

**LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO**

Kemiantekniikan laitos

Erotustekniikan osasto

BJ10A0101 Kandidaatintyö ja seminaari

**Kandidaatintyö:  
Hienojauhatus helmi- ja planeettamyllyllä**

Tekijät:	Jani Lindén, 0295571 Marja Neuvonen, 0296020
Tarkastaja:	Ritva Tuunila
Päivämäärä:	28.10.2009

## SYMBOLILUETTELO

$C$	aineominaisuuksista riippuva vakio, -
$E$	Energian tarve, kW h t <sup>-1</sup>
$K_R$	Rittingerin vakio, kW m s kg <sup>-1</sup>
$x$	keskimääräinen partikkelikoko, m
$x_1$	materiaalin keskimääräinen alkukoko, m
$x_2$	materiaalin keskimääräinen loppukoko, m
$\left(\frac{W}{m}\right)$	energiantarve massayksikköä kohden, kW h t <sup>-1</sup>
$\sigma$	materiaalin puristuslujuus, -

## Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	1
KIRJALLISUUSOSA .....	1
2 Jauhatus.....	1
2.1 Partikkelien rikkoutuminen .....	1
2.2 Energiankulutus jauhatuksessa .....	3
3 Hieno- ja ultrahienojauhatus.....	5
3.1 Rumpumaiset myllyt.....	6
3.2 Hieno- ja ultrahienojauhimet .....	10
3.3 Helmimylly .....	11
3.4 Planeettamylly .....	13
KOKEELLINEN OSA .....	18
4 Työn tarkoitus .....	18
5 Käytetyt materiaalit .....	18
6 Koelaitteistot ja mittausten suorittaminen .....	20
6.1 Helmimylly .....	21
6.2 Planeettamylly .....	21
6.3 Beckman Coulter LS 13 320 Partikkelikokoanalysaattori.....	21
7 Tulokset .....	22
7.1 Helmimylly .....	22
7.2 Planeettamylly .....	28
7.3 Johtopäätökset.....	34

## 1 Johdanto

Hienojauheet ovat mekaanisesti jauhettuja partikkeleja, joiden keskimääräinen partikkelikoko on pienempi kuin 100 µm. Jauhatusessa saatuja tuotteita käytetään muun muassa sementti-, maali-, keramiikka-, lasi- ja paperiteollisuudessa sekä elintarvike-, kemian-, rehu- ja agroteollisuudessa. Tässä kandidaatin työssä tarkasteltiin kalkkikiven, kahden eri kvartsin ja wollastoniitin hienojauhatus planeetta- ja helmimyllyllä. Jauhatus suoritettiin molemmilla laitteilla panosprosessina märkäjauhatusena. (Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology<sup>1</sup>, Oriplan<sup>2</sup>)

## KIRJALLISUUSOSA

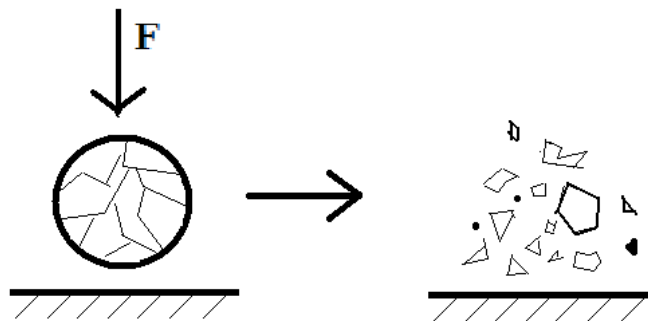
### 2 Jauhatus

Jauhatusella tarkoitetaan kiintoaineiden pienentämistä ja se on materiaalin hienontamisen viimeinen vaihe. Jauhatusen tarkoitus on tuottaa karkeasta materiaalista pienempää tuotetta, halutun loppukäyttökoon ja puhtaaksijauhatusasteen mukaisesti, jotka määräytyvät käyttötarkoituksen mukaan. Puhtaaksijauhatusaste riippuu kullekin mineraalille ominaisesta raakoosta, esiintymistavasta ja suhteellisesta määrästä. Esimerkiksi maaliteollisuus tarvitsee väriaineiksi pigmenttejä, jotka on jauhettu ultrahienoiksi, joiden partikkelikoko on pienempi kuin 10 µm. (McCabe *et al.*<sup>3</sup>, Hukki<sup>4</sup>)

#### 2.1 Partikkelien rikkoutuminen

Partikkeleiden tai kappaleiden pienentäminen voidaan selittää yksinkertaisimmillaan kappaleeseen kohdistuvan voiman mukaan. Materiaalin pienentämisen perusedellytyksenä on, että riittävän suuri voima kohdistuu rikottavaan partikkeliin. Mitä suurempi voima kappaleeseen kohdistuu, sitä useampaan osaan se hajoaa. Partikkelien hajoaminen riippuu myös tavasta, jolla voima siihen kohdistetaan. Mitä pienempi partikkeli on kooltaan, sitä suurempi voima vaaditaan sen hajottamiseen, johtuen epäjatkuvuuskohtien vähemmästä

määrästä. Kappaleen hajoamiseen kohdistuva voima ja kappaleen hajoaminen on esitetty pääpiirteittäin kuvassa 1. Hajoamisen kannalta oleellista on myös nopeus, jolla voima kohdistetaan partikkeliin. Mitä suuremmalla nopeudella voima kohdistetaan, sitä tehottomammin energiaa käytetään ja tästä seuraa myös hienomman aineksen suurempi osuus. Tasaisemman murtuman aikaansaamiseksi kannattaa partikkeliin kohdistaa pienempi voima, mutta pidempi aika, jolloin partikkeli joutuu puristusvoiman alaiseksi ja näin saadaan tasaisempi lopputulos partikkelikokojakaumassa. (Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology<sup>1</sup>, Ullman´s encyclopedia of industrial chemistry<sup>5</sup>)



Kuva 1 Kappaleeseen kohdistuva voima hajottaa partikkelin osiin epäjatkuvuuskohdista. (modifioitu lähteestä Tuunila<sup>6</sup>)

Kappalekoon pienentämisen prosessit jaetaan osiin halutun loppukoon perusteella. Yksikköprosesseja kiinteiden kappaleiden pienentämiseen ovat murskaus, jauhatus ja hienojauhatus sekä leikkaus. Coulson *et al.*<sup>7</sup> mukaisesti, murskaimen syöttökoon ollessa 1500 – 40 mm kappaleet pienenevät 50 - 5 mm:n kokoiseksi murskeeksi. Jauhatukseen käytetty laitteisto voi jauhaa murskaimelta saadun murskeen 5 – 0,1 mm:n kokoisiksi rakeiksi. Hienojauhatuslaitteet pystyvät vastaanottamaan 5 – 2 mm:n kokoisista rakeita ja tekemään niistä jauhetta jonka partikkelit ovat 0,1 mm:n kokoisia. Alle 0,1 mm:n tuotteen saavuttamiseen on käytettävä kolloidimyllyjä tai ultrahienojauhimia. (Ullman´s encyclopedia of industrial chemistry<sup>5</sup>, Coulson *et al.*<sup>7</sup>)

Jauhatuslaitteen valinnassa on huomioitava myös jauhettavan aineen ominaisuudet, joita ovat muun muassa: kovuus, rakenne, vaadittu murskausvoimakkuus, hauraus, tahmeus. Myös myllyn läpimitta ja jauhinkappaleiden koko on valittava myllyn nopeuden, jauhettavan materiaalin sekä halutun tuotteen perusteella. Jauhatus tuotteet koostuvat aina erikokoisista partikkeleista, jotka vaihtelevat maksimikoosta hyvin pieniin partikkeleihin. (McCabe *et al.*<sup>3</sup>)

Jauhatuslaitteita on sekä panos- että jatkuvatoimisia, ja jauhatusta voidaan suorittaa molemmissa kuiva- tai märkäjauhatusena riippuen jauhettavasta tuotteesta tai myllyn ja jauhinkappaleiden valinnasta. Märkäjauhatusessa väliaine pienentää kitkaa, jolloin tuotteesta saadaan keskimääräiseltä partikkelikooltaan pienempää ja tällöin jauhatusta on energiatehokkaampaa kuin kuivajauhatusena. Normaaleissa olosuhteissa jauhatuslaitteistoissa käytetään irrallisia jauhinkappaleita, jolloin jauhaminen perustuu iskuun, hiertoon ja puristukseen. Jauhinkappaleiden materiaaleina käytetään metalleja, lasia sekä kovia mineraaleja. Yleisimmät jauhatuksessa käytetyt laitteet kaivosteollisuudessa ovat erilaiset tanko-, kuula- ja autogeenimyllyt. Hukin<sup>4</sup> mukaan karkeajauhatusta perustuu iskuihin, joita putoavat kappaleet saavat myllyssä aikaan, tätä tekniikkaa käyttävät hyväkseen muun muassa tanko- ja aerofall-myllyt. (Hukki<sup>4</sup>)

