



JUHO PELTONEN

Kuulamyyllyn jauhatuksen optimointi

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA
2024

Tekijä(t) Peltonen Juhon	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä toukokuu 2024
	Sivumäärä 31 + 8	Julkaisun kieli Suomi
Julkaisun nimi Kuulamylyn jauhatuksen optimointi		
Tutkinto-ohjelma Konetekniikka		
Tiivistelmä <p>Työn tarkoituksena oli optimoida Nornickel Harjavalta Oy:n liuottamalla käytössä olevan kuulamylyn toimintaa. Kuulamylyn toimintaa oli tarkoitus säätää pyörimisnopeutta, kuulamassaa ja kuulakokoa muuttamalla. Jauhatustuloksen muutoksia seurattiin kuulamylystä haetuilla näytteillä ja saatuja tuloksia verrattiin keskenään.</p> <p>Nikkelikivi jauhetaan mahdollisimman hienoksi ylitetyyppisillä kuulamylyillä, jotta jauhettu kiviliete voidaan johtaa jatkokäsittelyyn seuraavaan prosessivaiheeseen. Jauhatustuloksella on merkittävä vaikutus seuraavien prosessivaiheiden laadukkaaseen tulokseen.</p> <p>Koeajosta saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että avoimessa jauhatuspiirissä olevan esijauhatusmylyn pyörimisnopeutta ja jauhatustehoa voidaan huomattavasti laskea ilman, että se vaikuttaa kriittisesti jauhatustulokseen. Hyötyinä jauhatustehon laskeamisesta saadaan huomattavaa sähköenergian säästöä sekä mahdollinen vuorausmateriaalin kulumisen hidastuminen.</p>		
Avainsanat kuulamyly, jauhatus, nikkelimalmit		

Author(s) Peltonen Juho	Type of Publication Bachelor's thesis	Date May 2024
	Number of pages 30 + 7	Language of publication: Finnish
Title of publication Optimization of ball mill grinding		
Degree programme Mechanical Engineering		
Abstract <p>The purpose of the thesis was to optimize the operation of ball mill in use by Normickel Harjavalta Oy leaching plant. The operation of the ball mill was supposed to be adjusted by changing rotation speed, total ball mass and ball size. The changes in the grinding result were monitored with samples taken from the ball mill and the obtained results were compared with each other.</p> <p>Nickel ore is ground as fine as possible with over-type ball mills, so that the ground ore slurry can be sent to the next process step for further processing. The grinding result has a significant impact on the quality result of the following process steps.</p> <p>From the results obtained during test run, it seems that the rotational speed and grinding power of the pre-grinding mill in the open grinding circuit can be significantly reduced without critically affecting the final grinding result. Benefits of reducing the grinding power are a considerable saving of electrical energy and possibly slowing down of wear of the lining material.</p>		
Keywords ball mill, grinding, nickel ores		

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	6
2 YRITYS	7
2.1 Nornickel Harjavalta	7
2.2 Tuotantoprosessi	8
3 KUULAMYLLYT JA NIIDEN TOIMINTA	11
3.1 Kuulamyllyn peruseriaate	11
3.2 Pyörimisnopeus	13
3.3 Täyttöaste	14
3.4 Jauhinkappaleet	14
3.5 Myllyn vuoraukset	15
4 KUULAMYLLY KM51 RAKENNE JA KÄYTTÖ	17
4.1 Kuulamyllly KM51 rakenne.....	17
4.2 Kuulamyllly KM51 käyttö	18
4.3 Kuulamylllylle syötettävä materiaali	19
5 KOEAJO	21
5.1 Koeajon tarkoitus	21
5.2 Koeajosuunnitelma.....	23
5.3 Näytteenottosuunnitelma.....	24
6 TULOKSET	27
6.1 Jauhatus tulokset koeajon erivaiheissa.....	27
6.2 Lopputulokset.....	29
7 YHTEENVETO	31
LÄHTEET	

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

NNH	Nornickel Harjavalta
KM51	kuulamylly 51
KM52	kuulamylly 52
PS51	pumppusäiliö 51
rpm	kierrosluku
n_c	kuulamyllyn kriittinen kierrosluku
V	kuulamyllyn täyttöaste
D	kuulamyllyn sisähalkaisija
d	jauhinkuulien halkaisija
H	jauhinkuulien yläpinnan etäisyys myllyn vuorauksesta
d_b	syötteen suurin rae
d_u	tuotteen suurin rae

1 JOHDANTO

Opinnäytetyönaiheena on Nornickel Harjavalta Oy:n liuottamalla käytössä olevan kuulamylllyn toiminnan optimointi, tarkoituksena kartoittaa kuulamylllyn nykyinen jauhatustaso ja säätää mylllyn toimintaa paremmaksi, suurimpana tekijänä halutaan parantaa mylllyn vuorauksen kestoa eli vähentää tarpeetonta vuorauksen kulumista.

Kuulamylllylle syötettävä materiaali on raaka-ainepohjan muutoksen seurauksena muuttunut partikkelikooltaan huomattavasti suuremmaksi, jonka vuoksi jauhatustehoa on jouduttu nostamaan. Kuulamylllyn vuorauksien kestävyudessa on tullut samaan aikaan suuria ongelmia, vuoraus ei kestä enää entiseen malliin ja tähän haetaan osaltaan parannusta optimoimalla kuulamylllyn toimintaa.

Työssä kartoitettiin käytössä olevaan kuulamylllyyn riittävä kuulapanos, sekä muutettiin kuulakokoa osaltaan suuremmaksi nykyiseen verrattuna, jotta pystytään murskaamaan isokokoinen terävsärmäinen kivisyöte pois kuluttamasta mylllyn vuorausta. Edellä mainittujen muutosten lisäksi on tarkoitus laskea mylllyn pyörimisnopeutta joka osaltaan vaikuttaa vuorauksen kulumiseen. Pyörimisnopeutta lasketaan suunnitelman mukaisesti ja jauhatusnäytteiden avulla todetaan jauhatustulos.

Tavoitteena on laskea mylllyn pyörimisnopeutta, jotta vuorauksen kulumista voidaan vähentää kuitenkin niin että haluttu jauhatustulos saavutetaan. Toissijaisena hyötynä voidaan saada huomattavaa sähköenergian säästöä.

2 YRITYS

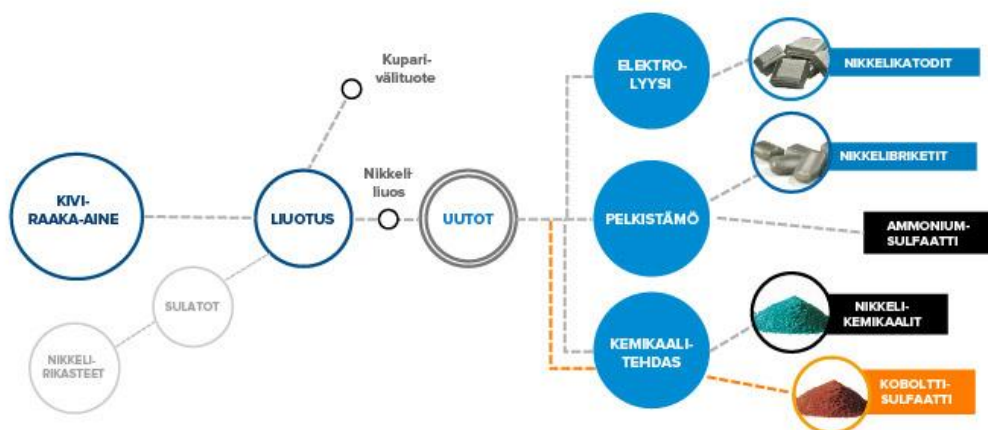
2.1 Nornickel Harjavalta

Nornickel Harjavalta Oy toimii osana venäläistä Nornickel-konsernia, joka kuuluu maailman suurimpiin nikkelin- sekä palladiumin tuottajiin. Yrityksellä on kaivos-, sulatto ja jalostuslaitoksia Norilskin ja Talnakhin alueilla Siperiassa, sekä Kuolan niemimaalla. Yhtiön liikevaihto vuonna 2021 oli 17,9 miljardia Yhdysvaltain dollaria, josta NNH:n osuus oli noin 1,2 miljardia euroa. (Nornickel Harjavalta Oy, 2023; Nornickel, 2023; Kauppalehti, 2023)

Konsernin Suomen tuotantolaitos sijaitsee Harjavallan suurteollisuuspuistossa ja työllistää noin 300 henkilöä. NNH:n nikkelijalostamon tuotteita ovat nikkelikatodit, nikkelibriketit, nikkelpulveri, nikkelisulfaatti ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), nikkelihydroksidi ($\text{Ni}(\text{OH})_2$), nikkelihydroksikarbonaatti ($\text{Ni}(\text{HCO}_3)_2$), kobolttisulfaatti ($\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) sekä ammoniumsulfaatti ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). Tehtaan nikkeliuotanto ylsi uuteen ennätykseen vuonna 2020 ollen 63 352 tonnia. (Nornickel Harjavalta Oy, 2023)

2.2 Tuotantoprosessi

Nornickel Harjavalta Oy tuotanto jakautuu neljään eri osastoon: liuottamo, pelkistämö, elektrolyysi ja kemikaalitehdas. Alla olevassa kuvassa NNH tuotantoprosessin osastot ja lopputuotteet jaoteltuna.



