



Satakunnan ammattikorkeakoulu

Rauli Raitolampi

JAUHATUSPIIRIN TOIMINNAN ANALYSOINTI JA OPTIMOINTI

Tekniikka ja merenkulku Pori
Kemiantekniikan koulutusohjelma

2008

Jauhatuspiirin toiminnan analysointi ja optimointi

Raitolampi, Rauli
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Maaliskuu 2008
Heikkilä, Jorma
UDK: 66.01
Sivumäärä: 36

Asiasanat: hydrosykloni, luokitus, jauhatuspiiri

Työn teoreettisessa osuudessa selvitettiin jauhatuspiirin käsitettä, luokituksen periaatteita sekä hydrosyklonien rakennetta, toimintaa ja toiminnan analysointimenetelmiä.

Tämän insinööriyön kokeellisen osuuden ensimmäisessä osassa tutkittiin jauhatuspiiriin hankitun uuden hydrosyklonin luokitustuloksia, laadittiin jauhatuspiirille ainetase sekä selvitettiin myllyn kiertokuorma. Toisessa osassa tutkittiin myllyn pumppukaivon pumpun käyttökelpoista kierrosnopeusaluetta pumppukaivoon tulevaa pinnankorkeuden säätöä varten. Pumppukaivo on aikaisemmin käynyt lähes tyhjillään ja pumppu pyörinyt ainoastaan nimelliskoivudellaan.

Syötteen karkeuden ja kiintoainepitoisuuden todettiin myllyn uusien ajo-ohjeiden myötä kasvaneen. Tästä huolimatta uuden hydrosyklonin ylitteen havaittiin olevan vähintäänkin yhtä hienojakoista kuin mitä se vanhan syklonimallin ja vanhojen myllyn ajoarvojen kanssa oli. Uuden syklonin alite todettiin jonkin verran vanhan syklonin alitetta hienojakoisemmaksi. Tämä selittyy uuden syklonin liian suurella aliteputkella ja korkeammalla kiertokuormalla.

Pumpun pyörimisnopeutta alennettiin nimelliskoivudestaan yhteensä noin 40 %. Tällä kierros määrän laskulla ei saatu pumppukaivon pinnankorkeutta nousemaan. Tämä merkitsi käytössä olleen pumppauksen suhteen huomattavasti ylikapasiteettia, jonka pienentäminen tai poistaminen pyörimisnopeutta laskemalla johtaa vuositasolla suureen energian säästöön.

Analysis and optimization of the operation of a comminution circuit

Raitolampi, Rauli

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Chemical Engineering

March 2008

Heikkilä, Jorma

UDC: 66.01

Number of Pages: 36

Key Words: hydrocyclone, classification, comminution circuit

In the theoretical part of this thesis, the concept of a comminution circuit, the principles of classification as well as the structure, operation and analysis methods of hydrocyclones were explained.

In the first section of the experimental part of this thesis the classification results of the new hydrocyclone₂ provided to comminution circuit was investigated, mass balance for the comminution circuit was established and the circulation load of the mill was defined. In the second section the usable rotation speed range of the pump was investigated for the purpose of the coming surface level control of the sump. The sump has earlier run almost empty and the pump has rotated only at its nominal speed.

The roughness and solids content of the feed was noticed to increase due to the new operating directions of the mill. Even then, the overflow of the new hydrocyclone was observed to be at least as fine as what it was with the old cyclone and the old control parameters. The underflow of the new cyclone was noticed to be somewhat finer than what it was in the old cyclone. This is explained by the too large underflow pipe of the new cyclone and the higher circulation load.

The rotating speed of the pump was reduced by about 40 per cent from its nominal speed. This decline in the rotating speed was not enough to make the surface level rise. This meant that there was remarkable overcapacity as regards the present pumping whose decreasing or removing by cutting the rotating speed will lead to great energy savings on the annual level.

Sisällys

1. Johdanto	5
2. Rikastamo	5
2.1. Jauhatus	6
2.2. Vaahdotus	6
3. Jauhatuspiiri	7
3.1. Avoin jauhatuspiiri	8
3.2. Suljettu jauhatuspiiri	8
3.3. Kiertokuorma	9
4. Luokitus	11
4.1. Vapaa laskeutuminen	11
4.2. Hidasteinen laskeutuminen	13
4.3. Erotusraja	14
4.4. Luokituksen terävyys	14
5. Hydrosykloni	14
5.1. Hydrosyklonin rakenne ja toiminta	15
5.2. Hydrosyklonin luokituskäyrä ja tehokkuus	17
5.3. Hydrosyklonin toimintaan vaikuttavat tekijät	20
5.3.1. Käyttömuuttujat	20
5.3.2. Geometriset muuttujat	22
6. Kokeellinen osuus	24
6.1. Lohkaremyllyn jauhatuspiirin ainetase ja kiertokuorma	25
6.2. Cavex -hydrosyklonin luokitustuloksien analysointi	28
6.3. Lohkaremyllyn pumppauksen optimointi	32
6.4. Yhteenveto	35
7. Lähteet	36

LIITTEET

Liite 1: Rikastamon lohkokaavio

Liite 2: Cavex 250CVX10 -hydrosyklonin mitat

Liite 3: Cavex 250CVX10 -hydrosyklonin osat

Liite 4: Mittauspöytäkirja

Liite 5: Seula-analyysit

1 Johdanto

Suljetun jauhatuspiirin lopullisen kapasiteetin määrää luokitin, joka yhä useammassa tapauksessa on hydrosykloni. Hydrosyklonit ovat rakenteellisesti yksinkertaisia keskipakoisvoimaan perustuvia luokittimia. Näennäisestä yksinkertaisuudestaan huolimatta lukuisat eri tekijät vaikuttavat hydrosyklonien luokitustulokseen. Oikeanlaiset hydrosyklonin käyttöolosuhteet ovat koko jauhatusprosessin tehokkaan toiminnan kannalta tärkeitä.

Tämän työn ensimmäisessä osassa tutkittiin uuden hydrosyklonimallin toimintaa luokitustuloksien, jauhatuspiirin ainetaseen sekä kiertokuorman osalta. Hydrosyklonin optimaalisen toiminnan kannalta on tärkeää järjestää sille tasainen ja katkeamaton syöttövirtaus. Tämä saavutetaan järjestämällä myllyjen pumppukaivoihin riittävä pinnankorkeus. Pinnankorkeuden säätöä varten työn toisessa osiossa pyrittiin selvittämään pumppukaivon pumpun käyttökelpoinen pyörimisnopeusalue. Liian alhainen pyörimisnopeus johtaa pumppukaivon tukkeutumiseen. Toisaalta tarpeettoman korkea pyörimisnopeus aiheuttaa syklonin sisävuorauksen nopean kulumisen lisäksi turhaa sähköenergian kulutusta.

Aluksi työssä käsitellään jauhatuspiirin rakennetta ja märkäluokituksen teoriaa sekä perehdytään hydrosyklonin toimintaperiaatteisiin ja toiminnan analysointimenetelmiin. Lopuksi selvitetään kokeellisen osan suoritusmenetelmiä, arvioidaan saatujen tuloksien merkitystä sekä pohditaan mahdollisia muutostarpeita.

2 Harjavallan rikastamo

Boliden Harjavalta Oy:n kuonarikastamo sijaitsee Harjavallan Suurteollisuuspuistossa, ja on osa yhtiön kuparisulattoa. Sulatto rikastaa liekkisulatusmenetelmällä kaivoksista eri puolilta maailmaa louhittuja ja esirikastettuja sulfidisia malmeja. Malmin liekkisulatuksen ja sen jälkeisen konvertoinnin sivutuotteena syntyvä kuparipitoisuudeltaan noin 4 prosenttinen kuona siirretään rikastukseen (liite 1), jossa otetaan talteen valtaosa kuonan kuparista, joka muussa tapauksessa jäisi hyödyntämättä.

2.1 Jauhatus

Patatrukki tuo sulaton liekkisulatusuunin ja konverttereiden sulalla kuonalla täytetyt padat pata-alueelle, jossa niitä jäähdytetään vedellä yhtäjaksoisesti 48 tuntia. Jäähtyneet padat kaadetaan, jolloin kuona murskaantuu erikokoisiksi kappaleiksi.

Pyöräkuormaaja kaataa kuonan kaatosuppiloon, josta se tärysyöttimen avulla pudotetaan hihnakuljettimelle, joka siirtää kuonan pata-alueelta rikastamoon. Kuljettimen rikastamon puoleisessa päässä kuona putoaa kahdella seulapinnalla varustetulle epäkeskotäryseulalle, joka lajittelee kuonan kokonsa mukaisesti murske-, pala- ja lohkaresiiloihin. Lohkaresiilo on jaettu väliseinällä kahteen osaan, joista ensimmäinen täyttyy suoraan seualta putoavista lohkaresiiloista. Ensimmäisen osan täytyttyä, putoavat lohkaresiilat ylivuotona lohkaresiilon toiseen osaan, johon samalla mekanismilla ohjautuu myös palasiilon paloja. Palasiilon sisältöä syötetään lisäksi kartiomurskaimelle, joka hienontaa palat murskesiiloon syötettäväksi murskeeksi.

Lohkaresiilo- ja murskesiilojen kuona syötetään lohkaresimyllyihin. Siiloista kuona siirretään hihnakuljettimien avulla jakomoon, jossa jakohihnakuljettin jakaa kuonan lohkaresimylly 1:n (LM1) ja lohkaresimylly 2:n (LM2) kesken. Myllyt ovat suljetuissa jauhatuspiireissä toimivia kuulamyllyjä, joista lohkaresimylly 1:tä ajetaan tavallisesti teholla 850 kW ja hieman pienempää lohkaresimylly 2:ta 750 kW:lla. Lohkaresimyllyjen luokittimina käytetään hydrosykloneita, joiden karkea alite johdetaan takaisin myllyyn, kun taas hienojakoinen ylite ohjataan vaahdotuskennoille.

Palasiilon palatavara syötetään palahihnakuljettimen kautta palajakokuljettimelle, joka jakaa palat edelleen palamylly 1:lle (PM1) ja palamylly 2:lle (PM2). Palamyllyt toimivat autogeenimyllyinä suljetussa piirissä, luokittimien ollessa lohkaresimyllyjen tapaan hydrosykloneita. Palamyllyjen hydrosyklonien karkeajakoinen alite palautuu takaisin myllyihin, kun ylite puolestaan siirretään vaahdotukseen.

2.2 Vaahdotus

Lohkaresimyllyjen hydrosyklonien ylitteet ohjataan kolmeen primaarivaahdotuskennoon, joihin syötetään lisäksi ksantaattiin pohjautuvaa kokoojakemikaalia sekä

vaahdotusöljyä vaahdon aikaansaamiseksi. Primaarikennojen ylitevaahdo, johon kupari on rikastunut, pumpataan rikastekaivon kautta sulaton sakeuttimelle tai vaihtoehtoisesti rikastamon omalle sakeuttimelle. Sakeuttimessa laskeutunut rikaste esikuivataan lopuksi painesuodattimella. Primaarikennojen kupariköyhä alite puolestaan johdetaan välijätekaivolle, jonka sisältö pumpataan palamylyille uudelleen jauhatukseen.

Palamylyjen hydrosyklonien ylitteet ohjataan esivaahdotuskenno 1:een, johon primaarikennojen tapaan syötetään ksantaattia sekä vaahdotusöljyä. Kennon ylite johdetaan kertausvaahdotuskennoille ja alite esivaahdotuskenno 2:een, jonka ylite puolestaan johdetaan primäärivaahdotuskenno 3:een ja alite ripekennoon. Kertausvaahdotuksen ylite ohjataan rikastekaivon ja alite välijätekaivon. Ripekennon ylite johdetaan myös välijätekaivon ja alite puolestaan jätekaivon, josta vaahdotusprosessin jäte eli rikastushiekka pumpataan jätealueelle loppusijoitusta varten.

Neljä prosenttia kuparia sisältävä kuona saadaan näin jaettua kuparin suhteen noin 30 prosenttiseksi rikasteeksi ja noin 0,4 prosenttiseksi rikastushiekaksi.

3 Jauhatuspiiri

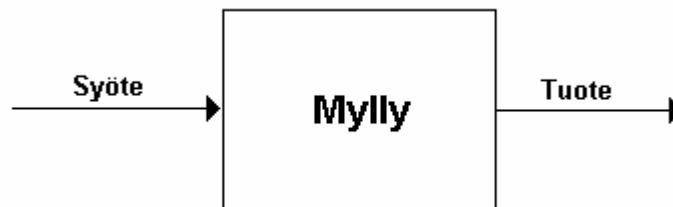
Jauhatuspiirillä tarkoitetaan rikastamossa tai vastaavassa laitoksessa tapahtuvaan mineraalisten raaka-aineiden jauhatukseen käytettävien myllyjen, luokittimien ja apulaitteiden muodostama kokonaisuutta. Jauhatuspiirissä voi olla yksi tai useampia myllyjä ja jauhatuspiirejä voi rikastamossa toimia useita rinnakkain /1/.