## **2.2 Energiankulutus jauhatuksessa**

Murskaus ja jauhatusta ovat yksi suurimmista energian kuluttajista prosessiteollisuudessa. Näiden prosessien energiatehokkuus on heikko. Suuri hukkaenergia edellä mainituissa prosesseissa johtuu kappaleen pienentämisessä syntyvästä mekaanisesta rasituksesta, joka muuttuu lämmöksi. Laboratoriokokeissa on havaittu, että pahimmassa tapauksessa ainoastaan 1 % energiasta kuluu kappaleiden pienentämiseen, muun energian kuluessa lämmön syntymiseen sekä laitteiston käyntiin. Parhaimmillaan myllyt voidaan optimoida käyttämään energiasta jopa 25 – 60 % jauhatukseen valitsemalla oikein kierrosnopeudet sekä jauhinmateriaalit. Myllyn kokonaistehokäyttö muodostuu

tyhjäkäyntitehon ja jauhinkuorman liikuttamiseen tarvittavan tehon summasta. (McCabe *et al.*<sup>3</sup>, Hukki<sup>4</sup>)

Yleisimmät hienonnukselle määritellyt hyötysuhteet ovat muun muassa seuraavat:

- *Kalorimetrinen hyötysuhde kertoo varsinaisen hienonnustyön energian suhteen käytettyyn energiaan, josta on vähennetty laitteiden mekaaniset häviöt.*

- *Mekaaninen hyötysuhde puolestaan määrittää prosessissa syntyneet lämmön ja hienonnustyön energioiden summan suhteessa käytettyyn kokonaisenergiaan.*

Hyötysuhteita käytetään optimoimaan jauhimien tehokkuutta. (Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology<sup>1</sup>)

Myllyn kapasiteetti riippuu ratkaisevassa määrin myllyn jauhinkappaleiden tehollisesta ominaispainosta sekä myllyn nopeudesta. Myös myllyn täyttöaste jauhinkuorman suhteen sekä jauhettavan materiaalin määrä vaikuttavat kapasiteettiin. (Hukki<sup>4</sup>)

Rumpumaisten myllyjen energian tarpeen laskemiseksi käytetään Grillandin yhtälöä. (Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology<sup>1</sup>, Coulson *et al.*<sup>7</sup>)

$$dE = d\left(\frac{W}{m}\right) = C \frac{dx}{x^p} \quad (1)$$

jossa

$\left(\frac{W}{m}\right)$	energiantarve massayksikköä kohden, kWh/t
$E$	Energian tarve, kWh/t
$C$	aineominaisuuksista riippuva vakio, -
$x$	keskimääräinen partikkelikoko, m
$p$	prosessin kertalukua osoittava eksponentti, -

Eri tuotekokoalueille on Grillandin yhtälöstä modifioitu hienojauhatukselle kehitetty Rittingerin laki, jonka ajatusmallina on olettaa partikkelien olevan homogeenisiä kuutioita. Rittingerin yhtälö sopii hyvin hienojauhatusalueelle. Alla on esitetty yksinkertaistettu malli teorian yhtälöstä. (Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology<sup>1</sup>, Beke<sup>8</sup>)

$$\frac{W}{m} = C \left( \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) = K_R \sigma_p \left( \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad (2)$$

jossa

$K_R$	Rittingerin vakio, $\frac{kWm}{\frac{kg}{s}}$
$x_2$	materiaalin keskimääräinen loppukoko, m
$x_1$	materiaalin keskimääräinen alkukoko, m
$\sigma$	materiaalin puristuslujuus, -

Kuulamylyjauhatusessa voidaan käyttää myös Bondin lakia, joka on myös johdettu Grillandin yhtälössä. Bondin laki on esitetty yhtälössä (3). Bondin lakia voidaan käyttää kun lopputuotteen keskimääräinen partikkelikoko on suurempi kuin 0,1 mm.

$$E = 2C_b \left( \frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}} \right) \quad (3)$$

jossa

$C_b$	Bondin vakio, $\frac{kW\sqrt{m}}{\frac{kg}{s}}$
-------	---

### 3 Hieno- ja ultrahienojauhatus

Hienojauhatuksessa jauhe jaetaan tuotekoon perusteella kolmeen eri kokoluokkaan: hienojauhe, jossa tuotteen keskimääräinen koko on 10  $\mu\text{m}$  - 100  $\mu\text{m}$ , superhienojauhe 1  $\mu\text{m}$  - 10  $\mu\text{m}$  ja ultrahienojauhe  $\leq 1 \mu\text{m}$ . (Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology<sup>1</sup>, Coulson *et al.*<sup>7</sup>)

Kuten yleensäkin jauhatuksessa myös ultrahienojauhatuksessa jauhaminen voi perustua iskuun, hiertoon tai puristukseen. Hienojauhatus voidaan toteuttaa esimerkiksi hierrejauhatuksena myllyissä, joissa jauhinkuormalla on mahdollisuus liikkua vuoraukseen nähden. Myllyn ja jauhinkuorman suunta on sama, mutta vuorauksen nopeus on suurempi kuin sitä vastaan nojaavan uloimman kerroksen



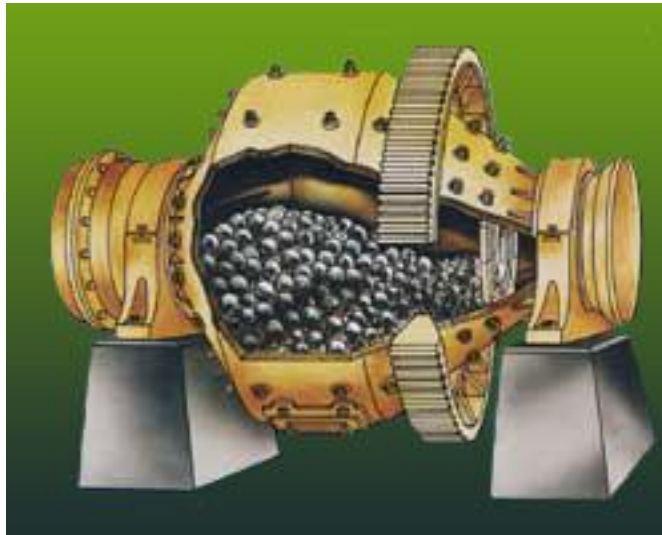
nopeus. Tällöin vuorauksen ja kuorman väliin muodostuu hierrevyöhyke, jonka kapasiteetti riippuu vyöhykkeen ja vuorauksen nopeuserosta. Suihkujauhatuksessa jauhettavat partikkelit pyörivät jauhinkammion kehällä ilma- tai kaasusuihkujen avulla, jolloin partikkelit törmäävät toisiin sekä hiertyvät jauhinkammion reunoja vasten. Partikkelit voidaan myös suihkuttaa törmäämään toisiaan vastaan. (Hukki<sup>4</sup>, Sturtevant<sup>9</sup>)

Valittaessa myllyä hienojauhatusprosessiin on huomioitava jauhettavan materiaalin ominaisuuksista mm. kovuus, lämpötilan kestävyys, kemiallinen reaktiivisuus, myrkyllisyys, leimahtavuus, viskositeetti, tuotteen puhtaus sekä lähtökoko. Jos jauhatusta suoritetaan kuivajauhatuksena, on huomioitava lisäksi tuotteen tiheys, reaktiot ilmankosteuden kanssa sekä virtauskyky.

### **3.1 Rumpumaiset myllyt**

Rumpumaisilla myllyillä on ominaista, että jauhettava materiaali joutuu isku- sekä hiertämisvoimien vaikutuksen alaiseksi. Yleisesti rumpumaiset myllyt ovat vertikaalisesti oman akselinsa ympäri pyöriviä sylintereitä.