Kuva 1. NNH tuotantoprosessi. (Nornickel Harjavalta Oy, 2023)

Koko jalostusprosessi alkaa liuottamolta, jossa tehtaalle saapuvat raaka-aineet liuotetaan vesiliuokseen jatkojalostusta varten. Raaka-aine eli nikkelikivi jauhetaan kuulamyllyissä, jonka jälkeen jauhatusvesi erotaan kivilietteestä. Kiviliete liuotetaan atmosfäärireaktoreissa hapen ja rikkihapon avulla. Atmosfääripiirin läpi kulkenut kiintoaine ohjataan edelleen paineliuotukseen autoklaaveihin, jossa korkean lämpötilan ja paineen avulla saadaan liuotettua lähes kaikki nikkeli vesiliuokseen sekä eroteltua epäpuhtauksia kuten rauta ja kupari. (Nornickel Harjavalta Oy, 2023.)

Nikkeliraakaliuos pumpataan edelleen jatkokäsittelyyn uuttoihin, jossa liuos puhdistetaan epäpuhtauksista. Uuttoon tuleva liuos jäädytetään ja pestään kerosenilla, jolla estetään vieraiden orgaanisten sekä kiintoaineiden pääsy uuttoprosessiin. Osa nikkeli raakaliuoksesta johdetaan kalsiumuuttoon, jossa liuoksesta uutetaan pois epäpuhtauksia, kuten esimerkiksi kalsium, kupari, rauta ja mangaani. Käsittelyn jälkeen liuos pumpataan kobolttiuuttoon. Kobolttiuutossa liuoksesta poistetaan kobolttia, rautaa, kuparia, sinkkiä ja mangaania. Uuttaminen tapahtuu uuttokennoissa, joissa nikkeli-
raa-

kaliuos kulkee vastavirtaan uuttoliuokseen nähden. Epäpuhtaudet siirtyvät uuttoliuokseen ja nikkeliraakaliuos puhdistuu. Puhdistusten jälkeen nikkeliliuos pumpataan edelleen jatkokäsittelyyn elektrolyysiin ja pelkistämölle. Uutossa nikkeliraakaliuoksesta eroteltu koboltti ohjataan jatkopuhdistukseen ennen pumppausta kemikaalitehtaalle kobolttisulfaatin valmistukseen. (Nornickel Harjavalta Oy, 2023.)

Pelkistämöllä nikkeliliuoksesta valmistetaan nikkelibrikettejä sekä nikkelipulveria. Nikkeliliuoksen vetytelkistys tapahtuu panoksittain autoklaaveissa korkeassa paineessa sekä lämpötilassa vetykaasun avulla. Pelkistyksessä syntynyt metallinen nikkelipulveri erotetaan liuoksesta laskeuttamalla ja suodattamalla. Nikkelipulveri kuivataan ja siirretään pulverisiiloon briketointia varten tai pulveripakkauksen siiloihin odottamaan pakkausta. Pulveri briketoidaan koneellisesti ja typpisintrataan uuneissa, jonka tarkoituksena on muun muassa lujittaa brikettejä kuumennuksen avulla. Sintratut briketit pakataan ja toimitetaan asiakkaille. Nikkelitelkistuksen sivutuotteena syntynyt ammoniumsulfaattiliuos puhdistetaan nikkelistä saostamalla. Saostuksen jälkeen puhdistettu liuos kiteytetään ja kuivataan myytäväksi tuotteeksi lannoitekäyttöön. (Nornickel Harjavalta Oy, 2023.)

Elektrolyysissä valmistetaan katodinikkeliä elektrolyyttisesti. Valmistuksessa käytetään electrowinning-menetelmää, jossa tasavirta syötetään lyijyanodin kautta elektrolyyttiin ja edelleen nikkelikatodille, johon nikkeli siirtyy nikkeliliuoksesta sähkövirran avulla. Nikkeliliuos eli katolyyttiliuos syötetään diafragmaussin sisään, johon nikkelikatodi on laskettu kasvamaan. Nikkeli-ionit pelkistyvät liuoksesta katodin pinnalle sähkövirran avulla. Elektrolyysi altaiden kasvuaika on noin seitsemän vuorokautta, mutta kasvuaikaan kuitenkin vaikuttavat virran suuruus, virtahyötysuhde ja virtapiirissä olevien altaiden määrä. Katodinikkelilevyt siirretään leikkaamolle, jossa tehdään leikkaus-, pakkaus- ja lastaustyöt. (Nornickel Harjavalta Oy, 2023.)

Kemikaalitehtaalla valmistetaan epäorgaanisia suoloja: sulfaatteja, hydroksideja ja hydroksidikarbonaatteja sekä kobolttisulfaattia. Jokaiselle tuotteelle on omat tuotantolinjansa. Nikkelisulfaattilinjoilla valmistuu STD (standardi)- ja EN (electroless nickel) laatuista nikkelisulfaattikiteitä. Sulfaattilinjalla liuosta kiteytetään haihduttamalla liuosta jatkuvatoimisessa kiteytysprosessissa. Kiteet kuivataan, seulotaan, varastoidaan siiloihin ja pakataan asiakkaille. Jatkuvatoimisella hydroksidikarbonaattilinjalla nikkeli saostetaan liuoksesta soodalla. Saostuksessa syntynyt sakka suodatetaan, pestään ja kuivataan. Valmis tuote varastoidaan siiloihin ja pakataan asiakkaalle. Kobolttisulfaattikide valmistetaan nikkelisulfaatin tapaan kiteytysprosessissa. (Nornickel Harjavalta Oy, 2023.)



Kuva 2. NNH:n lopputuotteita. (Nornickel Harjavalta Oy, 2023)

3 KUULAMYLLYT JA NIIDEN TOIMINTA

3.1 Kuulamyllyn peruseriaate

Jauhatuksella tarkoitetaan karkean aineksen hienontamista haluttuun raekokoon. Jauhatus suoritetaan erityyppisissä myllyissä, joka perustuu pyörimisliikkeeseen, jossa myllyssä olevat jauhinkappaleet saatetaan jauhatukseen sopivaan liikkeeseen. Jauhautuminen perustuu iskuihin, puristukseen ja hiertoon, jotka syntyvät käytettävien jauhinkappaleiden vierintä- ja putoamisliikkeestä. Jauhatukselle tyypillistä on korkea energian kulutus, joka koostuu itse jauhatustyöstä ja siitä syntyvästä lämpöenergiasta sekä voimansiirron häviöistä. (Geologisen tutkimuskeskuksen www-sivut, 2023.)

Kuulamyllly voi olla joko ylite- tai arinamyllly. Jauhatus tapahtuma kuulamylllyssä on sekä isku- että hiehojauhatusta kuulien käsitellessä jauhettavaa materiaalia kuulamasan välissä ja vuorausta vasten. (Lukkarinen, T. 1984, Mineraalitekniikka.)

Kuulamylllyn syötön määrä voi riippua monesta eri tekijästä, mutta erityisesti jauhettavan malmin laadusta. Jos kuulamyllly on avopiiirissä, voidaan siihen syöttää malmia enemmän kuin suljetussa piiirissä toimivaan myllyyn. Kuulamylllyn nopeus on normaalisti 65 – 80% kriittisestä. Tyypillisesti suhteellinen nopeus pienenee mylllyn läpimitan kasvaessa, mutta kehänopeus kasvaa. (Lukkarinen, T. 1984, Mineraalitekniikka.)

3.2 Pyörimisnopeus

Kuulamyllyn kriittinen kierrosluku on pyörinnän minuuttinopeus, jolla jauhinkappaleet juuri ja juuri pysyvät myllyn kehällä irtautumatta siitä painovoiman vaikutuksesta myllyn pyöriessä tasaisella kierrosluvulla.

Kuulamyllyn kriittinen kierrosluku (n_c) riippuu myllyn vaipan sisähalkaisijasta (D) ja jauhinkappaleiden eli kuulien halkaisijasta (d) mm.

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{D-d}} \text{ 1/min}$$

(Geologisen tutkimuskeskuksen www-sivut, 2023.)

Käytännössä jos mylly pyörii hitaasti, jauhinkappaleet irtoavat kehältä aikaisemmin kuin nopeasti pyörivässä myllyssä. Nopeasti pyörivässä myllyssä malmin jauhatukseen käytetään suhteellisen paljon iskuja, kun taas hitaasti pyörivässä tapahtuu hiertoa. Karkea jauhatus vaatii mieluummin iskuja ja hieno jauhatus taas hiertoa.

(Lukkarinen, T. 1984, Mineraalitekniikka)



Kuva 3. Jauhinkappaleiden ja jauhettavan materiaalin käyttäytyminen myllyn sisällä erilaisilla kierrosnopeuksilla. (Geologisen tutkimuskeskuksen www-sivut, 2023.)

3.3 Täyttöaste

Täyttöasteella V tarkoitetaan myllyn sisällä olevan kuulapanoksen määrää suhteessa vuoratun myllyn sisätilavuuteen. Täyttöaste voidaan määrittää Bondin kaavalla.

(Lukkarinen, T. 1984, Mineraalitekniikka.)

$$V = 113 - 126(H/D)$$

H = kuulien yläpinnan etäisyys myllyn ”katosta” metreinä (m).

D = myllyn sisähalkaisija (m).

Myllyn täyttöaste tulee olla noin 30-50% hyvän jauhatustuloksen aikaan saamiseksi.

(Geologisen tutkimuskeskuksen www-sivut, 2023.)

3.4 Jauhinkappaleet

Myllyssä tehtävä jauhatustyö tehdään jauhinkappaleiden avulla. Mitä karkeampaa ja kovempaa jauhettava malmi on, sitä painavampia jauhinkappaleiden tulee olla. Kuulamylyn kuulakoko on aina valittava jauhettavan syötteen karkeuden ja halutun tuotteen hienouden perusteella. Esijauhatusmyllyssä käytetään yleensä suurempia kuulia, kun taas sekundaarimyllyssä käytetään pienempiä kuulia. (Lukkarinen, T. 1984, Mineraalitekniikka.)