Jauhatuspiirissä pyritään aina tietyllä tavalla ennalta määrättyyn tuotteen hienousasteeseen. Esimerkiksi:

1. Lopputuotteesta tulee olla esimerkiksi 80 % alle x μm
2. Lopputuotteessa tulee olla esimerkiksi vähintään 60 % alle x_1 μm fraktioita ja siinä saa olla esimerkiksi 5 % yli x_2 μm :n tuotetta
3. Tuotteen ominaispinta-alan tulee olla A m^2/g tietyllä menetelmällä mitattuna

3.1 Avoin jauhatuspiiri

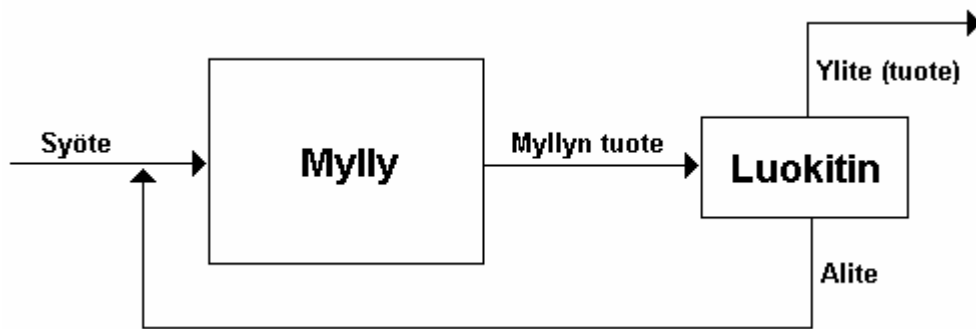
Mylly on avoimessa jauhatuspiirissä, kun jauhattava materiaali kulkee vain kerran sen läpi. Tavoiteltaessa avoimessa piirissä toimivalla myllyllä tiettyä jauhatusastetta, joudutaan koko materiaali jauhamaan vaikeimmin jauhautuvien partikkeleiden mukaan. Tällöin tuhllataan energiaa ylijauhatukseen, sillä helposti jauhautuvat tai jo riittävän hienot partikkelit jauhetaan tarpeettoman hienoiksi. Tästä syystä avointa jauhatuspiiriä käytetään lähinnä esijauhatus-sovelluksissa, malmin koostumuksesta riippumatta tasalaatuisen tuotteen antavan tankomyllyn kanssa. Avoimen jauhatuspiirin rakenne on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Avoin jauhatuspiiri

3.2 Suljettu jauhatuspiiri

Mylly on suljetussa jauhatuspiirissä, kun sen tuotteen karkea jae palautetaan takaisin jauhatukseen. Myllyn tuotteen jakamista kahteen tai useampaan jakeeseen kutsutaan luokitukseksi ja siihen käytettävää laitetta luokittimeksi. Käytännössä suljetussa jauhatuspiirissä toimivan myllyn tuote on vastaavan avopiirissä toimivan myllyn tuotetta karkeampaa ja tuotteen vaadittuun hienousasteeseen pääsystä vastaa luokitin. Tällä tavoin hienonnustyö saadaan kohdistettua vain sitä tarvitseviin partikkeleihin. Suljetun jauhatuspiirin rakenne on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Suljettu jauhatuspiiri

3.3 Kiertokuorma

Kiertokuorman käsite on oleellinen osa suljettua jauhatuspiiriä ja sen analysointia. Kiertokuorma on luokittimen myllyyn palauttama materiaalimäärä. Se ilmaistaan useimmiten prosentteina myllyn primaarisyötteen määrästä. Kiertokuorma voidaan laskea yhtälön 1 osoittamalla tavalla:

$$CL\% = \frac{w_U \cdot U}{F} \cdot 100\% \quad (1)$$

jossa CL% = kiertokuorma

w_U = luokittimen alitteen kiintoainepitoisuus

U = luokittimen alitteen massavirta, esim. t/h

F = myllyn syöttö, esim. t/h

Jauhatuspiirin eri ainevirtojen punnitseminen on kuitenkin hankalaa ja epätarkkaa. Niinpä kiertokuorma on mahdollista laskea myös seula-analyysin avulla, joka tosin sekin sisältää omat virhelähteensä. Kiertokuorman määrittämiseen seula-analyyseistä käytetään i meshin tai mikrometrin seulan läpäisseitä kiintoaineosuuksia luokittimen syöte-, alite- ja ylitevirroista. Tällä tavoin kiertokuorma voidaan laskea yhtälöllä 2:

$$CL\% = \frac{o-f}{f-u} \cdot 100\% \quad (2)$$

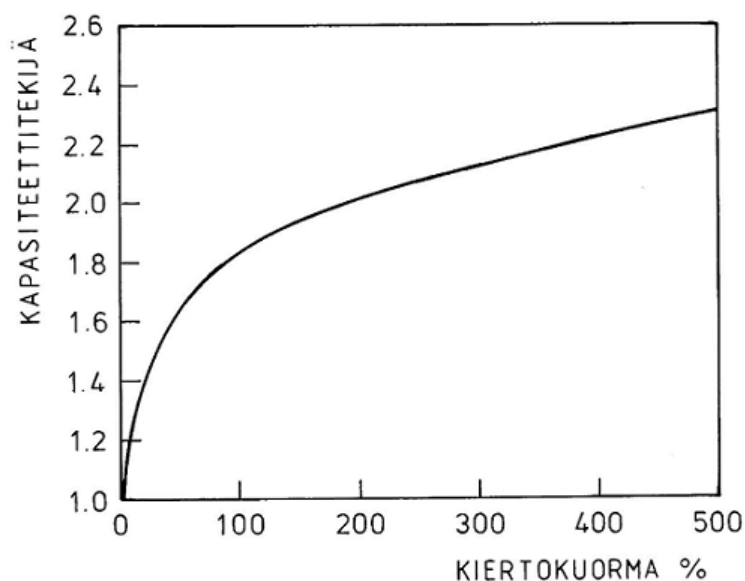
jossa f = raekokoa i pienempien kiintoainepartikkelien massaosuus myllyn tuotteen kiintoaineesta

o = raekokoa i pienempien kiintoainepartikkelien massaosuus syklonin ylitteen kiintoaineesta

u = raekokoa i pienempien kiintoainepartikkelien massaosuus syklonin alitteen kiintoaineesta

Yhtälöllä 2 saadaan i :n eri arvoilla erisuuruisia kiertokuorman arvoja. Tulos on luotettavin, jos lasku suoritetaan ylitteen 90 %:n läpäisyä vastaavalla i :n arvolla /1/.

Kiertokuorman suuruus vaikuttaa jauhatukseen, sillä kiertokuorman kasvaessa kasvaa myös jauhatuspiirin kapasiteetti (kuva 3). Suuri kiertokuorma on kuitenkin luokituksen terävyyden kannalta haitallinen, sillä alitteen mukana palautuu aina myös hienoa ainesta takaisin myllyyn. Jauhatussovelluksissa on siten aina etsittävä sopiva tasapaino jauhatuspiirin kapasiteetin ja luokituksen terävyyden välille /1/.



Kuva 3. Kiertokuorman vaikutus jauhatuspiirin kapasiteettiin. /1/

4 Luokitus

Luokituksella tarkoitetaan hienojakoisen aineen lajittelua sopivassa väliaineessa kahdeksi tai useammaksi tuotteeksi partikkeleiden vajoamisnopeuden perusteella. Väliaineena käytetään useimmiten vettä tai ilmaa, jolloin puhutaan joko hydraulisesta- tai pneumaattisesta luokituksesta. Mineraaliteollisuudessa erotetaan normaalisti toisistaan vain karkea ja hienotuote, joista ensimmäinen kaipaa lisäjauhatusta jälkimmäisen ollessa sovelluksesta riippuen sopivaa seuraavaan prosessivaiheeseen tai valmiiksi tuotteeksi.

Hydrauliset luokittimet voidaan jakaa kahteen ryhmään riippuen lietevirtauksen liikesuunnasta luokittimessa. Vaakasuoran virtauksen luokittimet, kuten mekaaniset luokittimet, pohjautuvat partikkeleiden vapaaseen laskeutumiseen ja korostavat partikkelikoon vaikutusta luokitustulokseen. Pystysuoran virtauksen luokittimet eli hydrauliset luokittimet pohjautuvat tavallisesti partikkeleiden hidasteiseen laskeutumiseen ja korostavat näin partikkeleiden tiheyden vaikutusta luokitustulokseen /2/.

4.1 Vapaa laskeutuminen

Partikkeleiden vajotessa väliaineessa yksittäisinä, toisiaan häiritsemättä, on kyseessä vapaa laskeutuminen. Vajoaminen tapahtuu vapaasti lieteen kiintoainepitoisuuden ollessa alle 15 %.

Kiintoainehiukkasen vapaa laskeutuminen väliaineessa tapahtuu Stokesin lain (yhtälö 3) kuvaamalla tavalla. Stokesin laki pätee vain laminaarisella alueella, joten laskeutumisen Reynolds-luvun on oltava alle 0,2.

$$v = \frac{(\rho_s - \rho_f)d^2g}{18\eta} \quad (3)$$

jossa v = vajoamisnopeus, m/s
 ρ_S = kiintoaineen tiheys, kg/m³
 ρ_F = nesteen tiheys, kg/m³
 g = kiihtyvyyys, m/s²
 d = kappaleen halkaisija, m
 η = väliaineen viskositeetti, Pa s

Newton esitti vajoamista vastustavan voiman aiheutuvan pelkästään turbulenttisesta vastuksesta ja johti yhtälön 4, joka pätee turbulenttisella alueella eli Reynolds-luvun ollessa yli 800.

$$v = \sqrt{\frac{3gd(\rho_S - \rho_F)}{\rho_F}} \quad (4)$$

jossa v = vajoamisnopeus, m/s
 ρ_S = kiintoaineen tiheys, kg/m³
 ρ_F = nesteen tiheys, kg/m³
 g = kiihtyvyyys, m/s²
 d = kappaleen halkaisija, m

Käytännön olosuhteissa Stokesin laki pätee partikkeleille, joiden halkaisija on alle 50 μm ja Newtonin laki partikkeleille, joiden halkaisija on suurempi kuin 500 μm . Siten on olemassa partikkelien kokoalue, jossa suurin osa märkäluokituksesta lisäksi tapahtuu, jossa kumpikaan laki ei päde.

Lakien tarkastelu osoittaa, että partikkelin loppunopeus tietyssä väliaineessa riippuu vain partikkelin koosta ja tiheydestä. Yhtälöissä esiintyvää erotusta $\rho_S - \rho_F$ kutsutaan teholliseksi tiheydeksi. Voidaan havaita, että vapaan laskeutumisen tapauksessa tehollisella tiheydellä on paljon suurempi vaikutus laskeutumisnopeuteen karkeilla kuin hienoilla partikkeleilla.

4.2 Hidasteinen laskeutuminen

Lietteen kiintoainepitoisuuden kasvaessa alkaa partikkeleiden vajoamisnopeus hidastua. Tällöin puhutaan hidasteisesta laskeutumisesta, jota laskeutuminen teollisen mittakaavan luokituksessa useimmiten on. Hidasteisessa laskeutumisessa väliaineena ei ole enää neste vaan liete itse. Vajoamisen vastus muodostuu pääasiassa turbulenssista ja partikkelien laskeutumisenopeuden määrittämiseen voidaan siten käyttää hieman muunnettua Newtonin lakia:

$$v = \sqrt{\frac{3ad(\rho_s - \rho')}{\rho'}} \quad (5)$$

jossa v = vajoamisnopeus, m/s

ρ_s = kiintoaineen tiheys, kg/m³

ρ' = lietteen tiheys, kg/m³

a = kiihtyvyys, m/s²

d = kappaleen halkaisija, m

Yhtälöstä 5 nähdään, että mitä pienempi on kiintoaineen tiheys, sitä suurempi on tehollisen tiheyden $\rho_s - \rho'$ alenemisen vaikutus ja sitä suurempi on laskeutumisenopeuden hidastuminen hidasteisessa laskeutumisessa. Vapaaseen laskeutumiseen nähden hidasteinen laskeutuminen vähentää siis partikkelikoon vaikutusta ja korostaa tiheyden vaikutusta luokitustuloksissa.

Kun lietteen tiheys edelleen kasvaa, tullaan pisteeseen, jossa jokaista mineraalipartikkelia peittää vain ohut nestefilmi. Pintajännityksestä johtuen seos on täysin tasalaatuinen eikä pyri luokittumaan. Seos on tilassa, jossa rakeet ovat vapaita liikkumaan, mutta eivät voi tehdä näin törmäämättä muhin rakeisiin, jonka seurauksena ne pysyvät paikallaan.

4.3 Erotusraja

Luokittimessa tietyn kokoisista partikkeleista 50 % kulkeutuu alitteeseen ja 50 % ylitteeseen. Tätä raekokoa merkitään tunnuksella d_{50} . Se on siis sellaisen partikkelin läpimitta, jolla on yhtä suuri todennäköisyys kulkeutua luokittimessa niin ylitteeseen kuin alitteeseenkin. D_{50} -kokoa pienemmillä partikkeleilla on suurempi todennäköisyys kulkeutua ylitteeseen ja tätä kokoa suuremmilla partikkeleilla vastaava todennäköisyys on pienempi. D_{50} -luvun suuruus riippuu luokittimen geometriasta ja prosessimuuttujista.