Kuulamyly on sylinterinmuotoinen, oman akselinsa ympäri pyörivä jauhin, jota käytetään jauhamiseen ja sekoittamiseen. Se soveltuu malmien, keramiikan sekä rakennus- ja kemianteollisuuden materiaalien jauhamiseen. Jauhaminen voidaan toteuttaa erillisten jauhinkuulien avulla joko märkä- tai kuivajauhatuksena sekä panostoimisesti tai jatkuvatoimisesti. Myllyn sisäpuoli on päällystetty usein kulumista estävillä materiaaleilla kuten mangaaniteräksellä, kivikeramiikalla tai kumilla. Kuulamylyn toiminta perustuu sekä hiertymiseen että jauhamiseen. Myllyn pyöriessä jauhinkuulat ja jauhettava materiaali nousevat sentrifugaalisten voimien ansiosta myllyn kehälle, josta pudotessa ne iskeytyvät toisiaan vasten sekä hiertyvät myllyn reunoja ja jauhinkuulia vasten. Joissain myllyissä voi olla nostopalkkeja, jotka kuljettavat kuulat korkeammalle jauhimen kehälle, mikä tehostaa putoilevien kuulien murskaustehoa. (Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology<sup>1</sup>, Coulson *et al.*<sup>7</sup>)

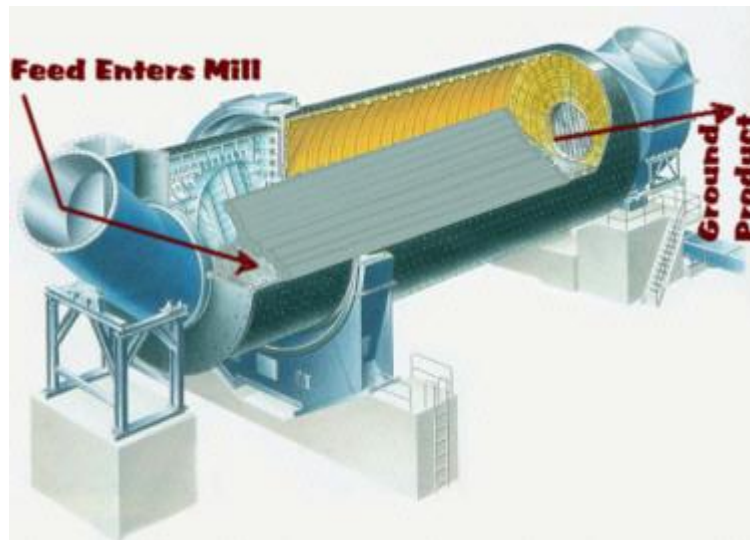


Kuva 2 Kartiomaisen kuulamylyn poikkileikkaus. (Metso<sup>10</sup>)

Jauhinkuulat ovat halkaisijaltaan 12 mm:stä 125 mm:iin ja ne on valmistettu yleisimmin ruostumattomasta teräksestä, mutta voivat olla myös keraamisia. Jauhinkuulien osuus on 30:stä 50 % myllyn tilavuudesta. Kuulamylyn tehokas toimintanopeus on noin 65:stä 75 % myllyn kriittisestä pyörimisnopeudesta, jolla tarkoitetaan nopeutta, jolla kuulat jäävät myllyn kehälle keskipakovoiman vaikutuksesta. Lisäksi jauhuneisuuden vaikuttavat materiaalinsyöttönopeus, jauhettavan materiaalin ominaisuudet, jauhinkuulien paino ja halkaisija. (Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology<sup>1</sup>, Coulson *et al.*<sup>7</sup>)

Tankomylly toimii samalla periaatteella kuin kuulamyly, mutta kuulien tilalla on tankoja. Tankomyllyä käytetään mineraali- ja malmiteollisuudessa sekä se soveltuu todella hyvin tahmeille materiaaleille jotka kuulamylyssä sitoisi kuulat ja jauhettavan materiaalin muuten yhteen. Tankomyllyjä on kolmea mallia, ylijuoksu, joka on ainut yleisessä käytössä oleva malli sekä loppuperifeerinen erotus ja keskeisperifeerinen erotus. Tankomyllyn suuri teho kuulamylyyn verrattuna saadaan jauhintankojen ja jauhettavan materiaalin suurella kosketuspinta-alalla jolloin voidaan pitää myllyn nopeus matalampana ja jauhinaika lyhyempänä. Kuluneet tai vahingoittuneet tangot on helppo vaihtaa

uusiin tankoihin. (Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology<sup>1</sup>, Coulson *et al.*<sup>7</sup>, Mine Engineer<sup>11</sup>)

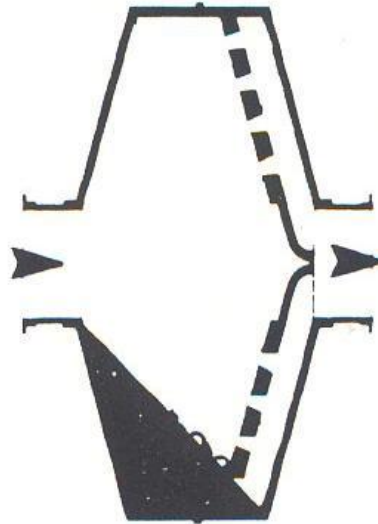


Kuva 3 Tankomyllyn poikkileikkaus. (Mine Engineer<sup>11</sup>)

Tangot ovat noin 50 mm halkaisijaltaan ja pituudeltaan koko myllyn mittaisia. Tangot valmistetaan erikoisteräksestä, hiiliteräksestä, jossa hiiltä on suuri osuus. Tankojen täyteaste on 35:stä 65 % myllyn tilavuudesta. Tankomylly pyörii oman akselinsa ympäri, jolloin tangot hankaavat ja tippuvat toisiaan sekä myllyn reunoja vasten. Tankomyllyllä saadaan hyvin tasajakeista mursketta vähällä energialla, mutta sillä ei voida jauhaa erittäin kovia materiaaleja. Jauhaminen voidaan suorittaa joko kuiva- tai märkäjauhatuksena sekä jatkuva - tai panostoimisena. Tankomyllyssä syöttökoon tulisi olla alle 25 mm halkaisijaltaan. (Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology<sup>1</sup>, Coulson *et al.*<sup>7</sup>, Mine Engineer<sup>11</sup>)

Autogeenimylly toimii mekaanisesti samalla tavalla kuin kuulamylly. Ne eroavat toisistaan käytettyjen jauhinkappaleiden puolesta. Autogeenimyllyssä käytetään jauhinkappaleina jauhettavan materiaalin isompia kappaleita tankojen tai metallikuulien sijasta. Jauhaminen tapahtuu myllyssä suurimmaksi osin hiertämälle ja vain osittain törmäisiskujen myötä. Paras kokojakauma saavutetaan,

kun lähtöainesyöttö sisältää karkeita ja hienoja partikkeleja. Autogeenimylly soveltuu jauhamisen lisäksi murskaukseen ja sekoitukseen. Jotta malmia voitaisiin jauhaa autogeenisesti, tulee syöttöpartikkelien painaa 2,5 kertaisesti loppukokoon nähden. Myllyn halkaisija on normaalisti kaksi tai kolme kertaa myllyn pituuden verran. Täyttöaste on 25:stä 35 % myllyn tilavuudesta. Pyörimisnopeuden tulee olla 55:stä 90 % myllyn kriittisestä pyörimisnopeudesta. Jauhaminen ja murskaaminen voidaan suorittaa myllyllä kuiva- sekä märkäjauhatuksena. (Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology<sup>1</sup>, Mine Engineer<sup>11</sup>)

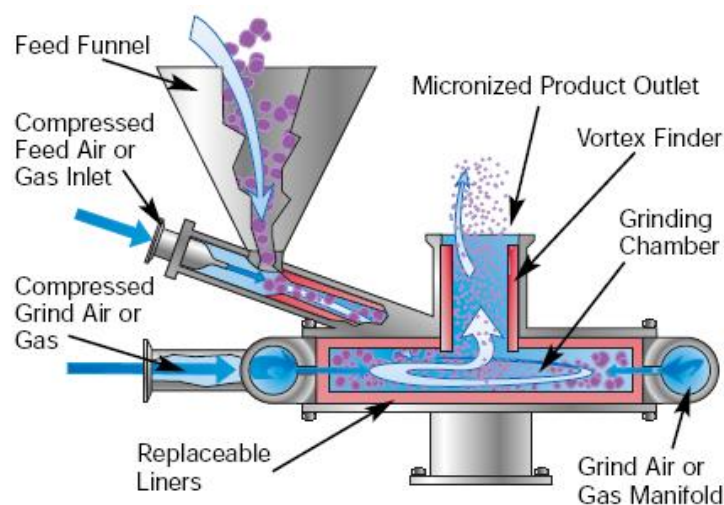


Kuva 4 Autogeenimyllyn jauhinastian poikkileikkaus. (Mining and Metallurgy Basics<sup>12</sup>)