Kuulakoon valintaan vaikuttaa syötettävän materiaalin koko, jonka perusteella kuulakoko voidaan laskea Olewskin kaavaa käyttäen.

$$\varnothing(mm) = 6 \cdot \sqrt{d_b} \cdot \log d_u$$

d_b = syötteen suurin rae (mm)

d_u = tuotteen suurin rae (um)

Myllyyn täytettävä kuulapanos pyritään aina kokoamaan useista erikokoisista kuulista, yleisesti käytäviä kuulakokoja ovat esimerkiksi 30, 60, 80, 100, ja 150 mm kuulat. Kuulien materiaali on yleensä valurautaa, Ni-hard-valurautaa tai valssattua terästä. Käytettävän materiaalin kovuus vaikuttaa jauhinkappaleiden kulumisnopeuteen.

(Lukkarinen, T. 1984, Mineraalitekniikka.)

3.5 Myllyn vuoraukset

Kuulamyllyt vuorataan sisäpuolelta kulutusta kestävällä materiaalilla myllyn rakennesien kulumisen estämiseksi ja energian siirtämiseen jauhinkappaleisiin sekä jauhetta-vaan materiaaliin. Vuorauksessa käytettävät materiaalit ovat yleensä valurautaa, terästä tai kumia. (Lukkarinen, T. 1984, Mineraalitekniikka.)

Vuoraus sisältää yleensä vaipan vuorauspalkit sekä niiden kiinnitykseen tarkoitettut pultit, mutterit ja aluslevyt sekä vuorauksen päätylevyt kiinnitystarvikkeineen. Tärkeimpiä vuorausmateriaalin valintaa vaikuttavia tekijöitä malmin karkeus ja kuluttavuus, myllyn nopeus, jauhatusavoite, myllyn tyyppi ja jauhatusapa sekä koko ja rakenne. (Lukkarinen, T. 1984, Mineraalitekniikka.)



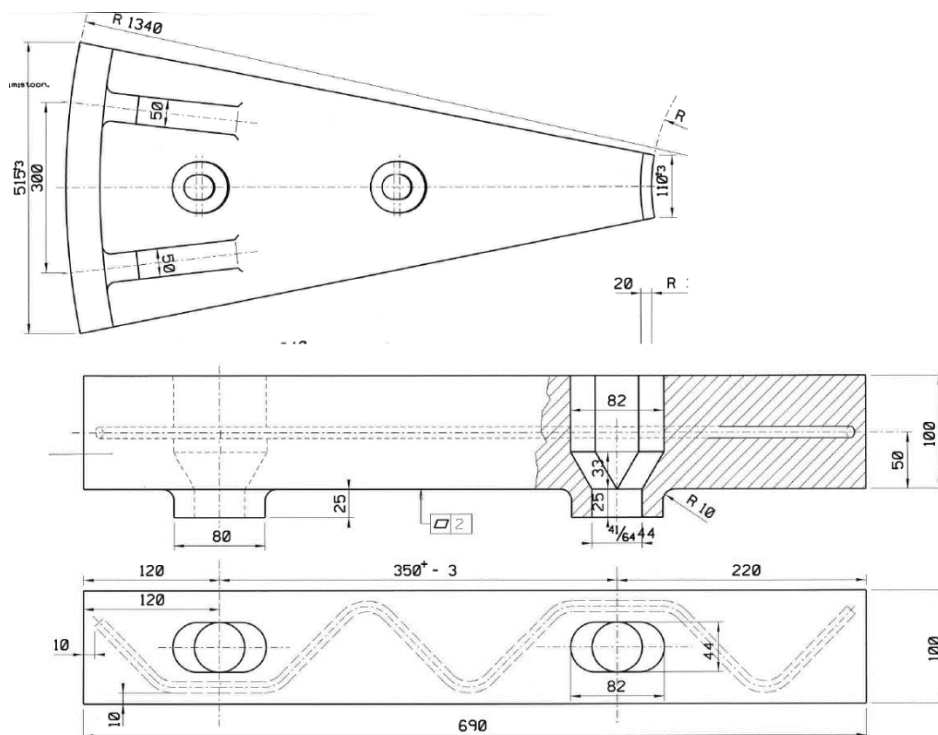
Kuva 4. Kuulamyllyn päätyvuoraus

Jauhettavan aineen kuluttavuus riippuu sen mineraalien kovuudesta ja raemuodosta. Kova ja teräväsärmäinen kappale naarmuttaa ja kuluttaa vuorausmetallia helposti, mikäli käytettävä metalli on sitä pehmeämpää. (Lukkarinen, T. 1984, Mineraalitekniikka.)

Vuorauskappaleiden kuluminen kiihtyy sitä enemmän mitä suurempi myllyn vaipan ja myllyssä olevan kuorman välinen nopeusero on. Nopeasti pyörivässä myllyssä vuoraus kuluu nopeammin kuin hitaasti pyörivässä, vaikka kuluminen laskettaisiin suhteessa jauhettua malmitonnia kohti. Edellä mainittu ilmiö johtuu kuorman liukumisesta suhteessa myllyn vaippaan. (Lukkarinen, T. 1984, Mineraalitekniikka.)

Ylitetyyppisessä myllyssä syöttöpäädyn vuoraus kuluu karkean malmin vaikutuksesta nopeammin kuin poistopäädyn. Kuulamyllysten päätyvuorauksissa on yleensä nostopalkit, jotka nostavat jauhinkappaleita sekä jauhettavaa materiaalia ylemmäs kehää pitkin mahdollistaen pienemmän kierrosnopeuden käyttämisen. Jonka ansiosta säästetään energiaa ja vuorauksen kulumista.

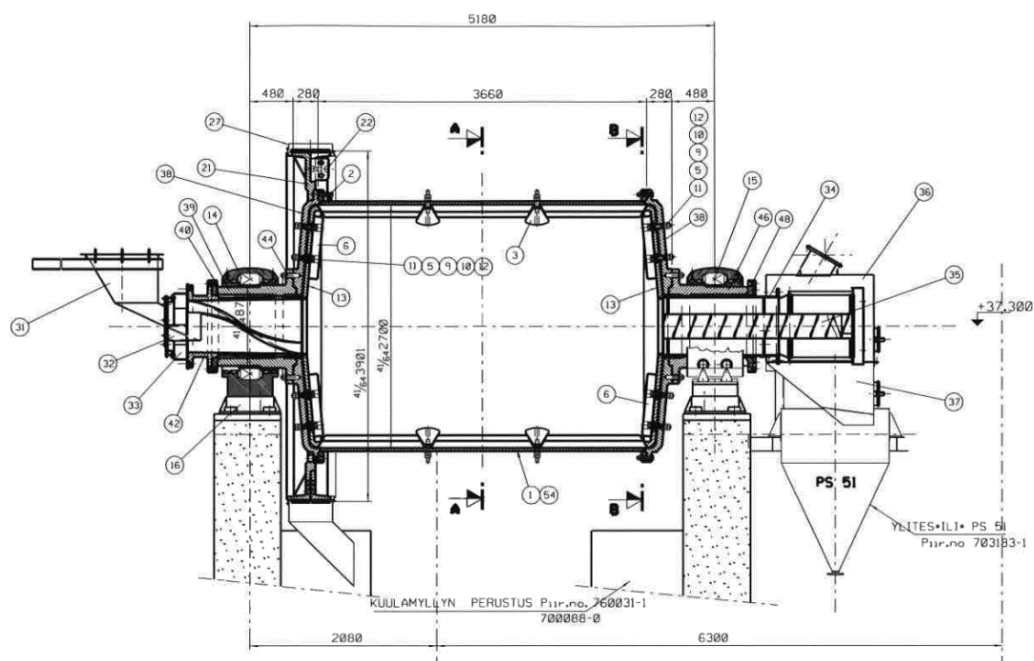
(Lukkarinen, T. 1984, Mineraalitekniikka.)



Kuva 5. Kuulamylllyn päädyn kolmiomallisen vuorauspalan ja nostopalkin piirustus

4 KUULAMYLLY KM51 RAKENNE JA KÄYTTÖ

4.1 Kuulamyly KM51 rakenne



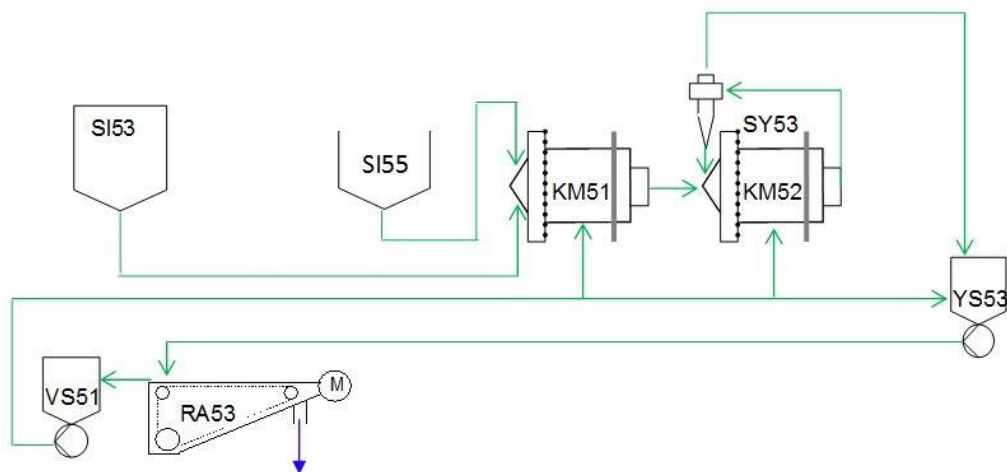
Kuva 6. Kuulamyly KM51 rakennekuva

Kuulamyly KM51 on kaulalaakereilla tuettu ylitetyyppinen kuulamyly, joka on otettu käyttöön Harjavallassa 1995. Kuulamyly on kuitenkin iältään huomattavasti vanhempi, sillä se on hankittu käytettynä.