4.4 Luokituksen terävyys

Luokituksen terävyydellä kuvataan sitä osuutta syötteen sisältämästä raekokoa x hienommasta kiintoaineesta, joka kulkeutuu ylitteeseen [1]. Luokituksen terävyys ilmoittaa luokittimen tehokkuuden ja se voidaan laskea yhtälöllä 6:

$$E = \frac{o \cdot (f - u)}{f \cdot (o - u)} \cdot 100\% \quad (6)$$

jossa E = luokituksen terävyys, %
 o = ylitteen sisältämä $-x$ koon jae, %
 u = alitteen sisältämä $-x$ koon jae, %
 f = syötteen sisältämä $-x$ koon jae, %

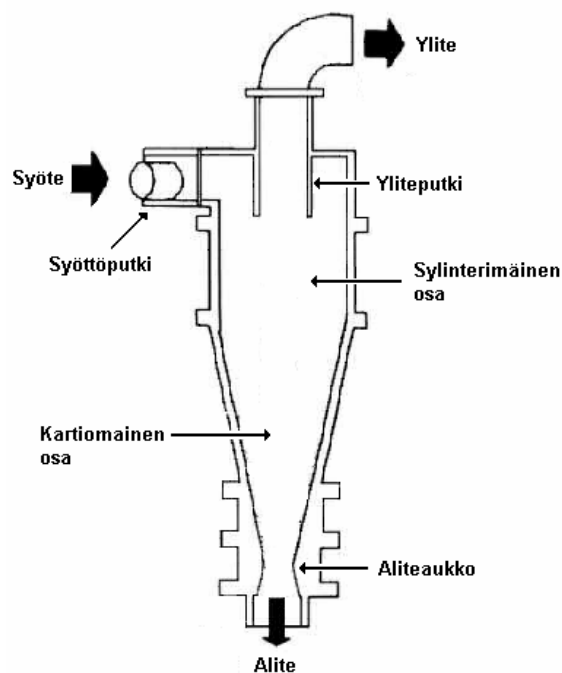
5 Hydrosykloni

Hydrosykloni on laite, jolla luokitellaan nesteessä, useimmiten vedessä, olevia kiintoainepartikkeleita tarvittaessa hyvin laajalla raekokoalueella. Luokitus perustuu tiheyseroon nesteen ja kiintoaineen välillä ja erottavan keskipakoisvoiman saa aikaan virtauksen pyörimisliike. Hydrosyklonissa kiintoainetta sisältävä syöttövirtaus jakaantuu ylitteeseen, jossa on pääosa nesteestä ja alitteeseen, jossa on pääosa kiintoaineesta. Hydrosyklonit ovat korvanneet mekaaniset luokittimet suurimmassa osassa

moderneja jauhatuslaitoksia, sillä ne toimivat tehokkaammin erityisesti hienoja raekokoja luokiteltaessa, ovat rakenteellisesti yksinkertaisia ja omaavat kokoonsa nähden suuren kapasiteetin ja vaativat näin vähemmän lattiapinta-alaa. Partikkeleiden lyhyestä viipymäajasta johtuen, saadaan hydrosyklonilla varustettu jauhatuspiiri nopeasti tasapainoon.

5.1 Hydrosyklonin rakenne ja toiminta

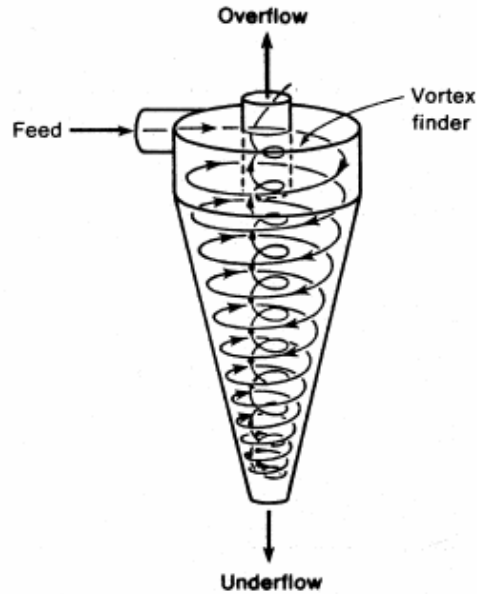
Tyypillinen hydrosykloni (kuva 4) käsittää kärjestään avoimen kartiomaisen erotusosan liitettynä sylinterimäiseen syöttökammioon, johon liete ohjataan syöttöputkea pitkin tangentiaalisesti. Sylinterimäinen syöttökammio on yläosastaan suljettu, mutta sen läpi kulkee syklonin pystyakselin suuntainen yliteputki. Yliteputki jatkuu syklonin sisälle, jossa sen alareuna ulottuu syöttöputken alapuolelle. Yliteputken tulee alaosastaan olla riittävän paljon syöttöaukkoa matalammalla, jotta vältetään syötteen suora oikovirtaus ylitteeseen. Sykloneiden sisäpinnat on kauttaaltaan vuorattu kumilla tai keraamisilla materiaaleilla. On yleistä käyttää useita eri vuorausmateriaaleja samassa syklonissa kulumisen tasaamiseksi. Ideaalitulanteessa kaikki vuorauksen osat ovat vaihdon tarpeessa samanaikaisesti.



Kuva 4. Hydrosykloni ja sen keskeiset osat. /2/

Halkaisija on hydro syklonin pääparametri. Hydro syklonin tapauksessa halkaisijalla tarkoitetaan sylinterimäisen osan sisäläpimittaa. Sylinterimäisen osan tehtävänä on syötteen vastaanoton lisäksi pidentää sykklonia ja kasvattaa täten lietteen viipymäaika. Sylinterimäisen osan korkeus on tavallisesti yhtä suuri kuin sen halkaisija. Tärkeä parametri on myös syöttöputken poikkipinta-ala. Syöttöputki on pyöreä tai suorakaiteen muotoinen ja tyypillisesti poikkipinta-alaltaan 5 % sylinterimäisen osan poikkipinta-alasta. Myös yliteputken halkaisija on tärkeä mitoituskohde. Sopiva halkaisija yliteputkelle on usein 35 % sykklonin halkaisijasta, mutta vaihtelua esiintyy välillä 20-45 %. Sylinterimäisen osan alapuolella on sykklonin kartiomainen osa, jonka kartiokulma on normaalitapauksessa välillä 10-20 %. Kartiomaisen osan kärjessä on aliteputki, jonka halkaisijan oikea mitoitus on sykklonin tehokkaan toiminnan kannalta niin ikään tärkeää. Aliteputken minimihalkaisijana voidaan pitää 10 % sylinterimäisen osan halkaisijasta, mutta maksimissaan se voi olla niinkin suuri kuin 35 %.

Syöttöliete tulee sykklonin sisään tangentialisesti, joutuu pyörivään liikkeeseen ja virtaa ensimmäisessä vaiheessa ulompana spiraalina sykklonin alaosaan, jossa alite erottuu ylitteestä ja alite poistuu aliteputken kautta sykklonista (kuva 5). Tämän jälkeen ylite virtaa sisempänä spiraalina -joka on halkaisijaltaan yliteputken halkaisijan suuruusluokkaa- sykklonin yläosaan, jossa se poistuu yliteputken kautta sykklonista. Käytännön olosuhteissa sykklonin pysty akselin ympärille kehittyy ilmaydin, jossa voi vallita huomattavakin alipaine. Ilmaydin on yhteydessä ilmakehään aliteaukon kautta. Sykklonin erotuksen kannalta oleellinen on virtauksen ensimmäinen vaihe syötöstä sykklonin alaosaan. Svarovskyn (1984) esittämä viipymäaikateoria perustuu näkemykseen, jonka mukaan partikkeli joutuu alitevirtaan, jos sillä on aikaa siirtyä sykklonin seinämälle. Siirtymiseen käytettävissä oleva aika on viipymäaika, joka on aika, jonka kuluessa syöte virtaa syöttöputkesta sykklonin alaosaan. Siirtymisen ajavana voimana on pyörrevirtauksen aiheuttaman keskipakoisvoiman synnyttämä radiaalikiiihtyvyys ja siirtymisen nopeus on partikkelin vajoamisnopeus tämän kiihtyvyyden seurauksena. Koska samaa ainetta olevien partikkelien vajoamisnopeus tietyssä väliaineessa riippuu vain niiden koosta, riippuu myös partikkelien välinen erotustodennäköisyys vain niiden koosta.



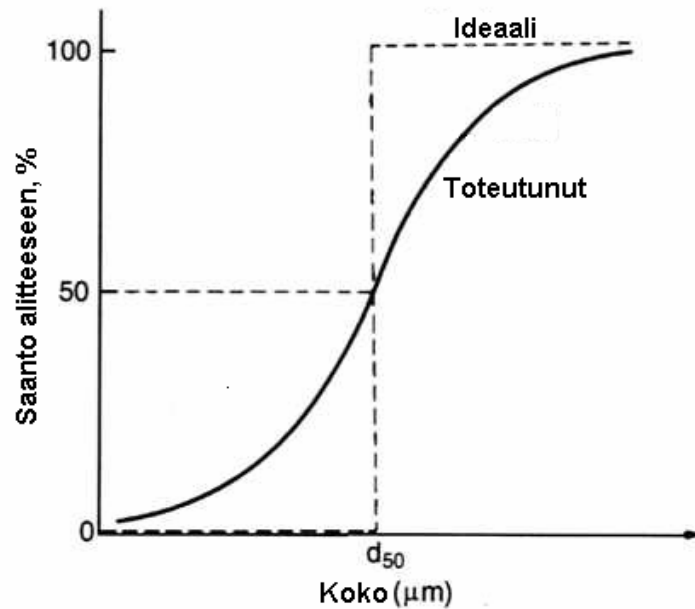
Kuva 5. Hydrosyklonin virtaukset. /6/

5.2 Hydrosyklonin luokituskäyrä ja tehokkuus

Yleisin tapa tarkastella hydrosyklonin toimintaa on luokituskäyrän eli ns. Trompin jakautumiskäyrän (kuva 6) laadinta. Luokituskäyrä kuvaa syötteen erikokoisten partikkeleiden todennäköisyyttä kulkeutua alitteeseen. Hydrosyklonin erotusraja eli erotuskoko voidaan määrittellä luokituskäyrältä partikkelikooksi, jolla on 50 %:n todennäköisyys kulkeutua alitteeseen. Tämä tunnetaan nimellä d_{50} -koko. Hydrosyklonin luokituksen terävyyttä kuvaa luokituskäyrän keskiosan jyrkkyys. Mitä jyrkemmin käyrä nousee, sitä terävämpi eli tehokkaampi on luokitus. Käyrän jyrkkyys voidaan ilmaista määrittämällä käyrältä pisteet, jotka vastaavat 75 %:n ja 25 %:n saantoa alitteeseen. Nämä ovat syklonin d_{75} - ja d_{25} -koot. Erotustehokkuus E saadaan siten yhtälöllä 7:

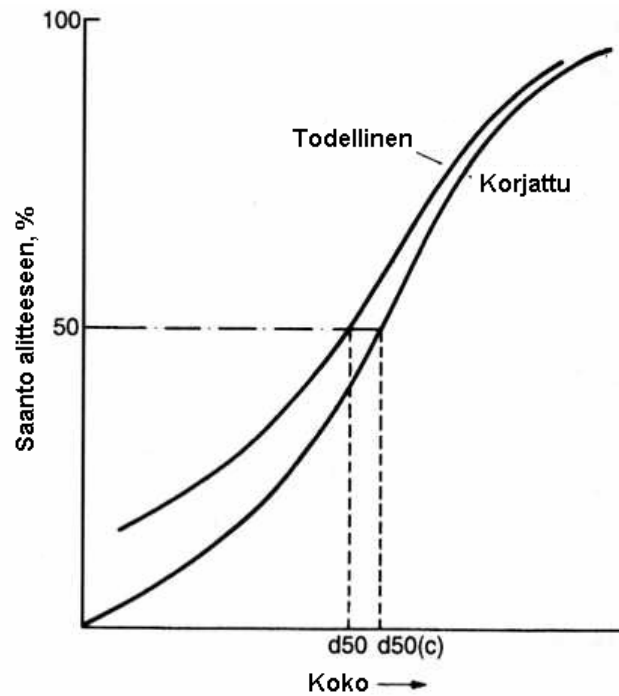
$$E = \frac{d_{75} - d_{25}}{2 \cdot d_{50}} \quad (7)$$

Mitä pienempi on E:n arvo, sitä terävämpi on luokitus. Ideaalitulanteessa E saa arvon nolla, mutta käytännössä siitä jäädyään aina melko kauas, kuten tyypillisestä luokituskäyrästä kuvassa 6 nähdään.



Kuva 6. Luokituskäyrä. /2/

Todellinen luokituskäyrä ei partikkelikoon pienentyessä kuitenkaan lähesty nollaa, vaan jää tietylle ylemmälle tasolle. Tämä johtuu siitä, että hydrosykloneissa, kuten kaikissa luokittimissa, jää tietty määrä kiintoainetta aina luokittumatta. Luokittumatta jäävällä kiintoaineella ei ole yhteyttä partikkelikokoon, vaan luokittumatta jää kaikkia raekokoluokkia samassa suhteessa niiden osuuteen syötteen kiintoaineessa. On todettu, että luokittumatta jäävän kiintoaineen osuus kiintoaineen kokonaismäärästä on yhtä suuri kuin alitteen mukana poistuvan nestemäärän osuus nesteen kokonaismäärästä. Kuvassa 7 on esitetty todellinen ja korjattu luokituskäyrä.



Kuva 7. Todellinen- ja korjattu luokituskäyrä. /2/

Korjattu käyrä kuvaa luokituksen läpikäyneiden partikkeleiden saantoa alitteeseen. Normaalisti hydro syklonin toiminnan, kuten d_{50} -arvon, kuvaamiseen käytetään juuri korjattua luokituskäyrää. D_{50} -arvosta käytetään tällöin tunnusta $d_{50(c)}$, viittaamaan korjattuun luokituskäyrään. Hydro syklonin toimintaa mitattaessa, saadaan tulokseksi aina todellinen luokituskäyrä. Se voidaan muuttaa korjatuksi käyräksi käyttäen yhtälöä 8:

$$y' = \frac{y - R}{1 - R} \cdot 100\% \quad (8)$$

jossa $y' = x$ kokoisen partikkelin korjattu saanto alitteeseen
 $y = x$ kokoisen partikkelin todellinen saanto alitteeseen
 R = alitteeseen kulkeutuvan nesteen osuus

Syklonin d_{50} -koko ei normaalisti ole käyttökelpoisiin luku jo olemassa olevan hydro-syklonin toiminnan tarkkailuun, vaan on enemmänkin mitoituksellinen termi. Jauhatuspiirisovelluksissa hydro-syklonin toimintaa arvioidaankin enemmän esimerkiksi P80-luvulla. P80-luku ilmoittaa partikkelikoon, jota hienompaa on 80 % ylitteestä. P80-luku eroaa d_{50} :stä siinä, että se riippuu hydro-syklonin d_{50} -luvun lisäksi syötteen raekokojakaumasta.