Autogeenimyllyllä saavutetaan kaksi merkittävää etua verrattuna edellä mainittuihin myllyihin. Autogeenimyllyllä jauhettaessa vähennetään metallin kulumista ja poistetaan sekundääriset ja tertiääriset murskausvaiheet. Autogeenimylly on kalliimpi hinnaltaan kuin edellä mainitut myllyt, mutta edullisempi käytössä, sillä autogeenimyllystä puuttuvat kuluvat jauhinkappaleet. Lisäksi autogeenimylly kuluttaa energiaa vähemmän verrattuna kuula- tai tankomyllyyn. Semiautogeenimyllyissä lisätään jauhinastiaan pieni määrä kuulia spesifisen ja tarkemman jauhintuloksen saavuttamiseksi. (Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology<sup>1</sup>, Mine Engineer<sup>11</sup>, Marklund *et al.*<sup>13</sup>)

### 3.2 Hieno- ja ultrahienojauhimet

Suihkumylly on ultrahienojauhin, jonka toiminta perustuu törmäysvoimien ja hiertämisvoimien yhteisvaikutukseen. Suihkumyllystä on teollisuudessa monia erilaisia malleja, mutta kaikissa on samanlainen toimintaperiaate. Jauhettavaa materiaalia pyöritetään suurella nopeudella jauhinkammion kehällä ilma- tai kaasusuihkujen avulla, jolloin partikkelit törmäävät toisiinsa sekä lisäksi hiertyvät jauhinkammion reunoja vasten. Sentrifugaalisetvoimat pitävät suuria partikkeleita jauhinalueella ja sentripetaalisvoimat ajavat pienet partikkelit kohti jauhimen keskellä olevaa poistoaukkoa. Suihkumyllyn suurimpia käyttökohteita ovat keramiikka, kosmetiikka, lääketeollisuus, pigmentit, maatalouskemikaalit ja arvometallit. Suihkumyllyä käytetään, kun tarvitaan ominaisuuksiltaan hyvin hienojakeista sekä homogeenista tuotetta, ja kun märkäjauhatusta ei ole mahdollista. Suihkumyllyä käytetään karkean ja lämpöherkkien, usein hapettuvien ja räjähdysherkkien materiaalien jauhetukseen. Myllyllä voidaan jauhaa, materiaaleista riippuen, noin 50 µm:stä nanometrialueelle. Suihkuna voidaan käyttää puristettua ilmaa, höyryä tai inerttiä kaasua. (Sturtevant<sup>9</sup>, The Jet Pulverizer Company<sup>14</sup>, Promas Engineers<sup>15</sup>, Tuunila<sup>16</sup>)



Kuva 5 Suihkumyllyn toimintaperiaate. Jauhinkammiossa jauhattava materiaali kiihdytetään pyörimään kammion kehällä ilmanvirran avulla ja lopputuote poistuu keskeltä poistoaukon kohdalta. (Sturtevant<sup>9</sup>)

Jauhinkammion halkaisijat ovat kooltaan 5 cm:stä noin 1 metriin. Kammionvuoraus voidaan tehdä useista eri kulumista estävistä materiaaleista, kuten ruostumattomasta teräksestä, alumiinioksidista, silikakarbidista, wolframikarbidista, polyuretaanista tai UHMWPE:sta (ultra-high molecular weight polyethylene). (Sturtevant<sup>9</sup>)



Kuva 6 Sturtevantinc-yhtiön valmistama Micronizer-suihkumylly. (Sturtevant<sup>9</sup>)

### 3.3 Helmimylly

Helmimylly on paikallaan pysyvä vaaka- tai pystysuora sylinteri, jossa on erillinen sekoitinelin. Sekoittimella saadaan sylinterissä olevat helmet ja jauhattavat partikkelit voimakkaaseen liikkeeseen. Sekoittimen pyörimisnopeus voi suurimmillaan olla noin 2000 rpm. Helmimyllyssä hienontuminen tapahtuu pääasiallisesti hiertymällä, kiintoainepartikkelien hiertyessä helmien välissä. Käytettävät helmet eli jauhatuskuulat voivat olla materiaaliltaan lasi-, metalli-, alumiinioksidi- tai zirkoniumhelmiä myös kvartsihiekkää voidaan käyttää jauhinkappaleina. Helmien koko vaihtelee muutaman millimetrin koosta aina alle yhden millimetrin helmiin (0,5...5 mm). Jauhinkappaleet vaikuttavat lopputuotteen partikkelikokoon. Pienemmillä jauhinkappaleilla voidaan saada pienempää lopputuotetta kuin suuremmilla jauhinkappaleilla. Helmimyllyyn on

saatavilla erilaisia sekoittimia, kuten tapeilla, levyillä ja näiden kombinaatioilla varustettuja elimiä, jotka vaihtelevat tapauskohtaisesti. (Hukki<sup>4</sup>, Coulson *et al.*<sup>7</sup>)

Vaakasuora mylly, jossa sylinteri on makaavassa asennossa, on aina suljettu mylly. Pystymylly puolestaan voi olla joko suljettu tai avoin mylly. Molemmissa malleissa jauhettu materiaali poistuu myllystä seulan lävitse, jolloin jauhinkappaleiden sekoittuminen tuotteeseen estyy. (Hukki<sup>4</sup>)

Helmimyllyjä on panostoimisia ja jatkuvatoimisia. Jauhatus suoritetaan märkäjauhatuksena ja usein tarvitaan jäähdytystä lämmönkehityksen vuoksi. Helmimyllyjauhatusen lämpötilaa voidaan säätää, jos sylinteri sisältää erillisen vesivaippaisen lämmittimen tai jäähdyttimen. Jauhettava materiaali voidaan myös esilämmittää ennen jauhatuksen aloittamista. Materiaalit, joista valmistettujen lietteiden jauhamiseen helmimylly on sovelias, tulisi olla viskositeetiltaan väliltä 50 - 5000 mPas. (McCabe *et al.*<sup>3</sup>)

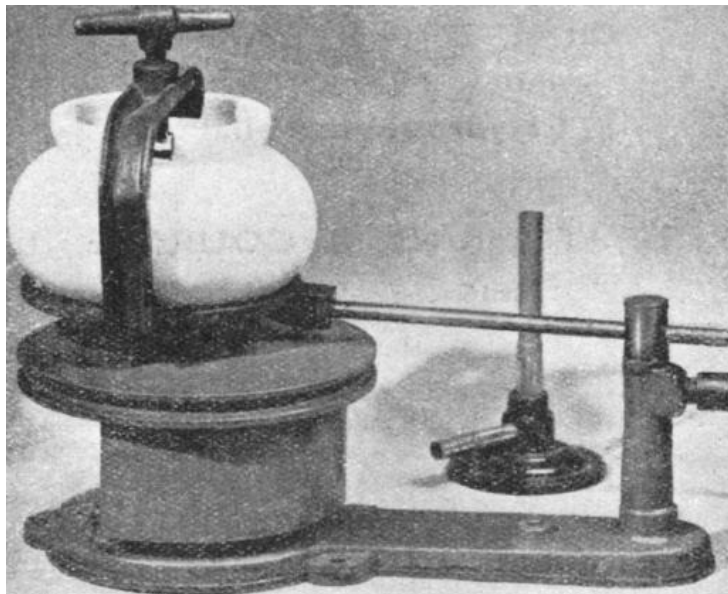


Kuva 7 Helmimyllyn poikkileikkaus. (Hosokawa Alpine<sup>17</sup>)

Jauhukseen vaikuttavia muuttujia ovat mm. jauhinkappaleiden ja materiaalin täyttöaste sekä jauhinkappaleiden koko. Muita muuttujia ovat sekoittimen pyörimisnopeus, jauhatusaika ja konsentraatio. Lisäksi jauhatuksen tehokkuutta voidaan parantaa apuaineilla. (Union process<sup>18</sup>, Velamakanni<sup>19</sup>)

### 3.4 Planeettamyly

Planeettamylyn historia ulottuu 1820-luvun alkupuolelle, jolloin ensimmäiset mallit myllystä esiteltiin tiedepiireissä. Sen ajan planeettamyly oli pieni 100 ml lukittava posliiniastia, joka pyöri ellipsimäistä rataa. Astian sisään laitettiin kaksi posliinikuulaa, jotka sentrifugaalivoimien ansiosta jauhoivat materiaaleja sen ajan normien mukaan tehokkaasti. Mylly pyöri 300 kierrosta minuutissa ja sitä pyöritti 0,1 hevosvoiman moottori. Ensimmäisen patentin planeettamylystä esitti Fritch-yhtiö vuonna 1961. Lisäksi vuonna 1995 Fritch-yhtiö patentoi planeetta myllyn jossa oli yksi jauhatusasema. (Royal Society of Chemistry<sup>20</sup>, Laboratory Talk<sup>21</sup>)