Kuulamylyyn halkaisija on 2700 mm ja pituus 3600 mm. Moottorina käytetään ABB 355 kW, 1465 r/min, moottorin kierrosnopeus on säädettävissä portaattomasti taajuusmuuttajalla. Voimansiirto sähkömoottorilta kuulamylyä pyörittävälle pinion-akselille välitetään Valmet S2G-355ZWH vaihteistolla, jonka välityssuhde on 8,133. Kuulamylyyn pyörimisnopeus on välillä 13-18 rpm ja teho noin 150-250 kW.

Kuulamyllyssä on valettu metallivuoraus, vuoraus koostuu vaipan eli lieriön palkeista, jotka tuetaan paikalleen kiilasegmenteillä sekä päädyn kolmio- sekä kulmapaloilla. Lisäksi molemmissa päädyissä on 16 kappaletta nostopalkkeja, jotka on kiinnitetty päädyistä vuorauspulteilla.

4.2 Kuulamylly KM51 käyttö



Kuva 7. SU-liuottamon jauhatuspiiri

Kuulamyllyt KM51 ja KM52 sijaitsevat tehtaassa SU-liuottamolla. Myllyt ovat tyypiltään identtiset hammaskehää lukuun ottamatta, jälkimmäiseen on vaihdettu suorahampainen hammaskehä kokonaisuudessaan kunnossapitona. Kuulamyllyjä ajetaan normaalisti sarjassa, poikkeuksena huolto- ja korjaustyöt, jolloin käytössä on vain toinen kuulamylly.

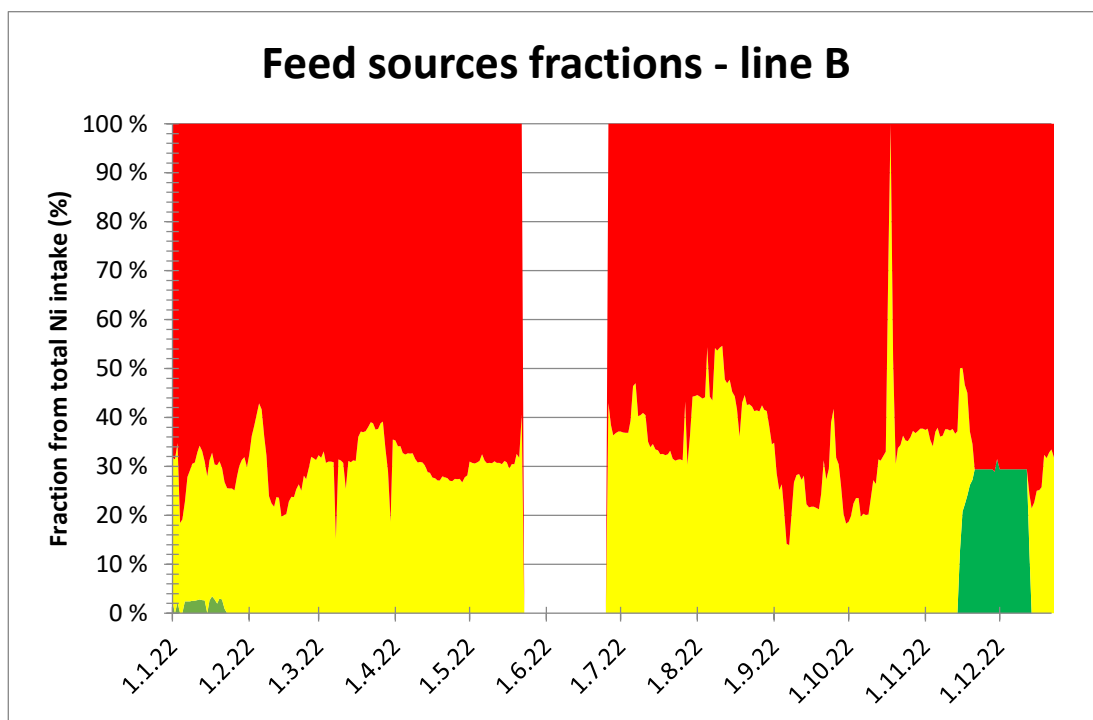
Kuulamylly KM51 käytetään esijauhatusmyllynä, johon raaka-aine syötetään ja josta jauhettu kiviliete pumpataan suoraan kuulamylly KM52 syöttösuppiloon. Kuulamyllyssä KM52 on käytössä sykloni, jonka avulla erotellaan kivilietteen karkein osuus takaisin kuulamyllyyn uudestaan jauhattavaksi ja ylite johdetaan jatkokäsittelyyn prosessiin.

Käytännössä jauhattava raaka-aine syötetään hihnakuljettimella kuulamyllyn KM51 syöttösuppiloon ja syöttökäyrään, josta syöttöholkin spiraali kuljettaa sen myllyyn sisälle. Jauhettu kiviliete poistuu myllystä ylitetyyppisesti poistopään holkin ja edelleen

seulan läpi pumppusäiliön kannesta sisään. Pumppusäiliön pumpulla kivivesiliete pumpataan eteenpäin KM52:seen.

4.3 Kuulamylylle syötettävä materiaali

Kuulamylylle syötetään kahta eri raaka-ainetta, noin suhteessa 40/50. Raaka-aineet ovat samasta mineralogiasta mutta koostumukseltaan hyvin erilaisia. NN-kivi on vaahdotuksen tuote, eli hyvin hienoa pulverimaista kiveä, joka ei käytännössä vaadi paljoa jauhatusta. Norilskin kivi on taas hyvin suuri jakeista, valanteista karkeasti murskattua kiveä. Norilskin kiven koko vaihtelee 25 – 100 mm halkaisijaltaan, eli käytännössä kyseessä on käytössä oleville kuulamylyille jopa liian suuri syöte, joka ä vaatisi esimurskauksen. Kappaleet ovat hyvin teräväsärmäisiä ja materiaali on kovaa. (Jääskeläinen, E. 2017, NNH Regulation of KOLA Matte Pilot testing)



Kuva 8. Erilaisten raaka-aineiden syöttösuhteet prosessiin (karkea raaka-aine kuvattuna keltaisella värillä)

Teräväsärmäinen, koostumukseltaan kova ja suurikokoinen kivisyöte luo osaltaan suuren kulutuksen ja rasituksen myllyn vuoraukselle. Vuorauksen kestävyys kannalta

on tärkeää varmistaa, että kuulien iskuvoima riittää rikkomaan kivisyötteen, eikä kivisyöte jää pyörimään myllyyn. (Lukkarinen, T. 1984, Mineraalitekniikka.)



Kuva 9. Karkean raaka-aineen kappaleita

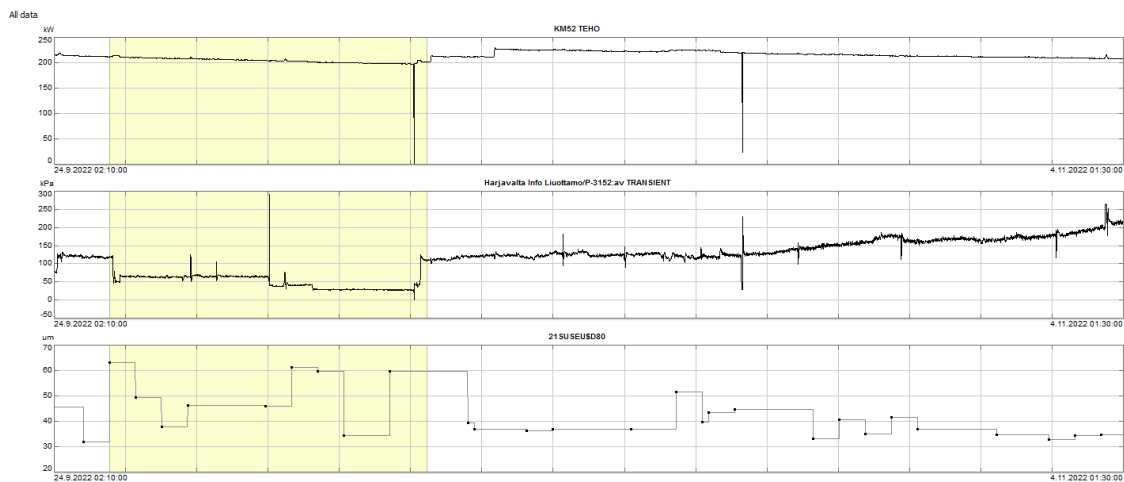


Kuva 10. Hienojakeisempaa raaka-ainetta

5 KOEAJO

5.1 Koeajon tarkoitus

Koeajon tarkoituksena oli tutkia, millainen vaikutus ilman sykklonia käytettävän esijauhatuskuulamylyn jauhatustehon laskemisella on jauhatustulokseen. Ennaltaan oli tiedossa, että ilman sykklonia ajettaessa ylitetyyppisestä kuulamylystä pääsee aina huonosti jauhattua karkeaa materiaalia eteenpäin, vaikka kuulamylyä ajettaisiin täydellä teholla. Kuvasta 11. on havaittavissa kuulamylyn jauhatustulos ilman sykklonia keltaisella alueella korostettuna sekä sykklonin ollessa käytössä.



