin lähes kokonaan. Työssä oppi yleisesti mm. tutkimuksien teettämistä ulkopuolisilla tutkimuslaitoksilla ja niiden pohjalta tuotannon analysointia ja kehittämistä. Tätä opinnäytetyön tuomaa kokemusta voi käyttää myös muiden tuotannollisten ongelmatilanteiden ratkaisemisessa.

LÄHTEET

Geologian tutkimuskeskus 2022. Partikkelikokojakaumien määrittäminen kalkin jauhatuspisteessä. Tutkimusraportti. Terrafame Oy.

Geologian tutkimuskeskus 2023. Jauhatuskokeet kalkkikivellä. Tutkimusraportti. Terrafame Oy.

Lapin AMK 2022. Testausseloste: kuulamylyn kuulien analysointi. Tutkimusraportti. Terrafame Oy.

Lukkarinen, T. 1985. Mineraalitekniikka, Osa 1, Mineraalien hienonnus. Helsinki: Insinööritieto Oy.

Pöllänen, E., Kuopanportti, H. 1994. Mekaaninen prosessitekniikka. 1. Luentomoniste.

Raitolampi, R. 2008. Jauhatuspiirin toiminnan analysointi ja optimointi. Opinnäytetyö, Satakunnan ammattikorkeakoulu. Viitattu 24.3.2023.
<https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-200809303385>

Terrafame Oy 2018. Nikkeli- ja kobolttisulfaattien tuotanto: ympäristövaikutusten arviointiohjelma. Viitattu 17.3.2023.

Terrafame Oy 2023a. M-files. Tietokanta. Viitattu 24.3.2023.

Terrafame Oy 2023b. Sharepoint kuvagalleria. Viitattu 24.3.2023.

Terrafame Oy 2023c. Terrafame käynnistää uraanin talteenoton kesään 2024 mennessä. 21.12.2022. Viitattu 24.3.2023 <https://www.terrafame.fi/ajankohdista/mediatiedotteet/terrafame-kaynnistaa-uraanin-talteenoton-kesaan-2024-menessa.html>

Terrafame Oy 2023d. Yritys. Viitattu 24.3.2023 <https://www.terrafame.fi/yritys.html>