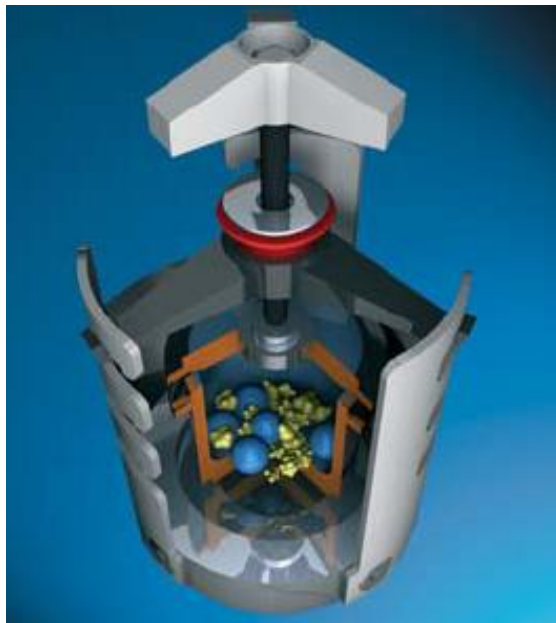
Kuva 8 1820-luvun planeettamyly. (Royal Society of Chemistry<sup>20</sup>)

Planeettamyly koostuu yhdestä tai useammasta jauhatusastiasta jotka sijaitsevat eksentrisesti aurinkopyörän kehällä. Jauhatusastiat pyörivät vastapäivään oman akselinsa ympäri. Kehä, jolla jauhatusastiat ovat, pyörii myötäpäivää jauhatusastioiden akselien suhteen. Planeettamylyssä jokaista jauhinastiaa vastaan on toinen jauhinastia tai kiinteä vastakappale kehän vastakkaisella puolella vastakkaisten keskipakovoimien takia. Kuvissa 4 ja 5 on esitetty erään valmistajan planeettamyly ja jauhinastian poikkileikkaus. (Retsch<sup>22</sup>)





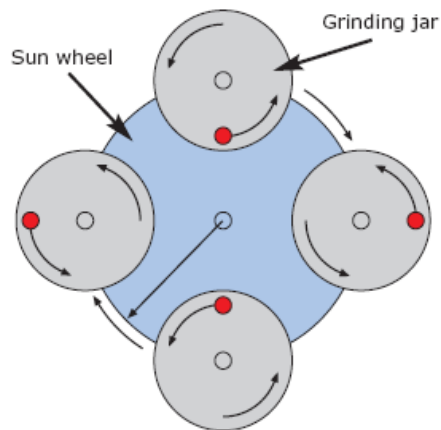
Kuva 9 Retsch Planeettamyly PM 100. (Retsch<sup>22</sup>)



Kuva 10 Planeettamylyllin jauhinastian poikkileikkaus. (Retsch<sup>22</sup>)

Jauhatusastia täytetään jauhinkuulilla ennen jauhatuksen aloittamista. Jauhatuksen alussa jauhinkuulat liikkuvat vastakkaiseen suuntaan kehään nähden. Jauhettavaan materiaaliin kohdistuu suuria kitkavoimia johtuen jauhinastian ja kuulien välisistä

nopeuseroista. Myllyn kiihdyttäessä pyörimisliikettä, coriolisvoimasta johtuen jauhinkeulat ajautuvat pois jauhatustastian seinämieltä iskeytyen muualle jauhinastiankehälle. Planeettamyly kehittää mallista riippuen 10 – 50 g:n keskipakovoiman. Planeettamylyn tehokas jauhaminen perustuu suuriin kitka- ja iskuvoimien yhteisvaikutukseen. (Perry's chemical engineers' handbook<sup>23</sup>, Brady<sup>24</sup>)



Kuva 11 Planeettamylyn toimintaperiaate, jossa jauhinasetat pyörivät oman akselinsa ympäri sekä vastakkaiseen suuntaan aurinkokehän ympäri. (Retsch<sup>22</sup>)

Planeettamylyllä voidaan jauhaa pehmeitä, säikeisiä, hauraita ja erittäin kovia materiaaleja. Planeettamyly soveltuu myös sekoitukseen, kolloidiseen jauhatukseen ja homogenisointiin. Jauhatustapahtuu panostoimisena, märkä- tai kuivajauhatuksena. Planeettamyly soveltuu hyvin mineraalien, malmien, lasin, keramiikan, jätteiden ja monien muiden materiaalien jauhamiseen. Planeettamylyä käytetään tehokkaasti lähes jokaisella teollisuus- ja tutkimussektorilla, joilla tuotteilta vaaditaan puhtautta, hienoutta sekä toistettavuutta mittauksilta sekä lyhyttä jauhatusaikaa. Tärkeimmät käyttökohteet ovat maatalous, biologia ja biotekniikka, lasi ja keramiikka, mineralogia ja metallurgia, lääketiede, ympäristötutkimus ja rakennusteollisuus. (Retsch<sup>22</sup>)



Kuva 12 Erilaisia planeettamylyissä käytettäviä jauhinastioita ja kuulia. (Retsch<sup>22</sup>)

Planeettamylystä monipuolisen ja tehokkaan tekee sen mukautettavuus jokaiselle jauhatukselle. Säädettäviä ajoparametreja ovat: kuulien määrä, koko ja materiaali; jauhinastian tilavuus, materiaali sekä lukumäärä, jos käytössä on monipaikkainen mylly. Koska planeettamylyllä on mahdollisuus jauhaa vain panostoisena, myllyä käytetään pääasiallisesti erikoistuotteiden valmistukseen pienillä kapasiteeteilla. (Retsch<sup>22</sup>)

Halutun jauhatustuloksen ja partikkelikoon saavuttamiseksi tulee ottaa huomioon useita myllyn ja jauhettavan materiaalin parametreja. Jauhinkuulien pienellä koolla ja suurella massalla saavutetaan paras ja taloudellisin tulos, joskin myllyn kuluminen on tällöin suurempaa. Tulokseen vaikuttaa myös jauhettavan materiaalin syöttökoko. Pienempään partikkelikokoon päästään kun jauhinmateriaalin syöttökoko on mahdollisimman pientä, jolloin voidaan käyttää pienempiä jauhinkuulia. Pienten jauhinkuulien käyttö lisää pienimpien partikkelien osuutta. Käyttäessä samasta materiaalista valmistettuja jauhinastiaa ja jauhinkuulia minimoidaan myllyn kuluminen eli mylystä irtoavien partikkelien määrää. (Coulson *et al.*<sup>7</sup>, Retsch<sup>22</sup>)

Jauhatus suositellaan tehtäväksi märkäjauhatuksena, mikäli haluttu partikkelikoko on pienempi kuin 1  $\mu\text{m}$ . Tällöin estetään pienten partikkelien kasaantumista

jauhatuksen aikana ja vähennetään lämmönmuodostusta kitkan vaikutuksesta. Jauhatusväliaineina käytetään yleisesti liuottimia, kuten alkoholeja ja vettä. Myös jauhettavan materiaalin liukoisuusominaisuudet on otettava huomioon, ettei jauhettava materiaali liukene väliaineeseen. Joillain materiaaleilla voi jauhautuneisuus laskea jauhatusajan lisääntyessä tai käytettäessä väliainetta. Tällöin jauhinenergia muuttuu lämpöenergiaksi ja myllyn energiatehokkuus laskee. (Retsch<sup>22</sup>)

Myös jauhinastian täyttöaste vaikuttaa jauhatustulokseen. Täyttöasteella tarkoitetaan sitä osaa minkä jauhinkuulat ja jauhettava materiaali täyttää jauhinastiasta. Suurella täyttöasteella jauhintulos voi heikentyä, koska jauhinkuulat eivät mahdu liikkumaan tarpeeksi tehokkaasti astiassa. (Coulson *et al.*<sup>7</sup>)

Lisäksi joillakin planeettamyllyillä voidaan seurata paineen- ja lämpötilan muutoksia asentamalla laitteistoon sisätila-antureita ja siten arvioida jauhatuksen etenemistä myllyssä. Jauhatuksessa ei tapahdu ainehäviöitä. Jauhinastiat ja jauhinkuulat valmistetaan yleensä ruostumattomasta teräksestä, mutta saatavilla on myös akaatista, sintratusta korundista, zirkonium(IV)oksidista, wolframikarbidista ja muista erikoisteräksistä valmistettuina. Jauhinastiat ovat kokoluokaltaan 12 - 500 ml. Jauhinkuulat ovat halkaisijaltaan 5 – 25 mm. Valmistajan mukaan, jauhinastia tulisi täyttää suhteessa 1/3 kuulia ja 1/3 näytettä astian tilavuudesta. (Retsch<sup>22</sup>)

## KOKEELLINEN OSA

### 4 Työn tarkoitus

Työssä tutkittiin kalkkikiven, kahden eri kvartsin ja wollastoniitin hienojauhatusta käyttäen helmi- ja planeettamyyllyä ja laitteiden soveltavuutta näiden materiaalien hienojauhatukseen.