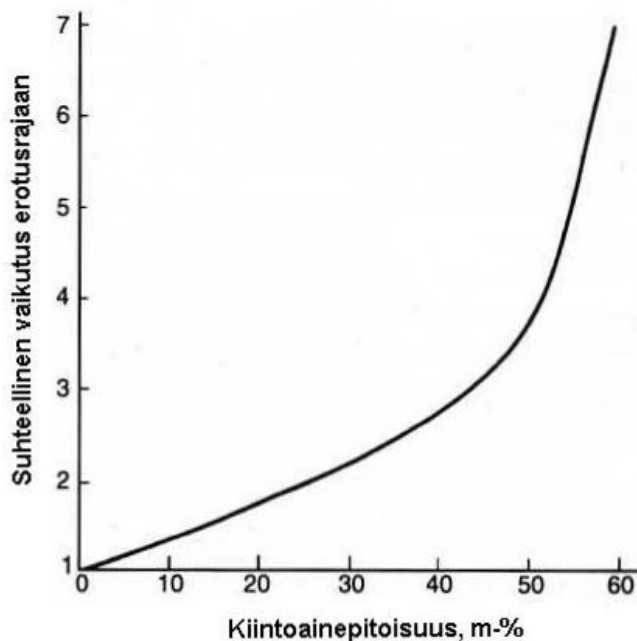
5.3 Hydro-syklonin toimintaan vaikuttavat tekijät

Vaikka hydro-syklonit ovat rakenteeltaan melko yksinkertaisia, on niiden matemaattinen mallintaminen vaikeaa. Hydro-sykloneista on vuosien saatossa luotu lukuisia empiiris-matemaattisia malleja, joista yksikään ei ole täysin tarkka tai yleispätevä. Ne ovat kuitenkin hyödyllisiä tehtäessä yhteenvetoa geometrysten muuttujien ja käyttömuuttujien vaikutuksesta hydro-syklonin toimintaan.

5.3.1 Käyttömuuttujat

Syöttösakeus:

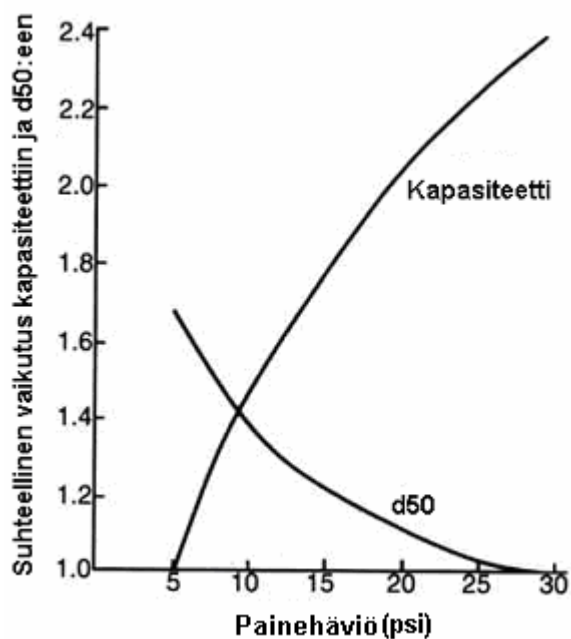
Tärkein syklonin toimintaan vaikuttava käyttömuuttuja on syötteen kiintoainepitoisuus. Tämä on tärkeä muuttuja myös siksi, että siihen voidaan vaikuttaa melko helposti jo olemassa olevissa kokoonpanoissakin. Lietteiden tiheyden noustessa partikkeleiden laskeutumisnopeus hidastuu (hidasteinen laskeutuminen). Lietteiden sakeuden kasvu huonontaa siten luokituksen terävyyttä ja nostaa erotusrajan. Normaalisti syötön kiintoainepitoisuus ei ole suurempi kuin 30 massaprosenttia, mutta sellaisissa suljetuissa jauhatuspiireissä, joissa suhteellisen karkea erotusraja riittää, käytetään usein korkeaa syöttökonsentraatiota aina 60 massaprosenttiin asti /3/. Kuvasta 8 ilmenee, että syöttökonsentraation kasvulla on suuri vaikutus erotusrajaan varsinkin yli 50 massaprosentin kiintoainepitoisuuksilla.



Kuva 8. Kiintoainepitoisuuden vaikutus erotusrajaan. /2/

Syötteen tilavuusvirtaus ja syklonin painehäviö:

Syötteen tilavuusvirtaus ja painehäviö syklonissa ovat riippuvaisia toisistaan. Monissa sovelluksissa nämä ovat syöttösakeuden ohella jälkikäteen säädettävissä olevia muuttujia. Niihin voidaan vaikuttaa esimerkiksi pumpun pyörimisnopeuden säädöllä tai muuttamalla käytettävien syklonien lukumäärää. Syöttövirtauksen kasvu parantaa hienojen partikkeleiden erotustehokkuutta kasvattamalla keskipakovoimaa. Tämä voidaan saada aikaan vain nostamalla syöttöpainetta ja vastaavasti lisäämällä pumpun tehoa, koska syöttövirtauksen määrä on suoraan verrannollinen syklonin painehäviöön ja kapasiteettiin. Syöttöpaineen muutokseen on kuitenkin oltava suuri, jotta saadaan aikaan merkittävä vaikutus, sillä 50 %:n lisäys syöttöpaineeseen aiheuttaa vain noin 10 %:n muutoksen d_{50} :een /6/. Hydrosyklonit toimivatkin melko laajalla painealueella. Toisaalta syöttöpaineella on suuri vaikutus sisävuorauksen kulumiseen, joten syöttöpaine on yleensä säädetty välille 0,4-1,0 bar ja syöttönopeus välille 3-4 m/s /1/. Kuva 9 esittää painehäviön vaikutuksen syklonin kapasiteettiin ja erotusrajaan.



Kuva 9. Painehäviön vaikutus kapasiteettiin ja erotusrajaan. /2/

5.3.2 Geometriset muuttujat

Syöttöputki:

Syöttöputken poikkileikkauksen pinta-ala määrittää syötteen sisääntulonopeuden syöttöpaineen ollessa vakio. Syötteen nopeus vaikuttaa partikkeleihin kohdistuvaan keskipakoisvoimaan ja sitä kautta erotusrajaan. Myös syöttöputken muodolla on merkityksensä. Syöttöputkien poikkileikkaus on kehittynyt pyöreästä suorakaiteen muotoiseksi, sillä tämä muoto auttaa virtausta leviämään paremmin syklonin syöttökammion seinämälle. Syöttöputken profiili on perinteisesti ollut suora, mutta nykyisin ne suunnitellaan kaareviksi, jolloin syöte saadaan kaartuvaan liikkeeseen jo ennen sykloniin saapumista. Tämän sanotaan minimoivan turbulenssia ja vähentävän syklonin syöttökammion kulumista.

Sylinterimäinen osa:

Tyypillisessä hydrosyklonissa sylinterimäisen osan pituus on yhtä suuri kuin sen halkaisija. Pitkä sylinterimäinen osa antaa lyhyempään nähden suuremman viipymäajan ja siten hienomman erotusrajan. Sen vaikutus luokitustulokseen on kuitenkin erittäin vähäinen. Hydrosyklonin halkaisija vaikuttaa partikkeleihin kohdistuvaan keskipakoisvoimaan. Halkaisijan kasvaessa keskipakoisvoima pienenee ja syklonin

erotusraja nousee. Tästä syystä matalaan erotusrajaan pyrittäessä käytetään mieluummin useita pieniä ja kapeita sykloneita yhden ison sijaan.

Kartiomainen osa:

Hydrosyklonin kartiokulma on normaalisti välillä 10-20 astetta. Kymmenen asteen kartiokulmalla varustettu sykloni tuottaa hienomman erotusrajan, terävemmän luokituksen ja suuremman kapasiteetin verrattuna 20 asteen kartiokulmaan. Kartiokulman pienentäminen 20 asteesta 10 asteeseen laskee erotusrajaa 15-20 %.

Yliteputki:

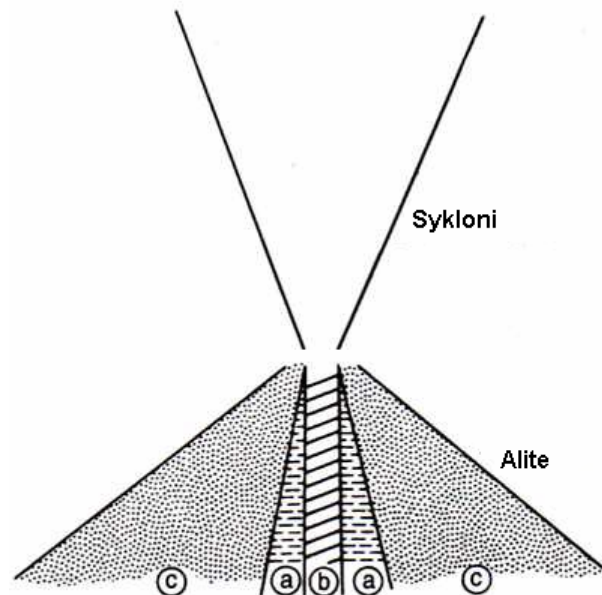
Hydrosyklonille on tavallisesti saatavissa useita halkaisijaltaan erisuuruisia yliteputkia. Yliteputkella kontrolloidaan syklonin luokitusta ja ylitteen poistumista. Mitä suurempi on yliteputken halkaisija, sitä suurempi on syklonin kapasiteetti ja erotusraja.

Aliteputki:

Halkaisijaltaan oikean kokoisen aliteputken valinta on hydrosyklonin optimaalisen toiminnan kannalta tärkeää, sillä se määrää syklonin alitetiheyden. Oikean kokoisen aliteputken valinnalla taataan maksimaalinen alitetiheys ja rajoitetaan näin hienon aineksen kulkua veden mukana alitteeseen. Aliteputken tulee kuitenkin olla riittävän suuri poistamaan kaikki erottunut karkea kiintoaine syklonista ilman tukkeutumisriskiä. Käytännön kokemukset ovat osoittaneet primaarijauhatuspiireissä toimivien hydrosyklonien optimaalisen alitteen kiintoainepitoisuuden olevan 50-53 tilavuusprosenttia, kun sekundaaripiireissä alitteen kiintoainepitoisuudeksi riittää 40-45 tilavuusprosenttia /5/.

Aliteputken oikeaa kokoa voidaan silmämääräisesti arvioida tarkastelemalla alitesuihkun muotoa. Normaaleissa käyttöolosuhteissa alitesuihkun tulisi olla muodoltaan 20-30 asteen kulmalla varustettu ontto kartio (kuva 9). Tällöin saavutetaan alitteen kiintoainepitoisuus, joka on hieman suurempi kuin 50 % kokonaistilavuudesta. Jos sykloni tuottaa tätä suurikulmaisemman alitesuihkun, on aliteputkea syytä pienentää, sillä aliteessa on tällöin tarpeettoman paljon nestettä. Liian pieni aliteputki puolestaan johtaa tilanteeseen, jossa alite muodostaa erittäin paksun lietevirran, jonka halkaisija on aliteputken halkaisijan suuruinen. Tällöin

ilmaydin syklonin sisällä katoaa, erotustehokkuus laskee ja ylisuurta materiaalia kulkeutuu ylitteeseen.



Kuva 10. Aliteaukon koon vaikutus alitesuihkun muotoon: a) optimaalinen toiminta, b) alite liian tiheää - liian pieni aliteaukko, c) tarpeettoman laiha alite - aliteaukko liian suuri. /2/

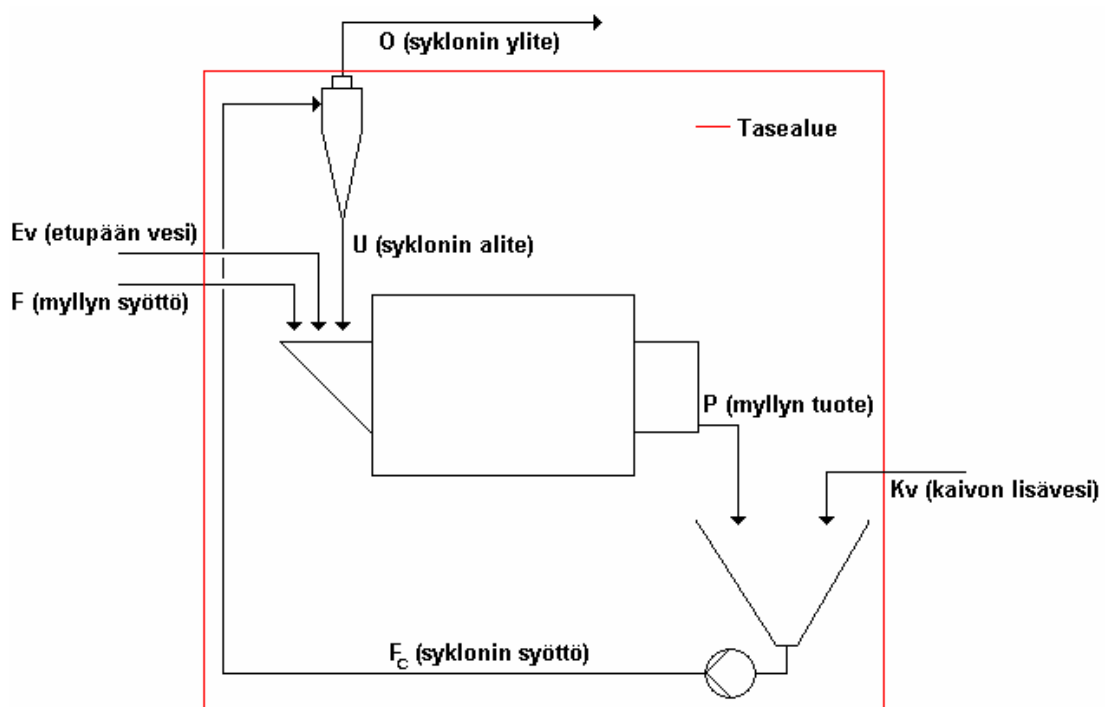
6 Kokeellinen osuus

Työn ensimmäisen osan tavoitteena oli selvittää lohkaremylly 1:n jauhatuspiiriin ainevirrat uudella Cavex 250CVX10 -hydrosyklonilla (liitteet 2 ja 3) ja näiden pohjalta muodostaa systeemille ainetase. Lisäksi tutkittiin hydrosyklonin toimintaa luokitustulosten osalta ja vertailtiin niitä vanhalla syklonimallilla saatuihin tuloksiin.