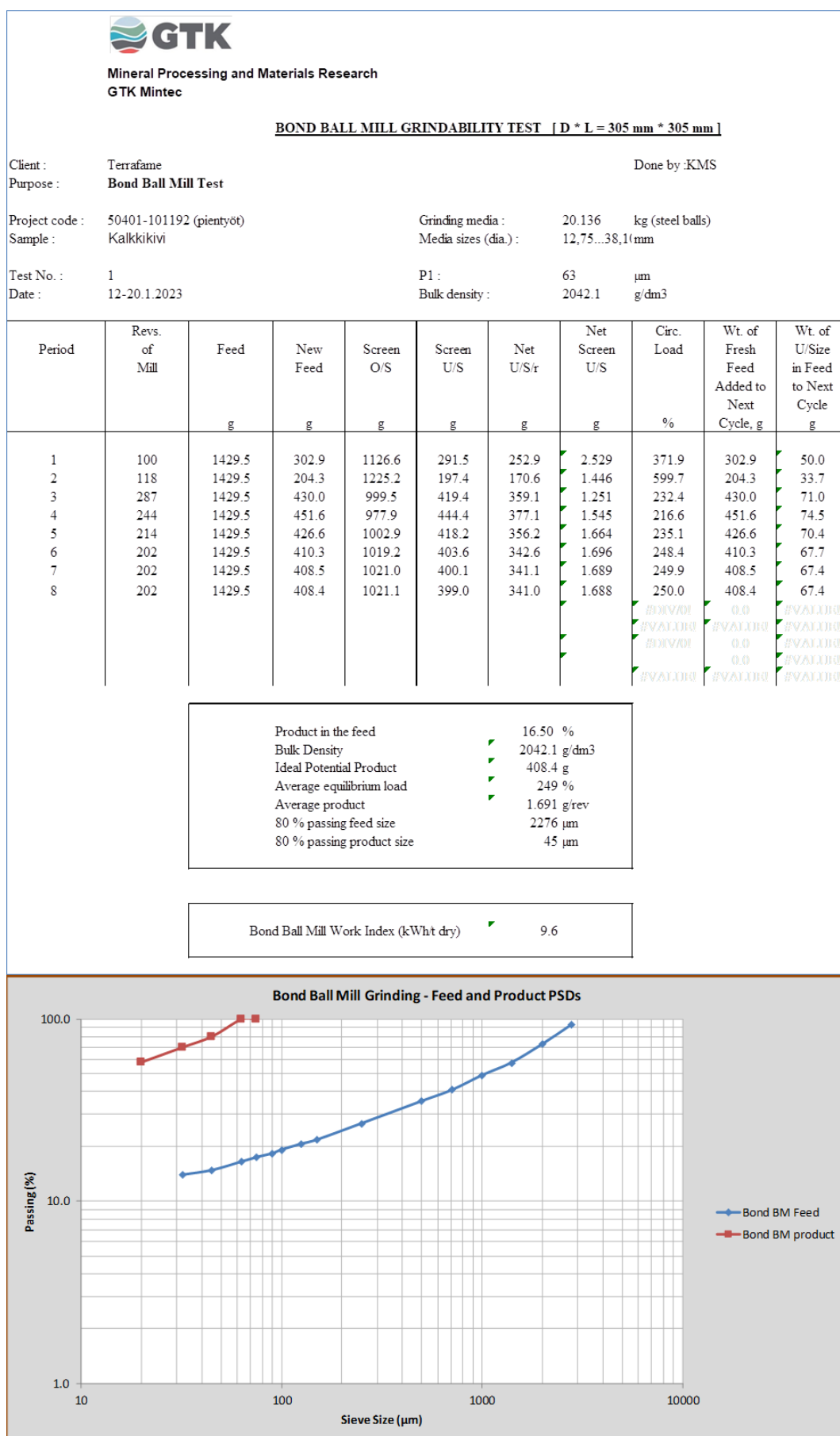
LIITTEET

Liite 1. Bondin jauhautuvuusko

Liite 2. Seula-analyysitaulukko

Liite 3. Seula-analyysitaulukko

Liite 1. Bondin jauhatuvuuskoe



Liite 2. Seula-analyysitaulukko



Kiertotalouden ratkaisut
GTK Mintec

SEULA-ANALYYSITÄULUKKO

Hankkeen nimi ja n:o : Terrafame 50401-10119

7-8.9.2022
KMS

Huom. : märkäseulonta 20µm, Ro-Tap 10 min

Näytetiedot :

Seula- aukko (µm)	Syklonin ylite			Syklonin alite			Myllyn tuote								
	Paino (g)	Lämp. (%)	Osuus (%)	Paino (g)	Lämp. (%)	Osuus (%)	Paino (g)	Lämp. (%)	Osuus (%)	Paino (g)	Lämp. (%)	Osuus (%)	Paino (g)	Lämp. (%)	Osuus (%)
150		100.0		26.0	100.0				100.0						
125	1.22	99.2	0.8	7.5	78.2	4.9	41.04	81.5	18.5						
90	2.03	97.9	1.3	20.9	64.6	13.6	26.30	69.7	11.9						
75	1.34	97.0	0.9	11.0	57.4	7.2	13.69	63.5	6.2						
63	1.88	95.8	1.2	12.4	49.4	8.0	16.26	56.2	7.3						
45	7.72	90.7	5.1	27.1	31.7	17.7	35.73	40.1	16.1						
32	13.66	81.7	9.0	17.6	20.3	11.5	24.99	28.8	11.3						
20	12.22	73.7	8.0	9.5	14.1	6.2	14.27	22.4	6.4						
-20	112.19		73.7	21.6		14.1	49.62		22.4						
Yht.	152.24		100.0	153.5		100.0	221.90		100.0						

Lask.
d 80
(µm)

29

134

121

Electronically signed / sähköisesti allekirjoitettu / Elektroniskt signerats / Elektronisk signert / Elektronisk underskrevet
https://sign.visma.net/Document-check/b555fa1-9084-4053-e65c-d11a9124f75e