### 5 Käytetyt materiaalit

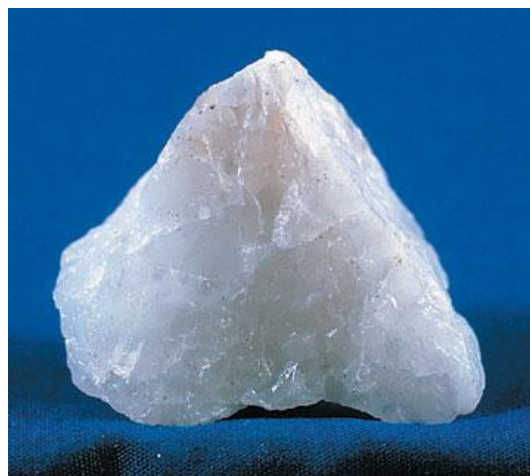
Materiaaleina käytettiin kalkkikiveä, kahta erilaista kvartssia ja wollastoniittia. Kvartsit olivat Turkista ja Belgiasta, kalkkikivi ja wollastoniitti Lappeenrannasta. Kalkkikivi murskattiin leukamurskaimella ennen seulontaa. Jokainen materiaali seulottiin ja seulonnasta otettiin jauhattavaksi partikkelit, jotka olivat pienempiä kuin 710 µm. Käytetyistä materiaaleista kaikki olivat väriltään valkoisen ja harmaan sävyisiä. Käytettyjen materiaalien mediaanikoot vaihtelivat hieman toisistaan. Kalkkikivellä mediaanikoko oli 320,4 µm, kvartsi Turkilla oli 285,7 µm, kvartsi Belgiassa oli 393,3 µm ja wollastoniitilla oli 161,6 µm.

**Kalkkikivi (CaCO<sub>3</sub>)**, jonka moolimassa on 100,1 g/mol ja tiheys 2,71 g/cm<sup>3</sup>, kuuluu sedimenttikivi ryhmään, joka on muodostunut merenpohjalla kuolleiden eliöiden jäänteistä. Kalkkikivi voi sisältää muun muassa piitä, alumiinia ja kaliumia. Kalkkikiven väri vaihtelee vaaleasta mustaan. Raudan läsnäolo muuttaa väriä punaisen sävyiseksi. Kalkkikiven suurimpia käyttäjäryhmiä ovat sementti- ja metalliteollisuus, maatalous sekä sitä käytetään muun muassa rikkikaasun poistossa. Kalkkikivi on maailmalla hyvin yleinen kivilaji, mutta Suomessa sitä esiintyy niukasti. (Brady<sup>24</sup>, Ullman's encyclopedia of industrial chemistry<sup>25</sup>)



Kuva 13 Kalkkikivi. (Bureau Of Economic Geology<sup>26</sup>)

**Kvartsi ( $\text{SiO}_2$ )**, jonka moolimassa on 60,1 g/mol ja tiheys on 2,6 g/cm<sup>3</sup>, kuuluu hohkasiliikaattiryhmään, joka voi sisältää epäpuhtauksina rautaa, alumiinia, hapettunutta nikkeliä, titaania, magnesiumia. Kvartsi on yleisin muoto piidioksidista. Kvartsi voi olla väriltään valkoinen, mutta usein se on värjätynyt keltaiseksi, punaiseksi, ruskeaksi, vihreäksi, siniseksi tai mustaksi. Sitä käytetään mm. lasin ja keramiikan raaka-aineena, koruissa, jalokivinä sekä valimohiekkana. (Brady<sup>24</sup>, Encyclopedia of minerals<sup>27</sup>)



Kuva 14 Kvartsikide. (Bureau Of Economic Geology<sup>26</sup>)

**Wollastoniitti** ( $\text{CaSiO}_3$ ), jonka moolimassa on 116,2 g/mol ja tiheys on 2,8 – 3,1 g/cm<sup>3</sup>, luokitellaan pyroksenoidiryhmään kuuluvaksi malmiksi, joka voi sisältää kalsiumin substituenttina pieniä määriä rautaa, magnesiumia ja mangaania. Wollastoniitti voi olla väritään valkoinen, kellertävänvalkoinen, punertavanvalkoinen tai joskus harmaa. Sitä käytetään keramiikassa, maalien-, tiilien- ja paperinvalmistuksessa. (Brady<sup>24</sup>, Suomen Kansallinen Geologian Komitea<sup>28</sup>, Kiviopas<sup>29</sup>)



Kuva 15 Wollastoniitin pinta läheltä tarkasteltuna. (Kiviopas<sup>29</sup>)

## 6 Koelaitteistot ja mittausten suorittaminen

Koelaitteistoina jauhamiseen käytettiin laboratoriomittakaavan helmi- ja planeettamylyä. Jauhatukset suoritettiin märkäjauhatuksena panostoimisesti. Tutkittavina materiaaleina olivat kalkkikivi, kvartsi ja wollastoniitti. Lietteet olivat 30 paino-% ja väliaineena käytettiin vettä. Planeettamylyllä panostettiin jokainen näyte erikseen kun helmimylyllä yhdestä panostuksesta otettiin kaikki näytteet. Näytteiden analysointiin käytettiin Beckman Coulter LS 13 320 partikkelikokoanalysointilaitetta, jolla analysoitiin jauhatustulokset sekä materiaalien lähtökoot. Keskimääräisinä partikkelikoko käytettiin mediaania, joka on kumulatiivisen jakauman 50 % osuutta kuvaava partikkelikoko.

### **6.1 Helmimylly**

Helmimyllynä käytettiin 1,8 dm<sup>3</sup> teräksistä jauhinastiaa ja 1 kg lasisia jauhinhelmiä, jotka olivat halkaisijaltaan 3 mm. Jauhatus suoritettiin pystymyllyllä panostoisena. Sekoittimena käytettiin teräksistä tappisekoitinta ja sekoittimen pyörimisnopeudet olivat 400, 550 ja 700 rpm. Näytteet otettiin 0, 5, 10, 20, 60 ja 120 min jauhatusajan jälkeen. Jauhettavaa materiaalia käytettiin 200 g kussakin panoksessa ja se jauhettiin 30 painoprosenttisena vesilietteenä.

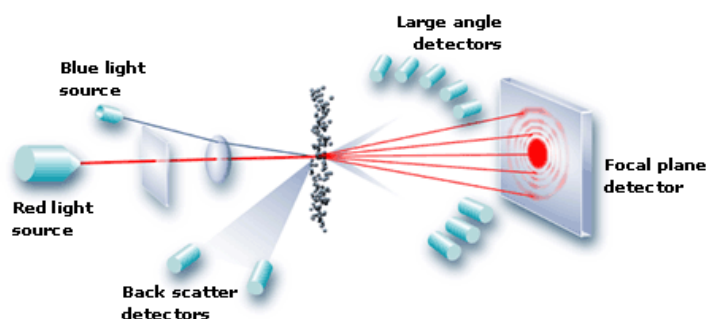
### **6.2 Planeettamylly**

Planeettamyllynä käytettiin 0,25 dm<sup>3</sup> teräksistä jauhinastiaa ja jauhinkuulina 100 kpl halkaisijaltaan 1 cm teräskuulia.. Myllyn pyörimisnopeudet olivat 300, 450 ja 600 rpm. Jauhatusajat olivat 0, 1, 2, 4, 6 ja 10 min. Jauhettavaa materiaalia käytettiin 20 g kussakin panoksessa ja se jauhettiin 30 painoprosenttisena vesilietteenä.