Kuva 11. Kuulamylyn KM52 jauhatustulos D80 (μm) ilman sykklonia sekä sykklonin kanssa.

Käytössä olevassa jauhatuspiirissä on ajossa kuitenkin kaksi kuulamylyä sarjassa, joista jälkimmäisessä on käytössä sykkloni, jolla karkea materiaali saadaan palautettua takaisin jauhatukseen. Tästä syystä haluttiin tavoitella tilannetta, jossa ensimmäistä myllyä käytettäisiin niin sanotusti esijauhatusmyllynä, jolta ei haluta vielä hienojauhatustulosta vaan karkean kiven murskaaminen kustannustehokkaasti.

Hyötyjä joita jauhatustehon laskemisella haetaan, vuorauksen kulumisen hidastaminen ja energian säästö.

Koeajossa on tarkoitus laskea kuulamylyn pyörimisnopeutta asteittain. Alimmalla tasolla pyörimisnopeutta lasketaan noin 30 prosenttia alaspäin tähän asti normaalisti käytössä olleesta nopeudesta. Jotta jauhinkuulien iskuvoima riittää murskaamaan kuulamylyyn syötettävän materiaalin myös hitaammalla pyörimisnopeudella, lisätään kuulamylyyn isompia jauhinkuulia noin seitsemän tonnia. Koeajon aikana seurataan kuulamylyn tehoa ja sen käyttäytymistä, tarkoituksena varmistaa, että kuulamylyn teho pysyy tasaisena eikä piikittele, jolloin jauhettava materiaali murskaantuu eikä jää pyörimään kuulamylyyn.

Kuolan kivelle vaadittava kuulakoon laskukaava perustuu syötettävän raaka-aineen suurimpaan raekokoon (80mm) ja halutun tuotteen suurimpaan raekokoon (50 μm).

Laskukaavana aikaisemmin esitetty Olewskin kaava.

$$kuulakoko(mm) = 6 * \sqrt{80} * \log 50 = 91,7mm$$

(Lukkarinen, T. 1984, Mineraalitekniikka.)

5.2 Koeajosuunnitelma

Kuulamylyn laskennallista täyttöastetta nostettiin, jotta varmistetaan riittävä kuulamäärä ja päästään suositellun täyttöasteen alarajan (30%) yläpuolelle. Kuulien lisäyksen jälkeen täyttöasteeksi saatiin laskemalla noin 31 prosenttia. Mittaukset tehtiin kuulamylyn sisällä mittaamalla rullamitalla kuulien tason yläpinnasta kohtisuoraan vuokraukseen pintaan. Kuulamylyn sisäläpimitta selvitettiin piirustuksista.

Kuulamylyn täyttöaste on aikaisemmin määritetty silmämääräisesti, jolloin täyttöaste on vaihdellut huomattavasti riippuen täyttöasteen arvioijasta. Kuulamassa on ajoittain ollut huomattavasti liian pieni, jonka on voinut todeta kuulamylyn tehosta.

$$V = 113 - 126(H/D)$$

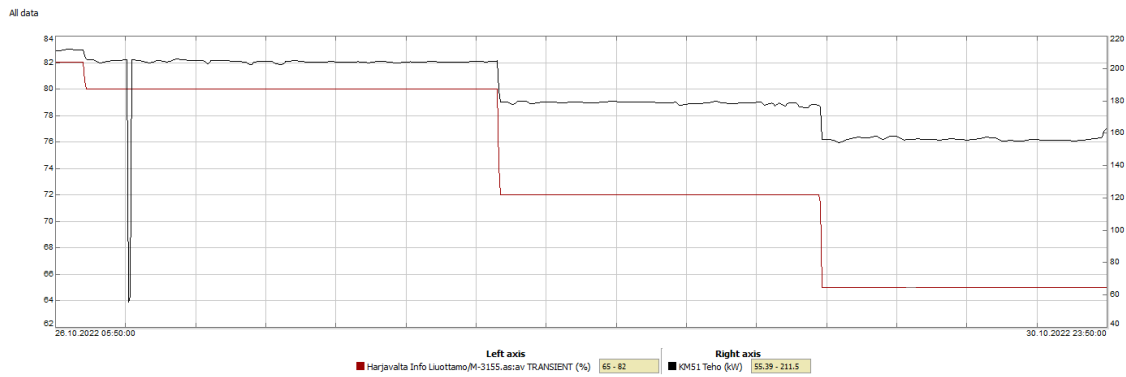
H = kuulien yläpinnan etäisyys myllyn ”katosta” metreinä (m)

D = myllyn sisäläpimitta (m)

$$V = 113 - 126(1,75m / 2,7m) = 31,3 \%$$

Taulukko 1. KM51 koeajosuunnitelma 2022

pvm	nopeusohje	rpm	nc	teho (kW)
26.10 06.00 ->	80%	16,8	63,3	202
28.10 06.00 ->	72%	15,2	57,3	178
29.10 18.00 ->	65%	13,6	51,2	155



Kuva 12. Kuulamyly KM51 koeajon aikaiset parametrit (nopeusohje ja teho)

5.3 Näytteenottosuunnitelma

Koeajon alkamisen jälkeen sekä aina parametrin muutoksen jälkeen kuulamylyyn toiminnan annetaan tasaantua riittävän kauan, jotta näytteet ovat vertailukelpoisia sekä tasalaatuisia. Käytännössä parametrinmuutoksen ja toiminnan tasaantumisen jälkeen haetaan useampi näyte riittävin väliajoin, jotta saadaan vertailukelpoisia näytteitä riittävästi.

Näytteet haetaan kuulamyly KM51 jälkeiseltä pumppusäiliön PS51 pumpulta. Ennen näytteen hakemista varmistetaan, että olosuhteet jauhatuspiirissä ovat tasaiset, esimerkiksi mahdolliset kivensyöttökatkot tai muut häiriötilanteet. Mahdollisimman edustavan näytteen saamiseksi kivivesilietettä juoksutetaan hetki ennen kuin näyte otetaan astiaan. Näyteastioiden kanteen merkataan päivämäärä ja kellonaika, jolloin näyte on haettu.

Näytteet analysoitiin NNH:n laboratoriossa Beckman coulter LS 13 320 XR partikkelikokoanalysointilaitteella. Laite soveltuu näytteen raekoon määrittämiseen raekokoalueella 0,4 – 2000 µm.

Laitteen laserilla tuotetaan monokromaattista valoa, joka johdetaan peilien avulla mittakennon läpi. Mittakenno on lasi-ikkunoilla varustettu kammio, jossa näytesuspensio kulkee. Valon törmätessä liuoksessa oleviin näytepartikkeleihin se sirtoaa. Sirontakulma on riippuvainen partikkelin koosta, mitä suurempi sirontakulma

sitä pienempi partikkeli.

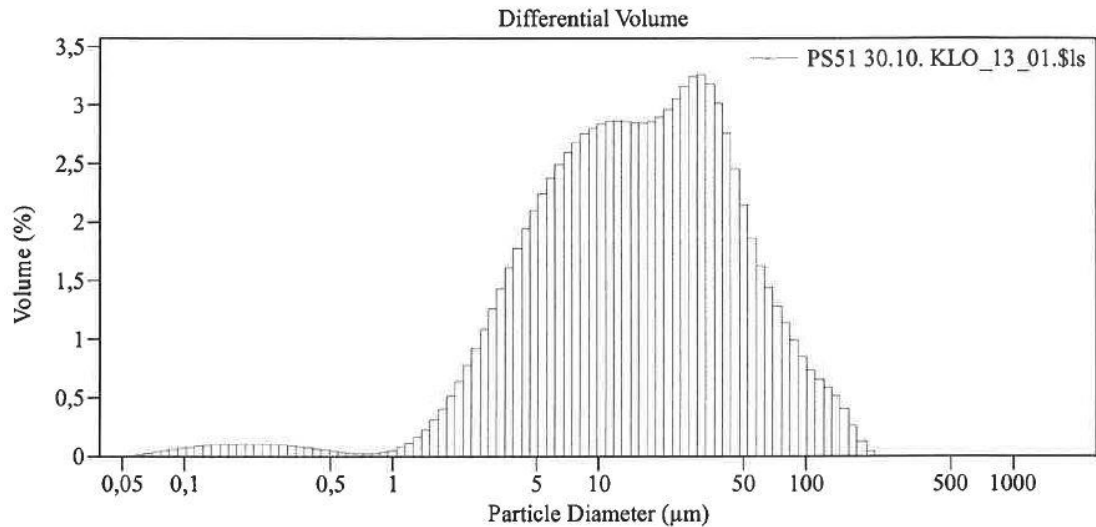
Mittakennon jälkeen on detektori, jolla mitataan valon intensiteetti eri sirontakulmissa. Detektorin vasteesta pystytään laskemaan eri partikkelikokojen osuus näytteessä erilaisilla sirontateorioilla.

Näytesuspensio muodostetaan sekoittamalla mittaussäiliöön, näyte ja mahdollinen lisäaine keskenään laitteen näyteastiassa. Laite kierrättää analysoitavaa näytesuspensiota mittauskyvetin kautta. Tarkkojen tulosten saamiseksi näytteen pitää olla hyvin homogenisoitu ja agglomeraattivapaa. Laite sisältää myös ultraäänilähteen, jolla voidaan edistää suspension muodostumista ja hajoittaa heikkoja agglomeraatteja.