Työn toisessa osiossa pyrittiin selvittämään lohkaremylly 2:lla pumppukaivopumpun käyttökelpoinen pyörimisnopeusalue luokitustuloksia seuraamalla ja visuaalisesti kaivon käyttäytymistä tarkkailemalla.

6.1 Lohkaremyllyn jauhatuspiirin ainetase ja kiertokuorma

Työn ensimmäisessä osiossa laadittiin uudella Cavex-hydrosyklonilla varustetulle lohkaremylly 1:n jauhatuspiirille kokonaisainetase sekä selvitettiin myllyn kiertokuorma. Ainetaseiden laatimiseksi kerättiin näytteitä hydrosyklonin ylitteestä ja alitteesta sekä myllyn tuotteesta 11, 14 ja 21.tammikuuta 2008. Näytteiden kerääminen suoritettiin kokonaiskestoiltaan kolmen tunnin mittaisina keräilyinä, joissa näytteenottokierros suoritettiin puolen tunnin välein. Näytteiden keräämisen lisäksi mitattiin lohkaremyllyn syöttöpään veden ja pumppukaivon lisäveden massavirtaukset sekä selvitettiin WEDGE:stä myllyn kuonasyöttö näytteenkeruujaksojen aikana. Kuvassa 11 on esitetty tutkitun jauhatuspiirin tasealue sekä ainevirrat:



Kuva 11. Lohkaremylly 1:n jauhatuspiirin tasealue ja ainevirrat

Syklonin ylitteestä ja alitteesta sekä myllyn tuotteesta kerätyt näytteet punnittiin, jonka jälkeen kiintoaineen annettiin laskeutua vähintään vuorokauden verran. Selkeytynyt vesi kaadettiin pois ja sen massa punnittiin. Samoin punnittiin myös jäljelle jäänyt kiintoaine ja jäännöskosteus. Tämän jälkeen kiintoaine-vesi-seos

sekoitettiin huolellisesti tasaiseksi liejuksi, josta erotettiin kolme näytettä. Erotetut näytteet punnittiin märkänä, kuivattiin ja punnittiin uudelleen, jolloin voitiin laskea näytteiden kosteuspitoisuus. Keräilynäytteen lopullinen jäännöskosteuspitoisuus muodostui näiden kolmen näytteen kosteuspitoisuuksien keskiarvona. Saatujen tietojen pohjalta voitiin laskea hydrosyklonin ylitteen ja alitteen sekä myllyn tuotteen kiintoainepitoisuudet. Suoritettujen mittausten tulokset on esitetty mittauspöytäkirjassa (liite 4).

Hydrosyklonin ylitteen ja syötteen massavirtauksia sekä syötteen kiintoainepitoisuuksia ei käytännön syistä pystytty mittaamaan riittäväällä tarkkuudella, joten niiden arvot jouduttiin laskemaan ainetaseyhtälöillä, käyttäen apuna muista ainevirroista saatuja mittaustuloksia:

Jauhatuspiirin kokonaisainetasetta kuvaa yhtälö 9:

$$F + E_v + K_v - O = 0 \quad (9)$$

jossa O = Syklonin ylitevirtaus, t/h
 F = Myllyn syöttö, t/h
 E_v = Myllyn etupään vesi, t/h
 K_v = Pumppukaivon lisävesi, t/h

Myllyn kokonaisainetase puolestaan on:

$$F + E_v + U - P = 0 \quad (10)$$

jossa U = Syklonin alitevirtaus, t/h
 F = Myllyn syöttö, t/h
 P = Myllyn tuote, t/h
 E_v = Myllyn etupään vesi, t/h

Ylitteen massavirraksi saadaan siten yhtälöä 9 käyttäen:

$$O = F + E_V + K_V = 36,2 \frac{t}{h} + 5,6 \frac{t}{h} + 26,0 \frac{t}{h} = 67,8 \frac{t}{h}$$

Hydrosyklonin syötteen massavirta F_C saadaan alitteen ja ylitteen summana:

$$F_C = O + U = 64,6 \frac{t}{h} + 58,1 \frac{t}{h} = 125,9 \frac{t}{h}$$

Hydrosyklonin syötteen kiintoainepitoisuus w_C saadaan edeltävää tulosta ja yhtälöä 10 käyttäen:

$$w_C = \frac{w_P \cdot P}{F_C} = \frac{w_P \cdot (F + E_V + U)}{F_C} = \frac{81,4\% \cdot (36,2 + 5,6 + 58,1) \frac{t}{h}}{125,9 \frac{t}{h}} = 64,6\%$$

jossa w_P = myllyn tuotteen kiintoainepitoisuus

Myös myllyn kiertokuorma voidaan nyt laskea käyttämällä yhtälöä 1:

$$CL\% = \frac{w_U \cdot U}{F} \cdot 100\% = \frac{0,761 \cdot 58,1 \frac{t}{h}}{36,2 \frac{t}{h}} \cdot 100\% = 122\%$$

On myös hyödyllistä tietää kiintoaineen tilavuusosuus alitteessa, sillä siitä voidaan tehdä päätelmiä aliteputken oikeasta halkaisijasta. Kiintoaineen tilavuusosuuden tulisi alitteessa olla välillä 50-53 %, jolloin saavutetaan maksimaalinen alitetiheys.

Kiintoaineen tilavuusosuus syklonin alitteessa on kuonan tiheydellä 4000 kg/m^3 :

$$\frac{V_{Ki\ int\ oaine}}{V_{Alite}} \cdot 100\% = \frac{\frac{m_{Ki\ int\ oaine}}{\rho_{Ki\ int\ oaine}}}{\frac{m_{Ki\ int\ oaine}}{\rho_{Ki\ int\ oaine}} + \frac{m_{Vesi}}{\rho_{Vesi}}} \cdot 100\% = \frac{\frac{76,1\ kg}{4000\ \frac{kg}{m^3}}}{\frac{76,1\ kg}{4000\ \frac{kg}{m^3}} + \frac{23,9\ kg}{1000\ \frac{kg}{m^3}}} \cdot 100\% = 44,2\%$$

Eli aliteputken voidaan todeta olevan nykyiseltä halkaisijaltaan liian suuri.

Lohkaremylly 1:n jauhatuspiirin massavirrat, kiintoainepitoisuudet ja kiertokuorma on esitetty taulukossa 1. Vesien kohdalla on suluissa ilmoitettu lisäksi vastaava automaatiojärjestelmän asetusarvo.

Taulukko 1. Jauhatuspiirin massavirrat, kiintoainepitoisuudet ja kiertokuorma.

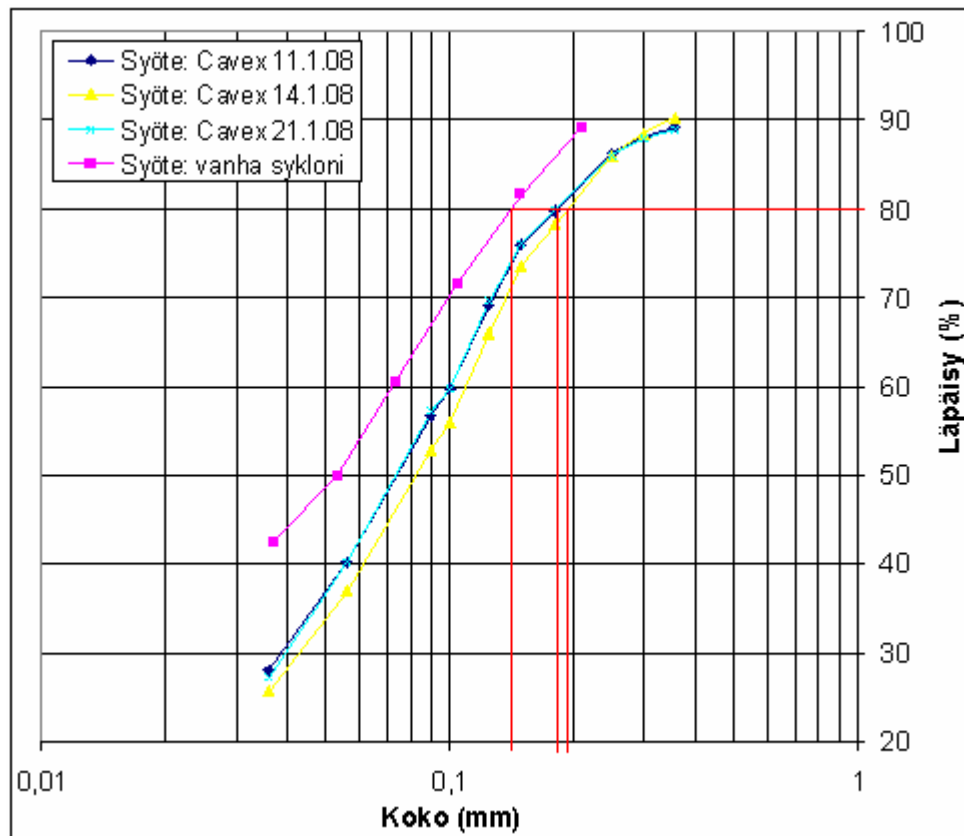
Hydrosyklonin alite, t/h	U	Mitattu	58,1
Etupään vesi, t/h	E	Mitattu	5,6 (4,5)
Pumppukaivon lisävesi, t/h	K	Mitattu	26,0 (13,0)
Hydrosyklonin ylitte, t/h	O	Laskettu	67,8
Hydrosyklonin syöte, t/h	F _C	Laskettu	125,9
Myllyn tuote, t/h	P	Laskettu	99,9
Myllyn syöttö, t/h	F	WEDGE	36,2
Myllyn tuotteen kiintoainepitoisuus, %	w _P	Mitattu	81,5
Hydrosyklonin alitteen kiintoainepitoisuus, %	w _U	Mitattu	76,1
Hydrosyklonin ylitteen kiintoainepitoisuus, %	w _O	Mitattu	52,9
Hydrosyklonin syötteen kiintoainepitoisuus, %	w _C	Laskettu	64,6
Kiertokuorma, %	CL%	Mitattu	122
Kiintoaineen jakautuminen ylitteeseen/alitteeseen, %	O/U	Laskettu	44,8/55,2
Veden jakautuminen ylitteeseen/alitteeseen, %	O/U	Laskettu	69,7/30,3

6.2 Cavex -hydrosyklonin luokitustuloksien analysointi

Lohkaremylly 1:n jauhatuspiiriin hankitun uuden Cavex-hydrosyklonin luokitus-tuloksia tutkittiin ainetaseen selvityksen yhteydessä otetuista hydrosyklonin alitteen ja ylitteen sekä myllyn tuotteen keräilynäyte-eristä. Keräilynäytteet sekoitettiin huolellisesti, jonka jälkeen niistä koottiin mahdollisimman edustavat kiintoainenäytteet

seula-analyysejä varten. Kerätyt kiintoainenäytteet kuivattiin ja toimitettiin laboratorioon. Laboratoriossa näytteet ensin punnittiin, jonka jälkeen suoritettiin märkaseulonta käyttäen 36 µm:n seula. Märkaseulonnan tarkoituksena oli tarkentaa seula-analyysin tulosta poistamalla hienoimmat partikkelit näytteestä ennen kuiva-seulontaa. Märkaseulonnasta jäljelle jäänyt aines kuivattiin, punnittiin ja seulottiin kuivana käyttäen 355, 300, 250, 180, 150, 125, 100, 90, 56 ja 36 µm:n seuloja.