### **6.3 Beckman Coulter LS 13 320 Partikkelikokoanalysointilaitteisto**

Lähtöaineiden ja tuotteiden partikkelikokojakaumat analysoitiin Beckman Coulter LS 13 320 laserdiffraktioanalysointilaitteistolla, jossa käytettiin ALM (Aqueous Liquid Module) moduulia. Laserdiffraktioanalysointilaitteiston toiminta perustuu siihen, että partikkeleista sironneen valon intensiteetin sirontakulmajakauma on riippuvainen partikkelien kokojakaumasta. Toimintaperiaate on esitetty kuvassa 16, jonka mukaan erikokoiset partikkelit siroavat valoa erikohtiin detektorilla. (Chemie<sup>30</sup>, Beckman Coulter<sup>31</sup>, Fukai<sup>32</sup>)





Kuva 16 Laseranalysaattorin toimintaperiaate. Partikkelikoon pienentyessä, valon sirontakulma kasvaa logaritmisesti. (Malvern<sup>33</sup>)

Analysaattori käyttää patentoitua PIDS (Polarization Intensity Differential Scattering) tekniikkaa. Beckman Coulter LS 13 320 pystyy analysoimaan partikkeleita väliltä  $0,4\mu\text{m}$  -  $2000\mu\text{m}$ . (Chemie<sup>30</sup>, Beckman Coulter<sup>31</sup>)



Kuva 17 Beckman Coulter LS 13 320 Laserdiffraktioanalysaattori. (Beckman Coulter<sup>31</sup>)

## 7 Tulokset

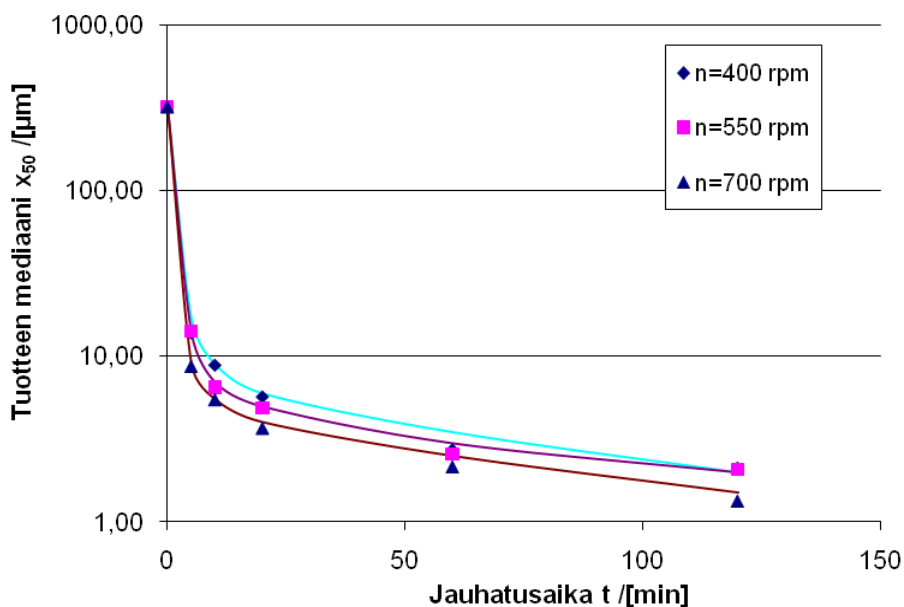
Helmimyllyn jauhatustulokset on esitetty taulukoissa I – IV. Kuvissa 18 – 21 tulokset on esitetty graafisesti, joiden perusteella keskimääräistä partikkelikokoa kuvaavat suorat on sovitettu. Vastaavasti planeettamyllyn jauhatustulokset on esitetty taulukoissa V – VIII ja kuvissa 22 – 25.

### 7.1 Helmimylly

Taulukossa I on esitetty kalkkikiven mediaanikoot eri jauhatusajoilla jauhettaessa helmimyllyllä

Taulukko I Helmimyllyllä jauhetun kalkkikiven keskimääräiset partikkelikoot eri jauhatusaajoilla, sekoituselimen pyörimisnopeuksilla 400, 550 ja 700 rpm.

Partikkelikoko, $\mu\text{m}$			
Jauhatusaika, min	n= 400 rpm	n=550 rpm	n=700 rpm
0	320,40	320,40	320,40
5	13,80	14,15	8,67
10	8,79	6,48	5,45
20	5,66	4,86	3,66
60	2,71	2,57	2,14
120	2,10	2,07	1,33

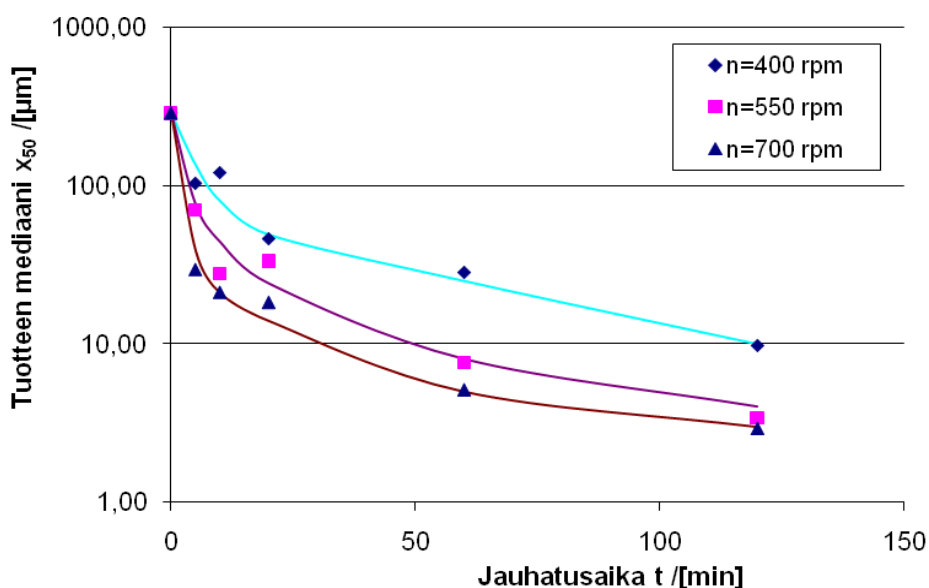


Kuva 18 Kalkkikiven mediaanikoko  $x_{50}$  jauhatusajan funktiona, jauhettaessa sekoitineliimen pyörimisnopeuksilla 400, 550 ja 700 rpm. Jauhatusta suoritettiin helmimyllyllä panostoisena märkäjauhatuksena. Jauhinastian tilavuus oli  $1,8 \text{ dm}^3$  ja lietteen konsentraatio 30 p-%.

Taulukossa II on esitetty kvartsin (Turkki) mediaanikoot eri jauhatusaajoilla jauhettaessa helmimyllyllä.

Taulukko II Helmimyllyllä jauhetun kvartsin (Turkki) keskimääräiset partikkelikoot eri jauhatusaajoilla, sekoituselimen pyörimisnopeuksilla 400, 550 ja 700 rpm.

Partikkelikoko, $\mu\text{m}$			
Jauhatusaika, min	n= 400 rpm	n=550 rpm	n=700 rpm
0	285,70	285,7	285,7
5	102,67	70,19	29,45
10	119,85	27,67	21,14
20	45,82	33,37	18,30
60	28,09	7,62	5,14
120	9,69	3,42	2,93

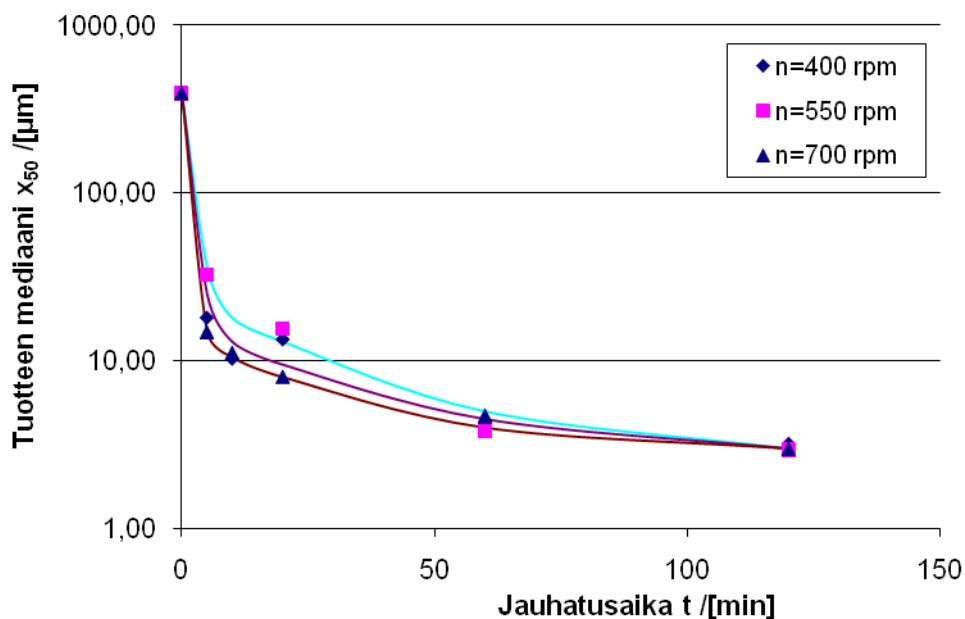


Kuva 19 Kvartsin (Turkki) mediaanikoko  $x_{50}$  jauhatusaajan funktiona, jauhettaessa sekoituselimen pyörimisnopeuksilla 400, 550 ja 700 rpm. Kvartsin (Turkki) jauhatusta suoritettiin helmimyllyllä panostoisena märkäjauhatuksena. Jauhinastian tilavuus oli  $1,8 \text{ dm}^3$  ja lietteen konsentraatio 30 p-%.