(Kalliovaara, E. (2019), NNH COULTER LS 13 320 KÄYTTÖ)

Analysaattori jakaa tulokset neljään eri sarakkeeseen, D10, D50, D90 ja D80. Näistä useimmiten seurataan arvoja D90 ja D80, joiden tuloksille on asetettu raja-arvo, jolloin jauhatustasoa pidetään riittävän hyvänä. D80 tapauksessa asetettu raja-arvo on 37 μ m tai alle.

Jokaisesta näyteämpäristä analysoitiin partikkelikoko kolmesta eri pisteestä, jotta saatiin mahdollisimman edustava tulos. Näytettä annostellaan laitteeseen kerrallaan vain noin ruokalusikallinen. Jokaisen näyteämpäriin näytteistä laskettiin keskiarvo, joiden perusteella pystyttiin vertailemaan arvoja.



Kuva 13. partikkelikokojakauma

Partikkelikokojakauman diagrammista on helppo havainnoida, paljonko minkäkin kokoluokan partikkelia näytteestä löytyy. Yläpuolella olevasta diagrammista voidaan havaita, että suurin osa näytteen partikkeleista on koko luokaltaan alle 50 µm. Diagrammista pystyy myös todentamaan kaikista karkeimman osuuden määrän, joka yleensä jauhatustuloksessa kiinnostaa. Otettujen näytteiden partikkelikokojakaumien diagrammeissa ei ollut havaittavissa suuria eroja, toki jokaisessa näytteessä on pieniä eroja.

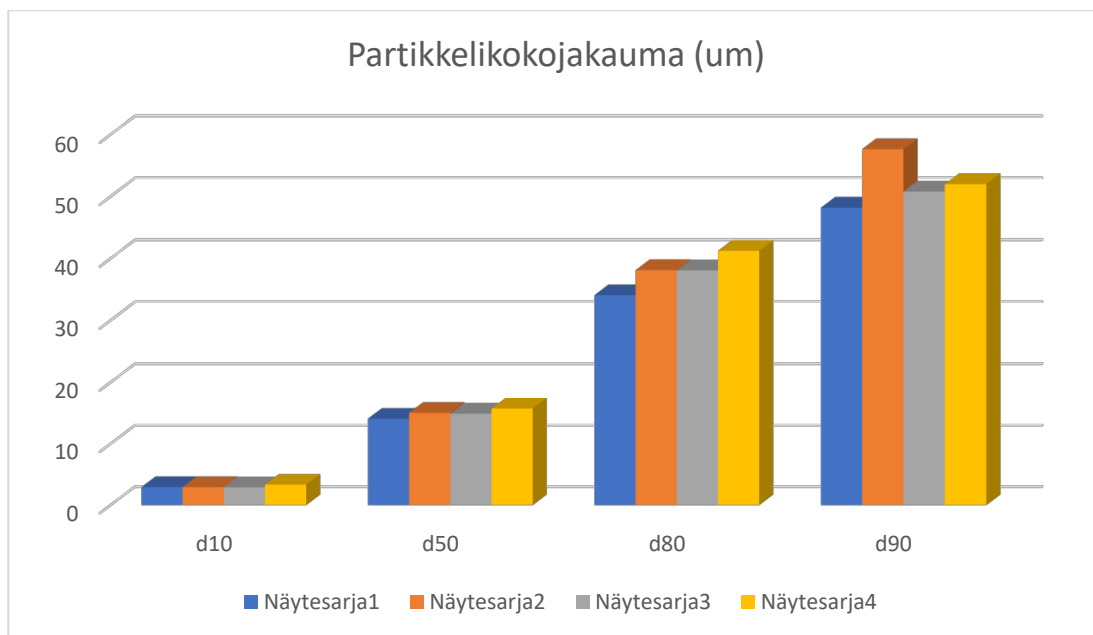
Karkein partikkeli aiheuttaa useimmiten prosesseissa suurimmat ongelmat ja sen osuus on tärkeä tietää. Karkein jae saadaan melko hyvin eroteltua takaisin jauhatusprosessiin syklonin avulla, jonka toiminnan tehokkuutta eli erottelukykyä on hyvä tarkastella juuri edellä mainitusta diagrammista.

6 TULOKSET

6.1 Jauhatustulokset koeajon erivaiheissa

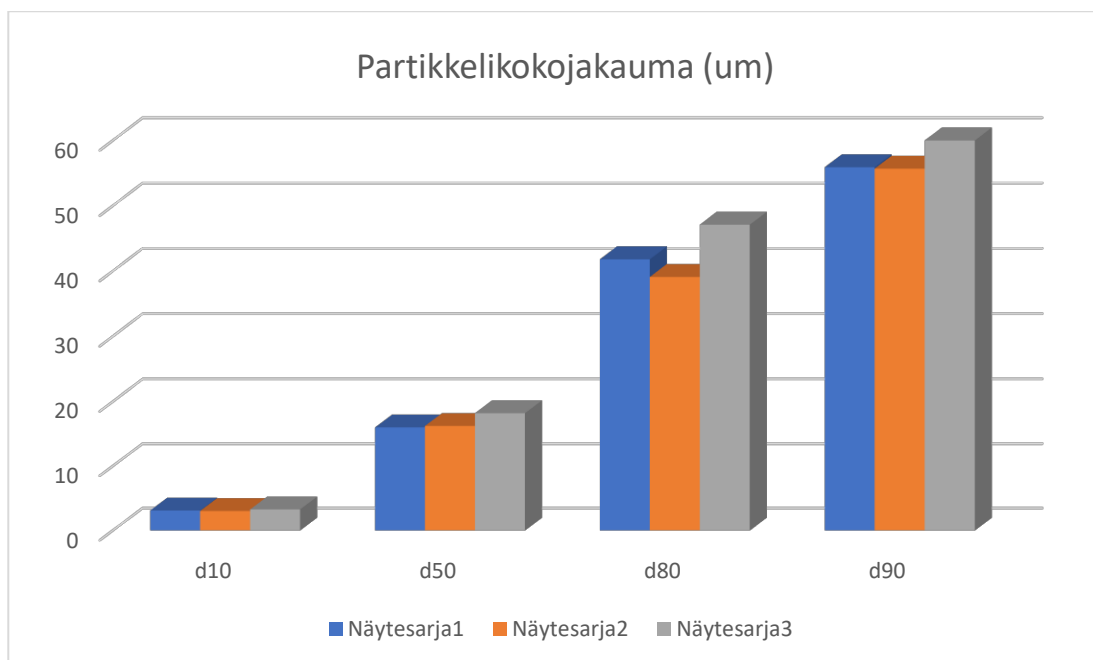
Jauhatuspiiristä haettiin näytteet näytteenottosuunnitelman mukaisesti koeajon aikana kuulamylllyn eri nopeusohjeilla. Näytteet analysoitiin ja niistä laskettiin keskiarvot eri nopeusohjeille, joista koottiin taulukko havainnollistamaan tuloksia.

Nopeusohjeella 80% haettiin neljä kappaletta näytteitä, joista jokaisesta analysoitiin partikkelikoko kolmesta eri pisteestä. Analysoituja näytteitä saatiin siis yhteensä 12 kappaletta, joista laskettiin keskiarvo.



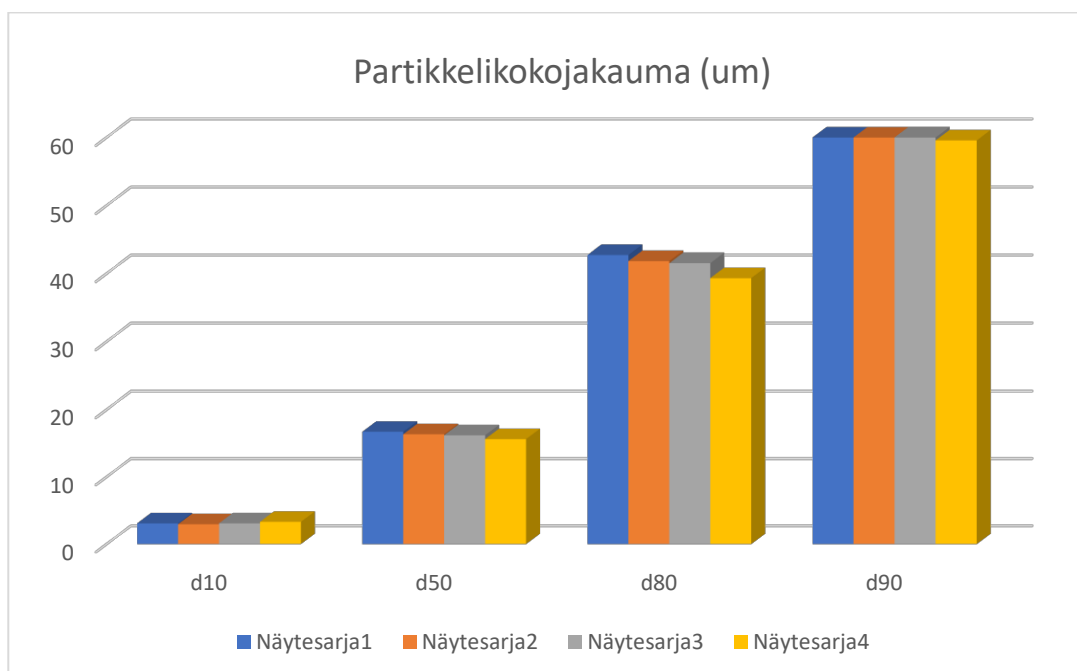
Kuva 14. Partikkelikokojakauma 80% nopeusohjeella.