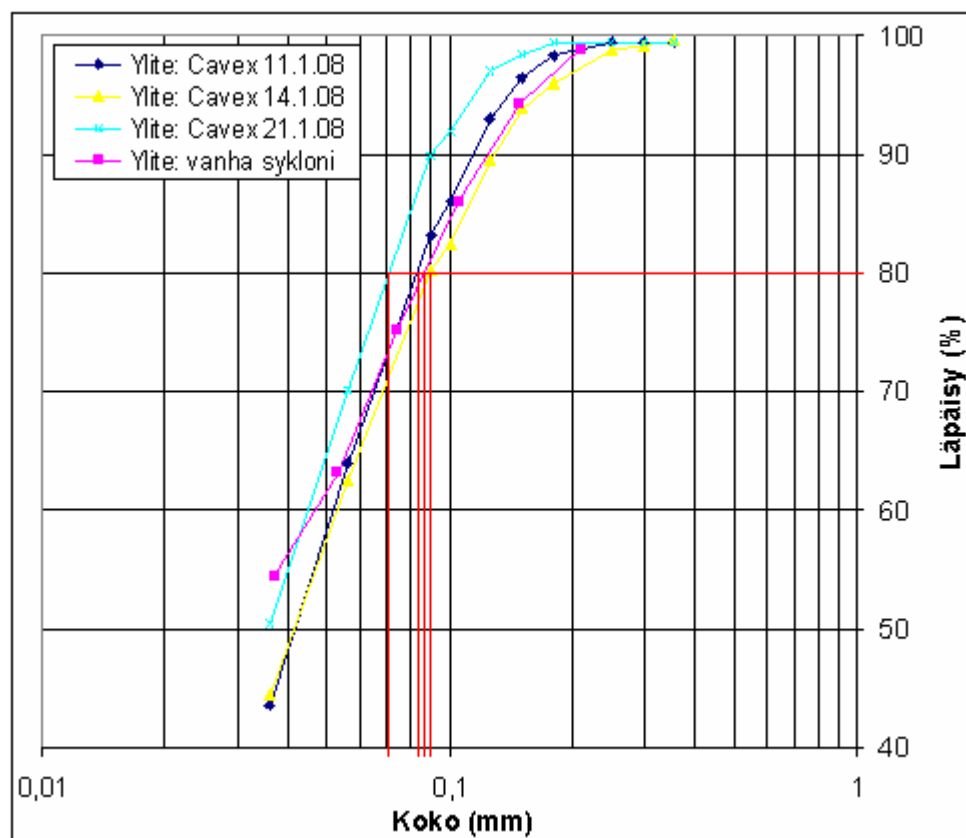
Saatujen tulosten vertailukohtana käytettiin kesäkuussa 2007 LM1:n vanhalla sykilonimallilla tehtyjen mittausten seula-analyysejä. Seula-analyysitulosten vertailuun käytettiin P80-lukuja. Vanhojen mittaustulosten aikaan myllyn ajo-arvot poikkesivat nykyisistä etupään veden (asetusarvo 2,5 m³/h; nyt 4,5 m³/h) ja kuonasyötön osalta (n. 27 t/h; nykyisin n. 36 t/h). Suurempi etupään veden määrä lisää myllyn sisällön huuhtelua, joka kasvattaa myllyn kapasiteettia nopeuttamalla kiintoaineen läpimenoaikaa, mutta toisaalta nostaa myllyn tuotteen karkeutta, kuten hydrosyklonin syötteiden seula-analyysejä esittävästä kuvasta 12 voidaan todeta.



Kuva 12. LM1:n tuotteen eli hydrosyklonin syötteen seula-analyysit ja P80-luvut.

Tuotteen P80-luku on suuremmalla etupään veden määrällä välillä 180-190 μm , kun se vanhoilla ajoarvoilla oli runsaat 130 μm eli noin 25 % pienempi.

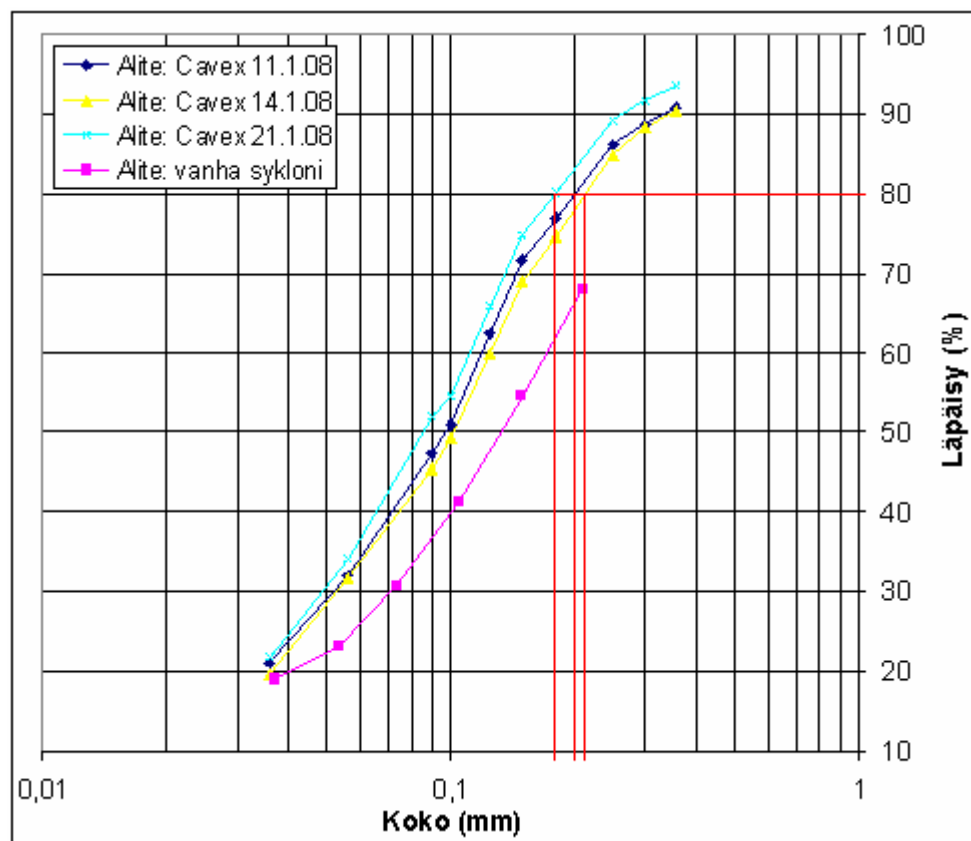
Hydrosyklonin ylitteen raekokojakaumaa esittävää kuvaa 13 tarkastelemalla voidaan todeta, että syötteen karkeuden kasvusta huolimatta tuottaa uusi sykloni vanhan mallin raekokojakaumaan verrattuna vastaavaa tai jopa jonkin verran hienompaa ylitettä. Vanhalla syklonimallilla ja vanhoilla ajoarvoilla oli P80-luvuksi saatu 85 μm , kun uusilla ajoarvoilla ja uudella syklonilla P80-luvut osuivat hieman tämän kummallekin puolelle ja yksi selvästi pienemmäksi, noin 70 mikrometriin.



Kuva 13. LM1:n hydrosyklonien ylitteiden seula-analyysit ja P80-arvot.

Kuvassa 14 olevista alitteiden seula-analyyseistä nähdään uuden syklonimallin P80-lukujen sijoittuvan välille 180-205 μm . Vanhoista seula-analyyseistä ei alitteen P80-lukua pystytty suoraan määrittämään, sillä lähes 70 % alitteesta oli läpäissyt seula-

analyysissä käytetyn karkeimmankin seulan. Kuvaajasta voidaan kuitenkin arvioida alitteen P80-luvun olleen lähellä arvoa 300 μm . Suuri ero alitteiden karkeuksien välillä selittyy osittain uudella hydrosyklonilla saatavasta suuresta kiertokuormasta (122 %) vanhan hydrosyklonin kiertokuormaan verrattuna (47 %). Suuren myllyyn palautuvan virtauksen mukana kulkeutuu takaisin myllyyn aina myös enemmän hienoa ainesta, joka kuitenkin myllyn suuremman kapasiteetin nimissä on kompromissina hyväksyttävä. Korkeamman kiertokuorman lisäksi toinen uuden syklonin alitteen hienojakoisuutta lisäävä tekijä on aliteputken liian suuri halkaisija, kuten kappaleessa 6.1 todettiin.



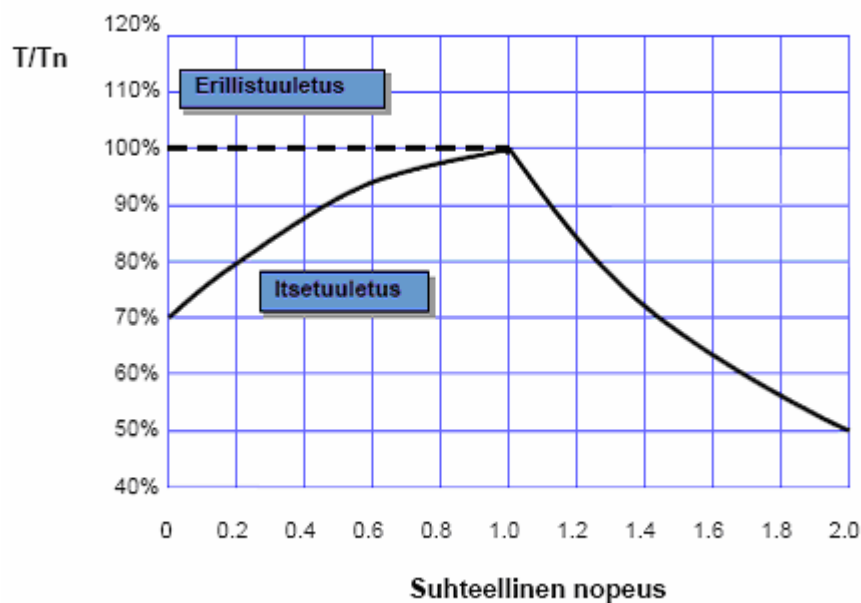
Kuva 14. LM1:n hydrosyklonin alitteen seula-analyysit ja P80-arvot.

Kaikki Cavex 250CVX10 - hydrosykloniin liittyvät seula-analyysit P80-lukuineen on esitetty liitteessä 5.

6.3 Lohkaremyllyn pumppauksen optimointi

Työn toisessa osassa tutkittiin lohkaremylly 2:n pumpun käyttökelpoista pyörimisnopeusalueetta, tarkoituksena löytää toimiva säätöalue taajuusmuuttajaan perustuvaan pumppukaivon pinnankorkeuden säätöön. Pinnansäätöä ei toistaiseksi kummankaan lohkaremyllyn kaivossa ole, jonka seurauksena kaivot käyvät jatkuvasti lähes tyhjiin. Alkuperäisenä aikomuksena oli suorittaa kokeet lohkaremylly 1:llä, yhdistettynä Cavex-syklonin koeajoihin. Myllyn pumppujen taajuusmuuttajat osoittautuivat kuitenkin tarkoitukseen kelpaamattomiksi, joten työ suoritettiin lohkaremylly 2:lla, jonka pumput on varustettu moderneilla taajuusmuuttajilla. Huolimatta taajuusmuuttajien olemassaolosta, on pumppuja käytetty aikaisemmin vain moottoriensa nimellisnopeudella.

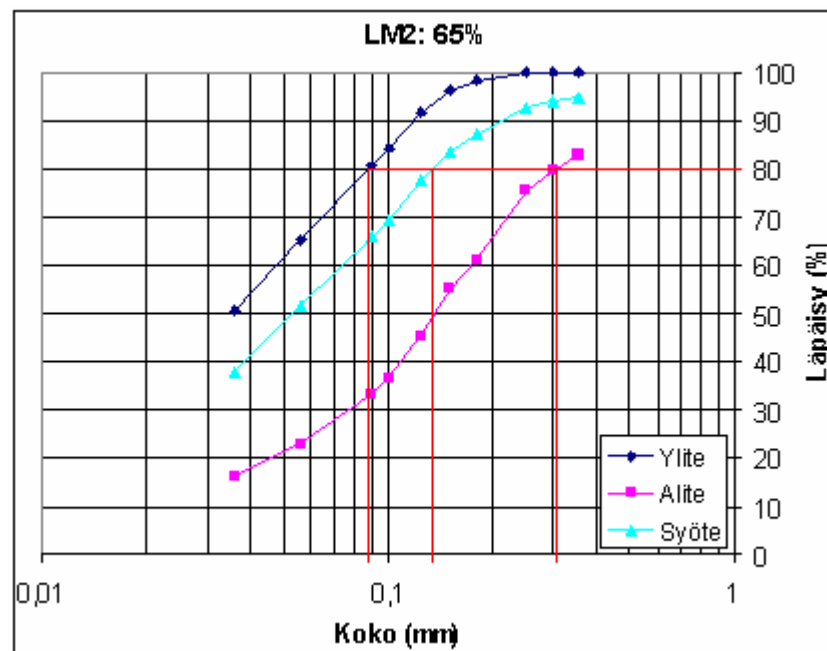
Liian alhainen pumpun pyörimisnopeus johtaa pumppukaivon tukkeutumiseen pumppaustehon ollessa riittämätön poistamaan kaivosta kaikkea myllystä tulevaa lietettä. Mahdollisesti luokitustulokset heikkenevät liikaa jo ennen tukkeentumista syöttöpaineen laskun seurauksena (kuva 9). Tulee myös huomioida, ettei itse tuuletuksella varustettua moottoria välttämättä voida kuumenemisen vuoksi käyttää pitkiä aikoja nimellisnopeuttaan alemmilla kierroksilla (kuva 16).



Kuva 16. Taajuusmuuttajakäyttöisen moottorin kuormitettavuus. /7/

Toisaalta tarpeettoman korkea pyörimisnopeus aiheuttaa syklonin sisävuorauksen nopeaa kulumista tai kuten tämän työn tapauksessa: hydrosyklonin toiminnalle haitallista syöttövirtauksen epätasaisuutta pumppukaivon käydessä tyhjiällä. Joka tapauksessa liian korkea pumpun pyörimisnopeus aiheuttaa aina turhaa sähköenergian kulutusta.