VISMA Sign
www.vismasign.com

Liite 3. Seula-analyysitaulukko



Kiertotalouden ratkaisut
GTK Mintec

SEULA-ANALYYSITÄULUKKO

Hankkeen nimi ja n:o : Terrafame 50401-10119

9-21.9.2022

MPK&KMS

Huom. : Kuivaseulonta 16 mm-400 µm

Näytetiedot :

Märkäseulonta 32 µm + Rotap 10 min

Seula- aukko (µm)	Myllyn syöte 1			Myllyn syöte 2			Myllyn syöte 3			Myllyn syöte 4					
	Paino (g)	Läp. (%)	Osuus (%)	Paino (g)	Läp. (%)	Osuus (%)	Paino (g)	Läp. (%)	Osuus (%)	Paino (g)	Läp. (%)	Osuus (%)	Paino (g)	Läp. (%)	Osuus (%)
		100.0				100.0			100.0			100.0			
16000	19.0	98.7	1.3	17.50	98.8	1.2	25.4	98.3	1.7	36.0	98.0	2.0			
14000	9.5	98.0	0.7	13.70	97.9	0.9	18.2	97.1	1.2	11.5	97.4	0.6			
12500	11.8	97.2	0.8	30.80	95.8	2.1	52.7	93.6	3.5	29.6	95.7	1.6			
11200	22.2	95.6	1.6	31.40	93.7	2.1	51.7	90.1	3.5	38.3	93.6	2.1			
10000	23.9	93.9	1.7	38.60	91.1	2.6	97.4	83.6	6.5	49.9	90.8	2.8			
9000	51.7	90.3	3.6	54.80	87.4	3.7	74.4	78.7	5.0	78.0	86.5	4.3			
6700	108.7	82.7	7.6	183.50	75.0	12.4	225.7	63.6	15.1	203.6	75.2	11.3			
5000	158.7	71.6	11.1	162.30	64.1	11.0	175.8	51.8	11.7	248.2	61.4	13.8			
3350	162.4	60.2	11.4	162.90	53.1	11.0	150.5	41.8	10.0	223.2	49.0	12.4			
2000	180.2	47.6	12.6	166.40	41.8	11.2	142.70	32.3	9.5	218.1	36.9	12.1			
1600	70.0	42.7	4.9	68.00	37.3	4.6	56.40	28.5	3.8	75.5	32.7	4.2			
1400	34.1	40.3	2.4	29.60	35.3	2.0	24.70	26.9	1.6	34.4	30.8	1.9			
1000	73.9	35.1	5.2	67.30	30.7	4.5	53.60	23.3	3.6	75.0	26.6	4.2			
630	93.6	28.6	6.6	80.60	25.3	5.4	62.90	19.1	4.2	83.2	22.0	4.6			
400	75.6	23.3	5.3	70.10	20.5	4.7	52.40	15.6	3.5	69.0	18.2	3.8			
250	68.1	18.5	4.8	60.90	16.4	4.1	44.80	12.6	3.0	56.5	15.0	3.1			
180	29.7	16.4	2.1	36.50	14.0	2.5	27.20	10.8	1.8	36.9	13.0	2.0			
125	33.1	14.1	2.3	34.20	11.7	2.3	25.80	9.1	1.7	32.2	11.2	1.8			
90	24.1	12.4	1.7	25.90	9.9	1.7	17.40	7.9	1.2	24.8	9.8	1.4			
63	22.1	10.9	1.5	20.10	8.6	1.4	16.30	6.8	1.1	22.2	8.6	1.2			
32	33.3	8.5	2.3	26.00	6.8	1.8	22.20	5.3	1.5	33.8	6.7	1.9			
-32	122.0		8.5	100.90		6.8	79.80		5.3	120.6		6.7			
Yht.	1427.6		100.0	1482.00		100.0	1498.00		100.0	1800.5		100.0			

Lask.
d 80
(µm)

6286

7626

9272

7681

Electronically signed / Sähköisesti allekirjoitettu / Elektroniskt signerats / Elektronisk signert / Elektronisk underskrevet
https://sign.visma.net/!document-check/b5559a1-9084-4053-a85c-d11a912475e

VISMA Sign
www.vismasign.com