Nopeusohjeella 72% haettiin kolme kappaletta näytteitä, joista jokaisesta analysoitiin partikkelikoko kolmesta eri pisteestä. Analysoituja näytteitä saatiin siis yhteensä 9 kappaletta, joista laskettiin keskiarvo.

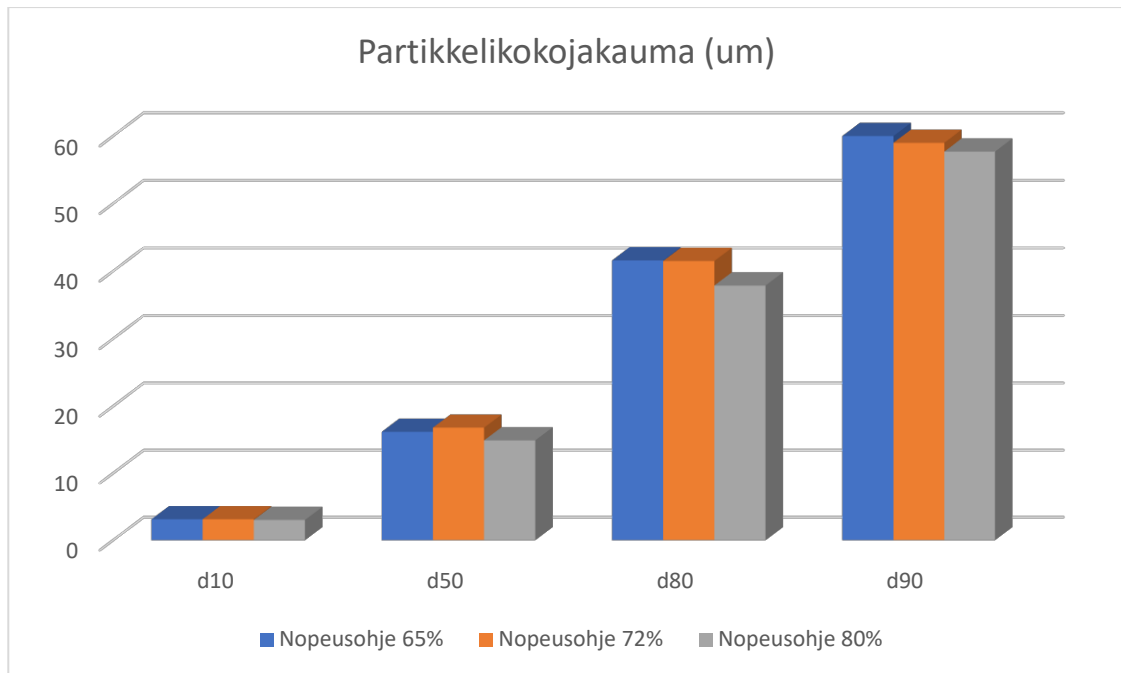


Kuva 15. Partikkelikokojakauma 72% nopeusohjeella.

Nopeusohjeella 65% haettiin neljä kappaletta näytteitä, joista jokaisesta analysoitiin partikkelikoko kolmesta eri pisteestä. Analysoituja näytteitä saatiin siis yhteensä 12 kappaletta, joista laskettiin keskiarvo.



Kuva 16. Partikkelikokojakauma 65% nopeusohjeella.



Kuva 17. Partikkelikokojakaumien keskiarvot kuulamylyn erinopeusohjeilla

6.2 Lopputulokset

Tuloksista on havaittavissa, että jauhatustulos muuttuu hienommaksi kuulamylyn nopeutta eli jauhatustehoa nostamalla. Jauhatustulos paranee merkittävästi, kun kuulamylyn nopeusohje nostetaan tasolle 80 prosenttia. Alemmilla nopeuksilla erot tuloksissa eivät ole enää merkittävän suuria.

Partikkelikokojakauman D90 muutos, kun nopeusohje lasketaan tasolta 80% tasolle 65% kuvasta 16. tarkasteltuna on 57,7 – 63,7, jolloin muutos on noin 10%.

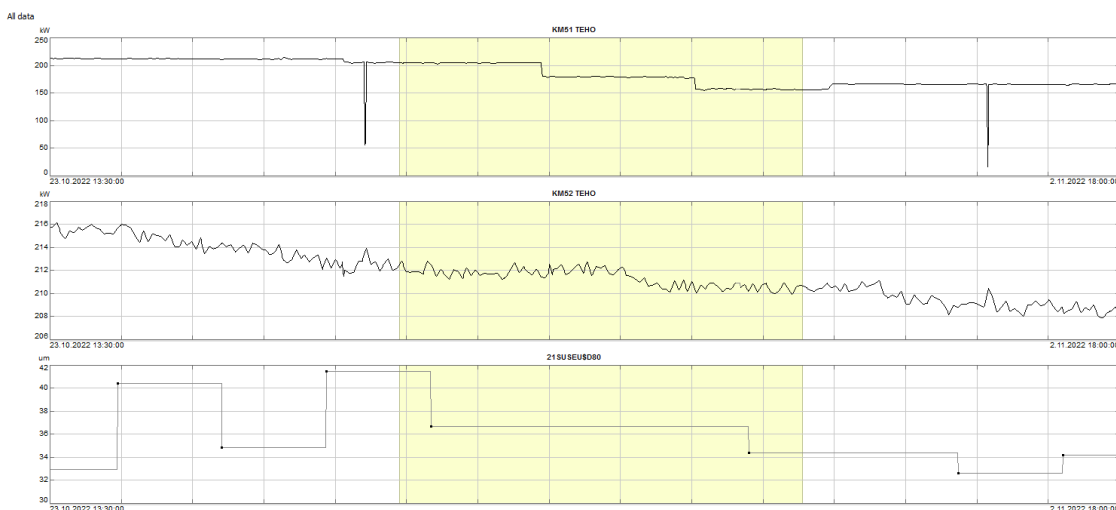
Partikkelikokojakauman D80 muutos on vastaavasti kuvasta 16. tarkasteltuna on 37,9 – 41,6, jolloin muutos on noin 9%.

Kuulamylyn KM51 jauhatustulos heikkenee siis noin 10% kun kuulamylyn jauhatustehoa lasketaan 200 kw teholta tasolle 155 kw, joka vastaa kuulamylyn tehossa noin 25% laskua.

Kyseisessä jauhatuspiirissä kuulamylyjä ajetaan sarjassa, jolloin esijauhatusmyllyltä KM51 ei ole vielä tarvetta saada mahdollisimman hienoa jauhatustulosta, vaan hienojauhatus hoidetaan jälkimmäisellä kuulamylyllä KM52, johon jauhattukiviliete johdetaan. Tässä tapauksessa jauhatustehoa voidaan jakaa kuulamylyjen kesken, jolloin on järkevämpää jakaa tehonkäyttöä myös jälkimmäiseen kuulamylyyn, jolla on tarkoitus suorittaa hienojauhatusta suljetussa piirissä.

Jauhatuspiirin jälkimmäisestä kuulamylystä KM52 otettiin myös koko koeajon ajan jauhatusnäytteitä normaaliin tapaan. Kyseinen näyte otetaan automaattisella näytteenottimella tietyin väliajoin, joten kyseessä on niin sanottu vuorokausinäyte, josta saadaan keskimääräinen jauhatustulos koko vuorokauden osalta. Näyte analysoidaan samalla laitteella ja tulokset ovat täysin vertailukelpoisia.

Jälkimmäisen hienojauhatuskuulamylyyn KM52 olosuhteet ja syklonin parametrit pidettiin vakioina koko koeajon ajan. Vuorokausinäytteiden tuloksissa ei havaittu koeajon aikana, eikä sen jälkeen merkittäviä muutoksia, vaikka esijauhatuskuulamylyyn jauhatusteho laskettiin alimmalle koeajon tasolle ja pidettiin siellä myös koeajojakson jälkeen.



Kuva 18. Kuulamylyyn KM52 jauhatusteho ja partikkelikokoanalyysi koeajon aikana.

Sähköenergian säästöä saavutettiin keskimäärin noin 70 kilowattia tunnissa, kun kuulamylyn jauhatusteho laskettiin koeajon alimmalle nopeusohjeelle. Kuulamylyn käyttövuorokaudet vuodessa ovat keskimäärin 340 vuorokautta. Sähköenergian säästöä syntyy vuodessa noin 30% kuulamylyn kokonaiskulutukseen verrattuna.

7 YHTEENVETO

Lopputuloksena todettiin, että esijauhatuksessa käytettävän kuulamylyn KM51 jauhatusteho voidaan laskea pysyvästi alimmalle portaalle, jota koeajossa käytettiin. Esijauhatuskuulamylyn jauhatustehon laskemisella ei ole merkittävää vaikutusta lopulliseen jauhatustulokseen. Lopullinen hienojauhatus tehdään jälkimmäisellä kuulamyllä suljetussa jauhatuspiirissä, jossa syklonilla ja sen käyttöparametreilla on suuri merkitys.

Esijauhatus kuulamylyn käytössä on kuitenkin huolehdittava riittävä kuulatäyttö ja varmistettava riittävä kuulajakauma sekä jauhinkuulien koko suhteessa jauhettavaan materiaaliin, jotta jauhettava raaka-aine saadaan murskattua mahdollisimman tehokkaasti ilman että se jää kuulamylyyn pyörimään ja kuluttumaan osaltaan vuorausta.