Työ suoritettiin keräämällä eri pyörimisnopeuksilla näytteitä hydrosyklonin alitteesta ja ylitteestä sekä myllyn tuotteesta. Tällä varmistettiin, ettei pumpun kierrosnopeuden laskemisella ole negatiivista vaikutusta luokitustuloksiin. Lisäksi tarkkailtiin silmämääräisesti pumppukaivon toimintaa tukkeutumisen varalta. Näytteiden keräys ja käsittely suoritettiin samalla tavalla, kuin Cavex-hydrosyklonin osalta edellisessä kappaleessa on kuvattu. Jokaisella pyörimisnopeudella suoritettiin kaksi toisistaan riippumatonta näytteiden keruuta. Tuloksien toistettavuus oli hyvä ja ne olivat melko yhteneväiset kaikilla pumpun pyörimisnopeuksilla. Siten ei voitu havaita pumpun pyörimisnopeuden pudottamisella olleen niin negatiivista kuin positiivistakaan vaikutusta luokitustuloksiin käsitellyllä nopeusalueella. Kuvassa 17 on tyypillinen esimerkki lohkaremylly 2:n seula-analyysistä pumpun nopeusasetuksella 65 %:

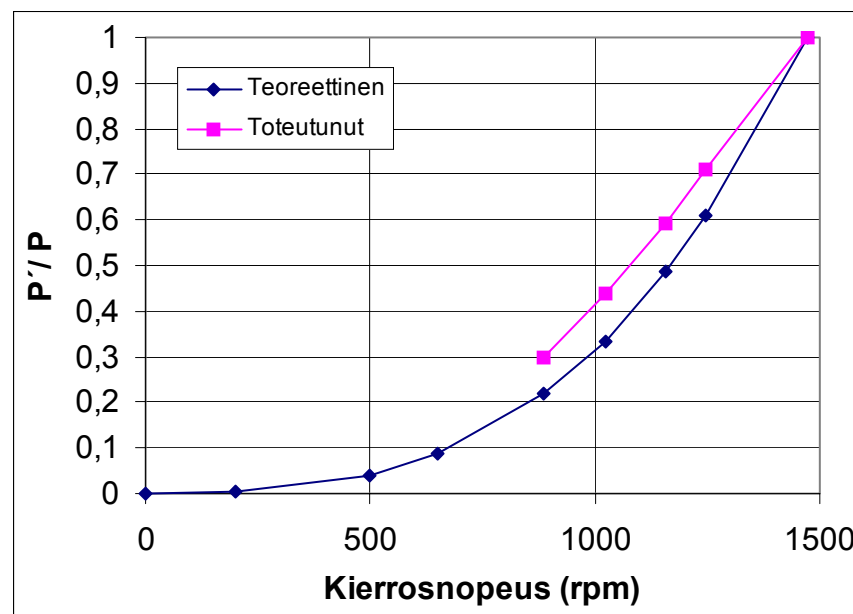


Kuva 17. Lohkaremylly 2:n syklonin seula-analyysit ja P80-luvut nopeusasetuksella 65%.

Ylitteen, syötteen ja alitteen P80-luvuiksi saatiin tässä järjestyksessä 89 μm , 120 μm ja 300 μm . Kaikki lohcaremylly 2:sta saadut seula-analyysit P80-lukuineen on esitetty liitteessä 5.

Seula-analyysien lisäksi työssä mitattiin pumpun tehonkulutusta eri pyörimisnopeukilla. Kuvassa 18 on esitetty lohcaremylly 2:n pumpun tehonkulutuksen suhteellinen lasku kierrosnopeuden funktiona sekä keskipakopumpun affiniteetti yhtälön (yhtälö 11) mukainen tehonkulutuksen teoreettinen lasku:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad (11)$$



Kuva 18. Lohcaremylly 2:n pumpun suhteellinen teho kierrosnopeuden funktiona.

Pumppukaivon pinnankorkeudessa ei havaittu minkäänlaisia muutoksia työssä tutkitulla pumpun kierrosnopeusalueella 1240 rpm (100 %)-747 rpm (35 %), joka viittaa pumpun pyörimisnopeuden eli pumppauskapasiteetin kyseisellä alueella olevan tarpeeseen nähden liian suuri. Tämä pumppauksen ylikapasiteetti selittää myös eroa teoreettisen ja toteutuneen tehon kulutuksen välillä kuvassa 18, sillä

kierrosmäärän pudotus ei johtanut pumpatun lietemäärän vähentymiseen kuten normaalitilanteessa kävisi.

Taulukosta 2 nähdään pumpun tehonkulutuksen olleen alimmilla kierroksilla noin 5 kW, joten nimellisteholtaan 30 kW:n nykyiset moottorit voidaan todeta reilusti ylimitoitetuiksi. Moottorien suuri ylimitoitus antaa nyt kuitenkin mahdollisuuden pitää pumpun kierrokset pysyvästi hyvin alhaisissa lukemissa ilman pelkoa ylikuumentumisesta. Toisaalta ylimitoitettut moottorit yhdistettynä korkeisiin kierroslukuihin ovat aiheuttaneet vuosien saatossa huomattavaa sähköenergian tuhlausta. Pumpun kierroksien pudottaminen aikaisemmin pysyvästi käytössä olleesta 1240 kierroksesta 747 kierrokseen minuutissa pudottaa 87 %:n käyntiasteella (vuonna 2006) vuotuista sähkönkulutusta lähes 90 000 kWh ilman negatiivisia vaikutuksia luokitustuloksiin.

Taulukko 2. Lohkaremylly 2:n pumpun nopeusmuutosten mittaustulokset

LM2:n pumppu					
Pyörimisnopeuden asetus (%)	100	75	65	50	35
Pyörimisnopeus; moottori (rpm)	1472	1247	1157	1022	887
Pyörimisnopeus; pumppu (rpm)	1240	1050	974	861	747
Pumppausteho (kW)	16,8	12,0	9,9	7,5	5,0
Sähkönkulutus/a 87% käyntiasteella (kWh)	128036	91454	75450	57159	38106
Ero 100%:iin (kWh)	0	-36582	-52586	-70877	-89930

6.4 Yhteenveto

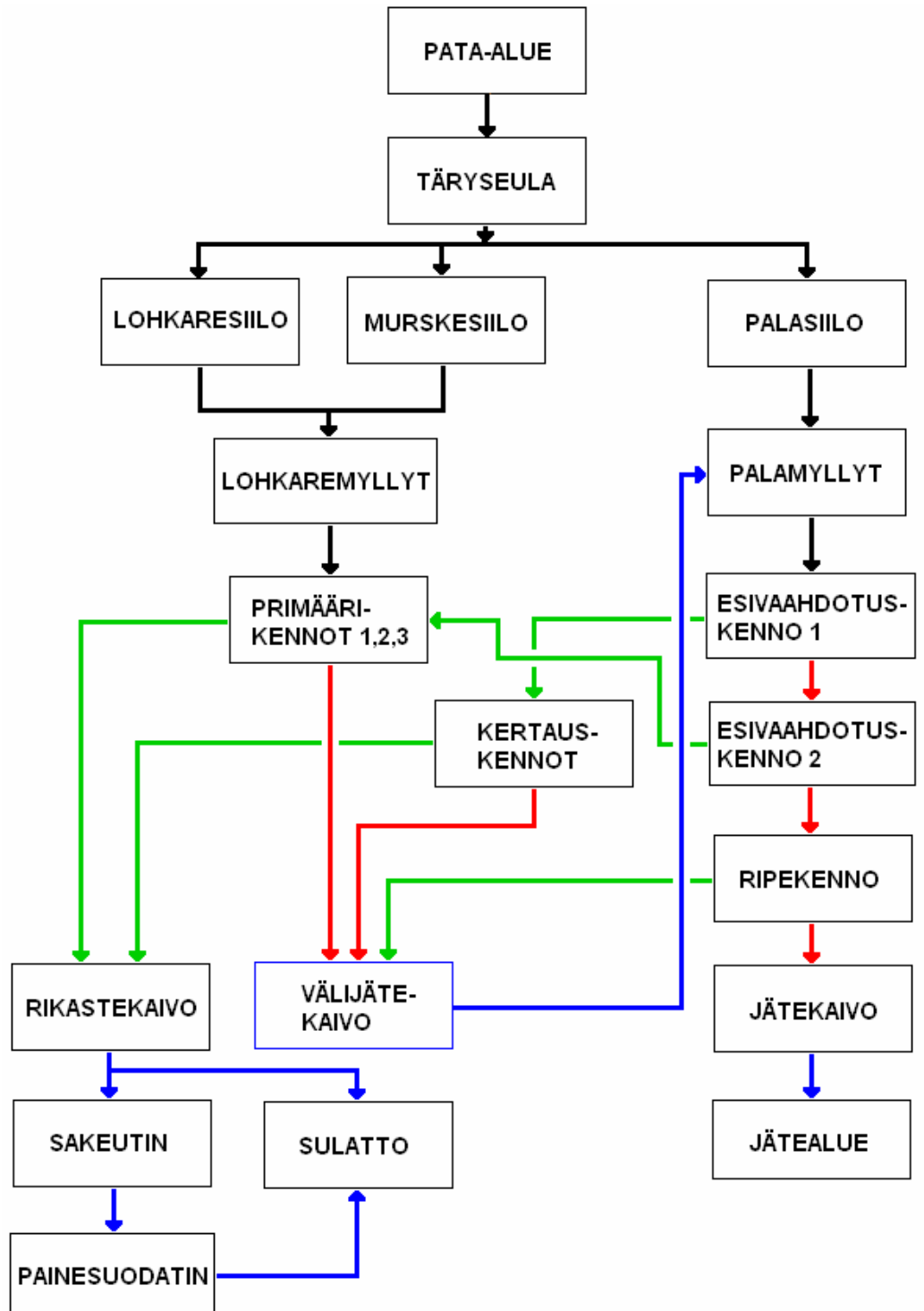
Huolimatta kiintoainepitoisuudeltaan suuremmasta ja noin 25 % karkeammasta syötteestä, Cavex-hydrosyklonin havaittiin tuottaneen raekokojakaumaltaan varsin samankaltaista ylitettä vanhan syklonimallin kanssa. Lisäksi Cavexin antama 122 %:n kiertokuorma mahdollistaa vanhan syklonin 47 %:n kiertokuormaan verrattuna myllyn suuremman kapasiteetin. Cavex -syklonin osalta on alitietämyksen optimoimiseksi syytä harkita pienemmän aliteholkin asentamista.

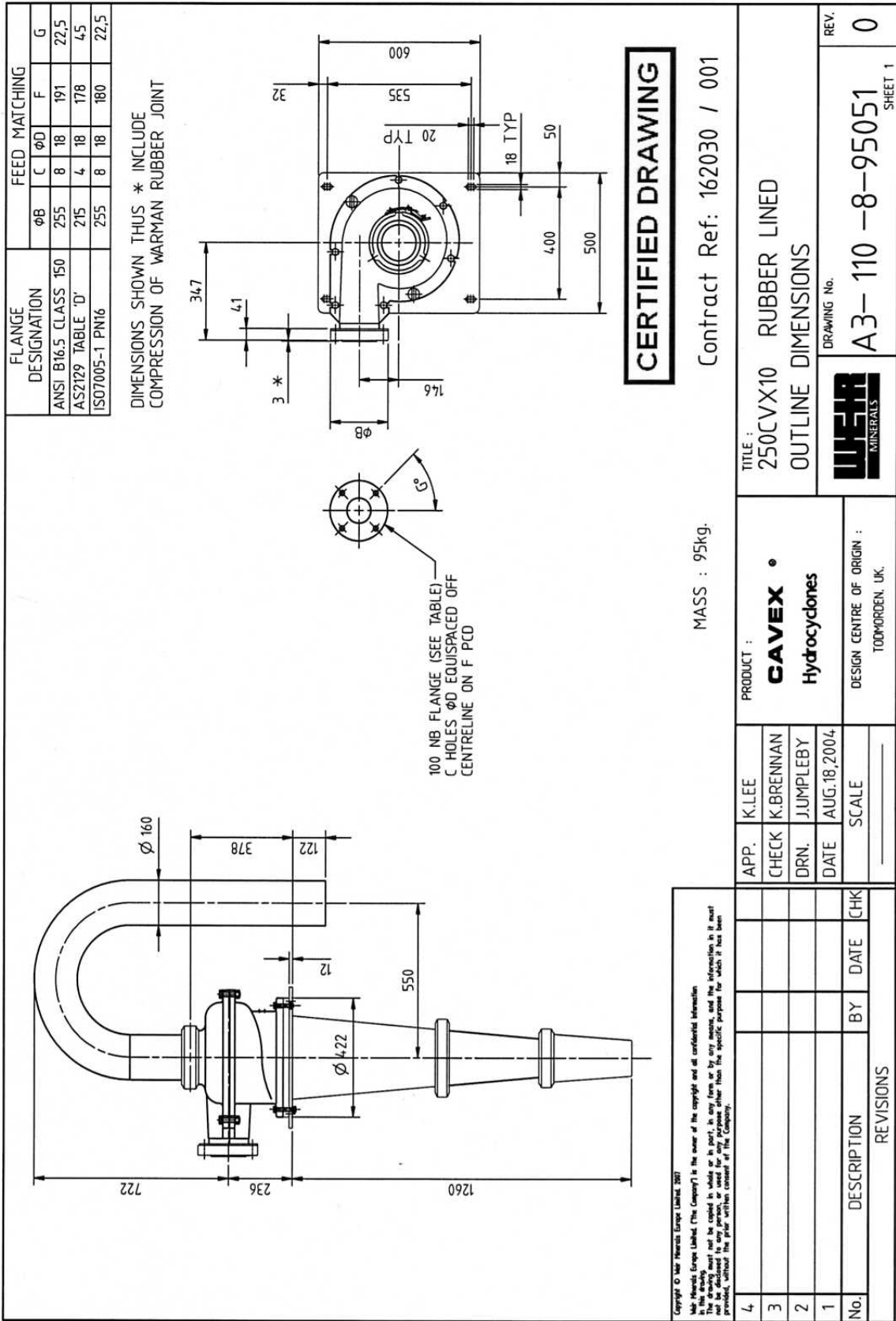
Lohkaremylly 2:n pumppausta käsitelleessä osiossa todettiin ettei pumpun kierrosnopeuden pudottamisella 1240 kierroksesta 747 kierrokseen minuutissa saatu