Kehitysehdotuksena todettiin, että myös esijauhatusmyllyyn kannattaisi ehdottomasti ottaa käyttöön sykloni, jonka avulla karkeimmat partikkelit saataisiin palautettua jo tässä vaiheessa takaisin jauhettavaksi. Samalla esijauhatusmyllyn syöttösuppilon vesimäärää voitaisiin laskea, koska sykloni alitteen liete palautettaisiin syöttösuppiloon, joka osaltaan vie syötettävää kiveä sisälle kuulamylyyn.

Kuulamylyn lietetiheyden nostamisella eli syötettävän veden vähentämisellä saadaan lietteenvirtausnopeutta hidastettua, jolloin viive kasvaa ja saadaan lisää aikaa materiaalin jauhamiselle kuulamylyssä. Lietetiheyden nostamisella on myös muita merkit-

täviä hyötyjä, esimerkiksi vuorauksen kulumisen hidastuminen ja kuulamyllyn vuotojen väheneminen. Korkeampi lietetiheys tiivistää vuoraukseen jäävät raot ja vuodot vähenevät huomattavasti. Edellä mainittuja asioita ei tässä työssä tutkittu, vaan ne esitetään vain huomiona kertyneen käyttökokemuksen perusteella.

Pidemmällä aikavälillä molempien kuulamyllysten syklonien käyttöönotolla ja kunnollisella säätämällä voitaisiin päästä laskemaan kuulamyllysten jauhatustehoa edelleen huomattavasti, sekä säästää lisää sähköenergiaa ja kuulamyllysten vuorausmateriaalien tarpeetonta kulumista voitaisiin vastaavasti hidastaa.

LÄHTEET

Geologisen tutkimuskeskuksen www-sivut. (2023), Hienonnus. Viitattu 15.1.2023
https://kaiva.fi/wp-content/uploads/2014/12/Hienonnus_Kaiva-fi.pdf

Jääskeläinen E. (2017), NNH Regulation of KOLA Matte Pilot testing

Kalliovaara E. (2019). NNH COULTER LS 13 320 KÄYTTÖ

Kauppalehti. (2023). Norilsk Nickel Harjavalta Oy. Haettu 10.1.2023 osoitteesta
<https://www.kauppalehti.fi/yritykset/yritys/norilsk+nickel+harjavalta+oy/1591728-4>

Lukkarinen T. (1984). Mineraalitekniikka. Insinööritieto

Nornickel www-sivut. Viitattu 10.1.2023. <https://www.nornickel.com/>

Partikkelikokoanalysointorin analyysitulokset esimerkki.



LS Particle Size Analyzer

Page 1

2022-11-08 11:06

— NNH —

File name: C:\LS13320\Samples\2014\Märkäseulonta\PS51 30.10. KLO_25_01.\$ls
 PS51 30.10. KLO_25_01.\$ls
 File ID: PS51 30.10. KLO03 C
 Operator: JUK
 Run number: 25
 Optical model: Fraunhofer.rf780d PIDS included
 Residual: 0,13%
 LS 13 320 Aqueous Liquid Module
 Start time: 2022-11-08 11:04 Run length: 52 seconds
 Pump speed: 100
 Obscuration: 12% PIDS Obscur: 62%
 Software: 6.01 Firmware: 4.00

Volume Statistics (Arithmetic) PS51 30.10. KLO_25_01.\$ls

Calculations from 0,040 μm to 2.000 μm

Volume: 100%

Mean: 23,32 μm

d_{10} : 2,932 μm

d_{50} : 15,28 μm

d_{90} : 54,01 μm

<10%

<50%

<80%

<90%

2,932 μm

15,28 μm

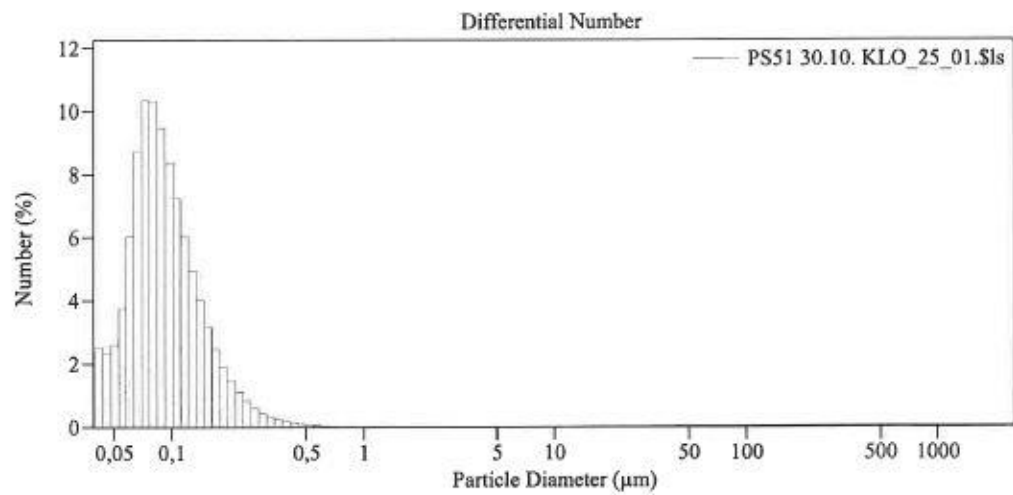
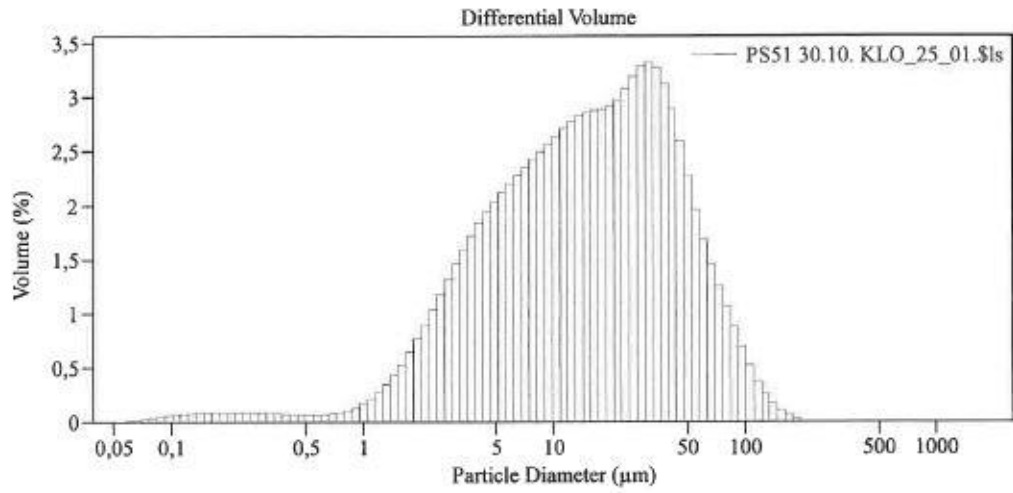
37,85 μm

54,01 μm

PS51 30.10. KLO_25_01.\$ls

Size μm	Cum. < Volume %
0	0
36	78,3
45	85,4
63	93,0
71	94,8
90	97,6
100	98,4
125	99,4
150	99,8
180	99,97
250	100
300	100
355	100
	100

NNH



Partikkelikokoanalyysien tulokset koottuna.

PS51 näy-
teet80 % teho rpm
26-28.10 06.00 202kw 16,8

		2,93333 3	14,0666 7	34,0666 7	48,2	ka
28.10 klo03		d10	d50	d80	d90	
	A	3	14,4	34,7	48,3	
	B	2,8	13,5	31,8	43,3	
	C	3	14,3	35,7	53	

		2,93333 3	15,0333 3	38,1166 7	57,65	
27.10 klo15		d10	d50	d80	d90	
	A	3,1	17,7	46,5	74	
	B	2,9	15,6	41	66,6	
	C	2,8	14,7	39	60,7	

		2,89333 3	14,9	38,0833 3	50,8	
27.10 klo23		d10	d50	d80	d90	
	A	2,9	13,7	33,2	46,8	
	B	2,98	14	35	53	
	C	2,8	13,7	33,8	48,6	

		3,33333 3	15,7333 3	41,2333 3	65,9666 7	
27.10 klo6.30		d10	d50	d80	d90	
	A	3,3	14	34,6	49,4	
	B	3,4	16,9	45	74	
	C	3,3	16,3	44,1	74,5	

65 % teho rpm
 29.10 18.00 -> 155kw 13,6

3,1 16,72667 42,73333 65,26667 ka

	d10	d50	d80	d90
30.10 klo03				
A	2,9	15,28	37,8	54
B	3,4	19,1	49,8	78
C	3	15,8	40,6	63,8

2,966667 16,36333 41,83333 64,64

	d10	d50	d80	d90
30.10 klo19				
A	2,9	18	47	72,67
B	3	15,69	39,9	61,35
C	3	15,4	38,6	59,9

3,1 16,2 41,53333 63,66667

	d10	d50	d80	d90
29.10 klo23				
A	3	15,4	38	55
B	3,2	17	44,6	69
C	3,1		42	67

3,333333 15,63 39,33333 59,56667

	d10	d50	d80	d90
30.10 klo05				
A	3,1	15,9	40	61
B	3,5	15,8	39,6	60
C	3,4	15,19	38,4	57,7

		3,066667	15,5	39,83333	60,23333
31.10 klo02		d10	d50	d80	d90
	A	3	15,2	38	54
	B	3,1	16,3	42,5	67
	C	3,1	15	39	59,7

		3,233333	16,66667	44,23333	69
31.10 klo05		d10	d50	d80	d90
	A	3,3	15	41	69
	B	3,4	20	54	83
	C	3	15	37,7	55