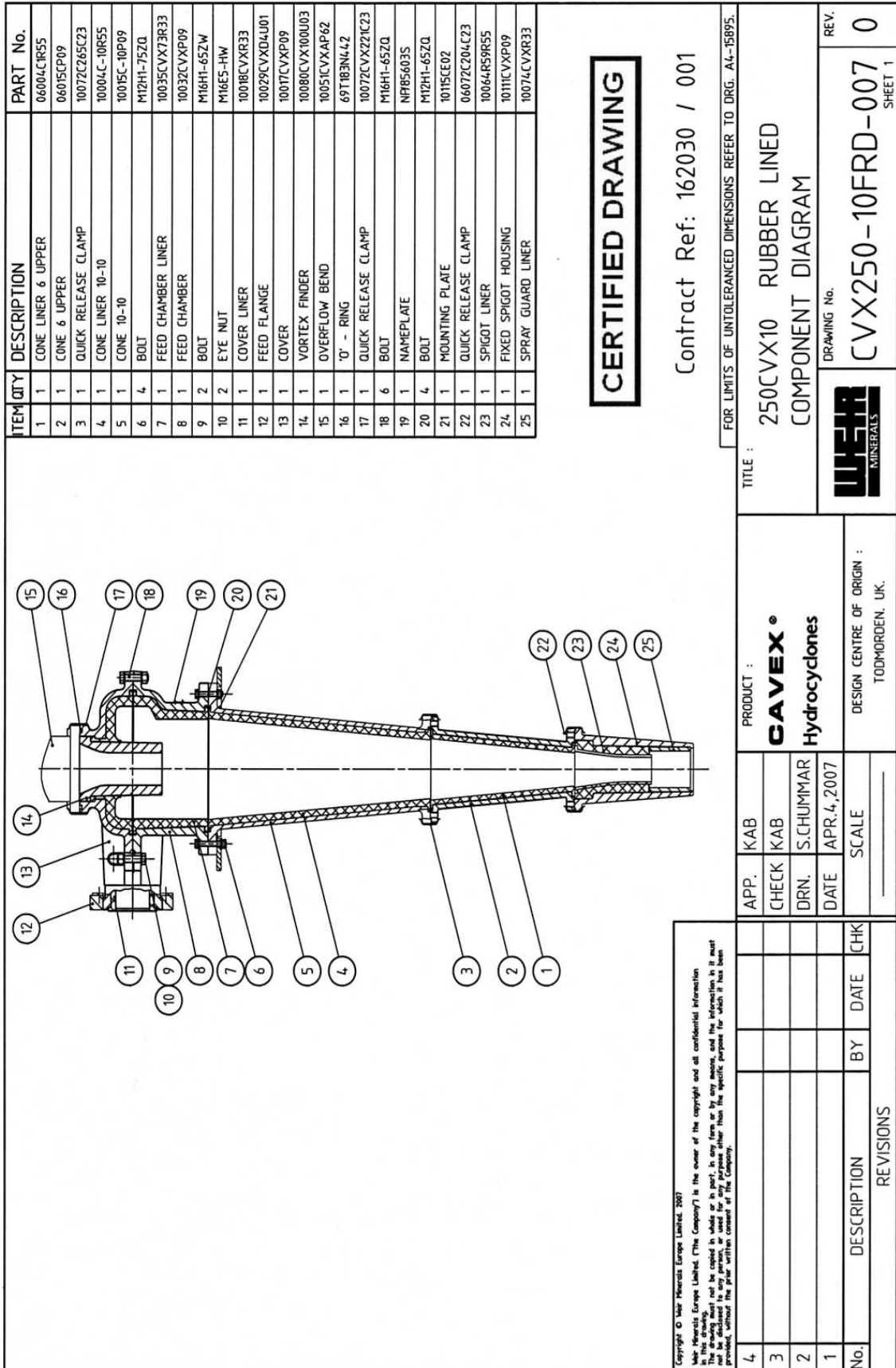
pumppukaivon pinnankorkeutta nousemaan eikä toisaalta havaittu merkittäviä muutoksia myöskään luokitustuloksissa. Tämä johtui pumppauksen huomattavasta ylikapasiteetista, sillä pumpun kierrosnopeuden lasku ei vähentänyt pumpattavan lietteen määrää. Työn osalta ei siis päästy pyörimisnopeusalueelle, jossa lietteen pumppauksen vaatima teho ja pumpun ottama teho olisivat olleet keskenään tasapainossa. Toisaalta jo pelkällä työssä saavutetulla kierrosmäärän laskulla voidaan säästää sähköä vuodessa noin 90 000 kWh. Pumppujen moottoreita aikanaan uusittaessa on syytä harkita nykyisiä selvästi pienempien ja huomattavasti halvempien moottorien hankkimista.

7 Lähteet

1. Lukkarinen, T. 1985. Mineraalitekniikka, Osa 1. Helsinki. Insinööritieto Oy.
2. Wills, B. 2006. Will's Mineral Processing Technology. Oxford. Butterworth-Heinemann. ISBN: 0-7506-4450-8
3. Miettinen, T & Grau, R. 2007. Grinding capacity enhancement of Harjavalta slag concentrator: determination of circulation load and classification efficiency. Outotec.
4. Arterburn, R. The Sizing and Selection of Hydrocyclones [verkkodokumentti]. 2001 [viitattu 8.10.2007]. Saatavissa: http://www.krebs.com/documents/83_sizing_select_cyclones.pdf
5. Olson, T. & Turner, P. Hydrocyclone Selection for Plant Design [verkkodokumentti]. 2003 [viitattu 8.10.2007]. Saatavissa: http://www.krebs.com/documents/75_hydrocyclone_selection_for_plant_design-mppd_oct_2002.pdf
6. Tekninen korkeakoulu. Hydroykloni [verkkodokumentti]. 2006 [viitattu 8.10.2007]. Saatavissa: <http://www.tkk.fi/Units/ChemEng/kurssit/kem423000/ohjeet/13-ohje.pdf>
7. EVTEK –ammattikorkeakoulu. Taajuusmuuttajan mitoitus [verkkodokumentti]. 2003 [viitattu 8.10.2007]. Saatavissa: http://users.evtek.fi/~majjal/zk03/Materiaalia/LVI_sahkonkaytto/luennot33-36teksti.pdf







ITEM	QTY	DESCRIPTION	PART No.
1	1	CONE LINER 6 UPPER	06004C1R55
2	1	CONE 6 UPPER	06015CP09
3	1	QUICK RELEASE CLAMP	10072C265C23
4	1	CONE LINER 10-10	10004C-10R55
5	1	CONE 10-10	10015C-10P09
6	4	BOLT	M12H1-75ZQ
7	1	FEED CHAMBER LINER	10035CVX73R33
8	1	FEED CHAMBER	10032CVXP09
9	2	BOLT	M16H1-65ZW
10	2	EYE NUT	M16E5-HW
11	1	COVER LINER	10018CVXR33
12	1	FEED FLANGE	10029CVXD4J01
13	1	COVER	10017CVXP09
14	1	VORTEX FINDER	10080CVX100U03
15	1	OVERFLOW BEND	10051CVXAP62
16	1	'O' - RING	69T183N442
17	1	QUICK RELEASE CLAMP	10072CVX221C23
18	6	BOLT	M16H1-65ZQ
19	1	NAMEPLATE	NF85603S
20	4	BOLT	M12H1-65ZQ
21	1	MOUNTING PLATE	10115CE02
22	1	QUICK RELEASE CLAMP	06072C204C23
23	1	SPIGOT LINER	10064RS9R55
24	1	FIXED SPIGOT HOUSING	10111CVXP09
25	1	SPRAY GUARD LINER	10074CVXR33

CERTIFIED DRAWING

Contract Ref: 162030 / 001

APP. <input type="checkbox"/> KAB CHECK <input type="checkbox"/> KAB DRN. <input type="checkbox"/> S.CHUMMAR DATE <input type="checkbox"/> APR.4,2007		PRODUCT : CAVEX® Hydrocyclones		TITLE : 250CVX10 RUBBER LINED COMPONENT DIAGRAM	
		SCALE		DRAWING No. CVX250-10FRD-007	
No. _____		DESCRIPTION _____		REV. _____	
REVISIONS		DESIGN CENTRE OF ORIGIN : TOOMORDEN, UK.		SHEET 1	

Copyright © Umicore Minerals Europe Limited, 2007
 Umicore Minerals Europe Limited ("the Company") is the owner of the copyright and all confidential information in this drawing.
 This drawing must not be copied, in whole or in part, in any form or by any means, and the information in it must not be disclosed to any third party without the prior written consent of the Company.

FOR LIMITS OF UNTOLERANCED DIMENSIONS REFER TO DRG. A4-15895.

	11.1.2008			14.1.2008			21.1.2008		
	Alite	Syöte	Ylite	Alite	Syöte	Ylite	Alite	Syöte	Ylite
Kiintoaine+vesi, kg	28,1	18,4	11,5	27,1	18,1	8,2	24,2	22,7	8,8
Selkeytynyt vesi, kg	3,2	1,3	4,1	2,7	1,1	2,7	3,3	1,0	2,2
Kiintoaine+kosteus, kg	24,9	17,1	7,4	24,4	17,0	5,5	20,9	21,7	6,6
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Syöte märkäpaino, g	187	215	156	162	178	167	162	172	115
Syöte kuivapaino, g	164	187	137	144	158	147	134	142	96
Kosteus, %	12,3	13,0	12,2	11,1	11,1	12,0	17,3	17,4	16,5
Keskiarvo, %	12,5			11,4			17,1		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ylite märkäpaino, g	166	165	205	109	98	127	167	184	171
Ylite kuivapaino, g	138	139	171	92	80	104	110	125	116
Kosteus, %	16,9	15,8	16,6	15,6	18,4	34,1	32,1	32,2	16,6
Keskiarvo, %	16,4			17,4			32,8		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Alite märkäpaino, g	184	185	165	145	187	173	156	170	139
Alite kuivapaino, g	156	158	142	123	161	147	135	145	119
Kosteus, %	15,2	14,6	15,2	15,2	13,9	15,0	13,7	15,0	14,7
Keskiarvo, %	14,6			14,7			14,5		
	Alite	Syöte	Ylite	Alite	Syöte	Ylite	Alite	Syöte	Ylite
Jäännöskosteus, kg	3,6	2,1	1,2	3,6	1,9	1,0	2,6	3,7	2,2
Kiintoaine, kg	21,3	15,0	6,2	20,8	15,1	4,5	18,3	18,0	4,4
Kiintoaine, %.	75,8	81,5	53,9	76,8	83,4	54,9	75,6	79,3	50,0

LM1: kiintoainepitoisuudet				
Näytteenottoaika	11.1.2008	14.1.2008	21.1.2008	Keskiarvo
Alitteen kiintoainepitoisuus, %	75,8	76,8	75,6	76,1
Ylitteen kiintoainepitoisuus, %	53,9	54,9	50,0	52,9
Myllyn tuotteen kiintoainepitoisuus, %	81,5	83,4	79,3	81,4

Cavex 250CVX10: alite					
Mittaus	Aika, s	Aika, h	Massa, kg	Massa, t	Massavirta, t/h
1	1,44	0,000400	24,0	0,024	60,0
2	1,54	0,000428	25,0	0,025	58,4
3	1,67	0,000464	26,0	0,026	56,0
					Ka. 58,1

LM1:n kuonasyöttö		
Päivämäärä	Kuonasyöttö mittausjakson aikana (3h), t	Kuonasyöttö, t/h
11.1.2008	110,5	36,8
14.1.2008	123,0	41,0
21.1.2008	92,4	30,8
		Ka. 36,2

LM1: pumppukaivon lisävesi					
Mittaus	Aika, s	Aika, h	Tilavuus, m ³	Tilavuusvirta, m ³ /h	Massavirta, t/h
1	33,77	0,009381	0,245	26,1	26,1
2	34,04	0,009456	0,245	25,9	25,9
					Ka. 26,0

LM1: etupään vesi						
Mittaus	Aika, s	Aika, h	Tilavuus, l	Tilavuus, m ³	Tilavuusvirta, m ³ /h	Massavirta, t/h
1	9,3	0,002583	14,6	0,0146	5,65	5,65
2	9,8	0,002722	15,3	0,0153	5,62	5,62
3	9,3	0,002583	14,6	0,0146	5,65	5,65
4	7,7	0,002139	12,0	0,0120	5,61	5,61
						Ka. 5,63

LM2:n pumppu					
Pyörimisnopeuden asetus (%)	100	75	65	50	35
Pyörimisnopeus; moottori (rpm)	1472	1247	1157	1022	887
Pyörimisnopeus; pumppu (rpm)	1240	1050	974	861	747
Pumppausteho (kW)	16,8	12	9,9	7,5	4,8
Sähkönkulutus/a 87% käyntiasteella (kWh)	128036	91454	75450	57159	38106
Ero 100%:iin (kWh)	0	-36582	-52586	-70877	-89930