Taulukossa III on esitetty kvartsin (Belgia) mediaanikoot eri jauhatusaajoilla jauhettaessa helmimyllyllä.

Taulukko III Helmimyllyllä jauhetun kvartsin (Belgia) keskimääräiset partikkelikoot eri jauhatusaajoilla, sekoituselimen pyörimisnopeuksilla 400, 550 ja 700 rpm.

Partikkelikoko, $\mu\text{m}$			
Jauhatusaika, min	n= 400 rpm	n=550 rpm	n=700 rpm
0	393,25	393,25	393,25
5	18,07	32,36	14,74
10	10,30		11,07
20	13,42	15,43	7,96
60	4,26	3,79	4,68
120	3,21	2,93	2,95

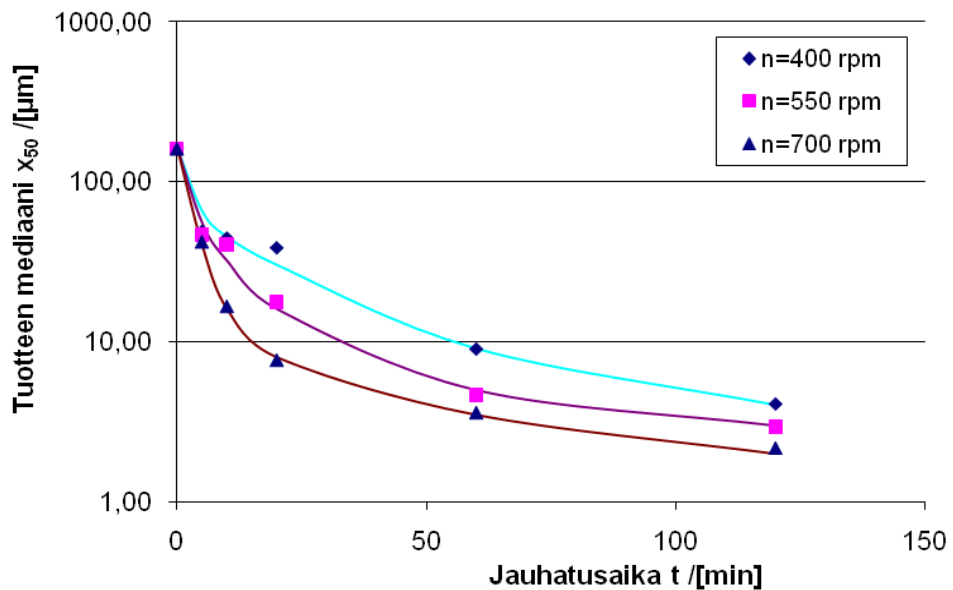


Kuva 20 Kvartsin (Belgia) mediaanikoko  $x_{50}$  jauhatusajan funktiona, jauhettaessa sekoituselimen pyörimisnopeuksilla 400, 550 ja 700 rpm. Kvartsin (Belgia) jauhatus suoritettiin helmimyllyllä panostoisena märkäjauhatuksena. Jauhinastin tilavuus oli  $1,8 \text{ dm}^3$  ja lietteen konsentraatio 30 p-%.

Taulukossa IV on esitetty Wollastoniitin mediaanikoot eri jauhatusaajoilla jauhettaessa helmimyllyllä.

Taulukko IV Helmimyllyllä jauhetun wollastoniitin keskimääräiset partikkelikoot eri jauhatusaajoilla, sekoituselimen pyörimisnopeuksilla 400, 550 ja 700 rpm.

Partikkelikoko, $\mu\text{m}$			
Jauhatusaika, min	n= 400 rpm	n=550 rpm	n=700 rpm
0	161,60	161,61	161,60
5	49,12	46,46	42,29
10	44,71	40,46	16,72
20	38,88	17,73	7,68
60	9,05	4,64	3,60
120	4,11	2,93	2,16



Kuva 21 Wollastoniitin mediaanikoko  $x_{50}$  jauhatusajan funktiona, jauhettaessa sekoituselimen pyörimisnopeuksilla 400, 550 ja 700 rpm. Wollastoniitin jauhatus suoritettiin helmimyllyllä panostoisena märkäjauhatuksena. Jauhinastian tilavuus oli  $1,8 \text{ dm}^3$  ja lietteen konsentraatio 30 p-%.

Kalkkikiven lähtöaineen keskimääräinen partikkelikoko oli  $320,40 \mu\text{m}$  ja lopputuotteen keskimääräiset partikkelikoot saavuttivat noin  $2 \mu\text{m}$  loppukoon. Kuvasta 18. voidaan havaita, että sekoittimen pyörimisnopeuden kasvaessa

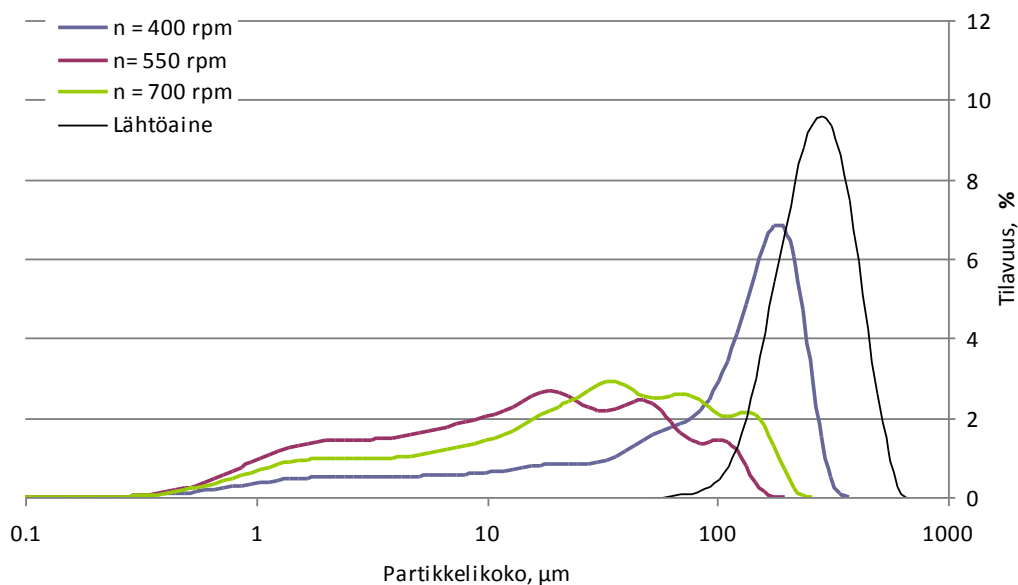
keskimääräinen partikkelikoko pienenee suhteessa saman verran jokaisessa koesarjassa.

Kvartsin (Turkki) lähtöaineen keskimääräinen partikkelikoko oli 285,7  $\mu\text{m}$  ja lopputuotteen keskimääräinen partikkelikoko läheni 3  $\mu\text{m}$ . Kuvasta 19. havaitaan, sekoittimen pyörimisnopeuden ollessa 400 rpm, partikkelien pienenemisen olevan suhteessa huomattavasti heikompaa verrattuna muihin pyörimisnopeuksiin. Vertaillen sekoittimen pyörimisnopeuksia 550 ja 700 rpm, voidaan havaita partikkelien keskimääräisten kokojen eron olevan lyhyillä (5 - 20 min) jauhatusajoilla suuria. Pidemmillä jauhatusajoilla (60 - 120 min) keskimääräiset partikkelikoot lähestyvät samoja arvoja.

Keskimääräiset partikkelikoot pienenevät jauhatuksen aloituksessa tehokkaasti, mutta jauhatusajan kasvaessa partikkelien pieneneminen oli vähäistä. Jokaisella pyörimisnopeudella lopputuotteen keskimääräiset partikkelikoot lähestyivät 3  $\mu\text{m}$ .

Wollastoniittia jauhettaessa keskimääräiset partikkelikoot pienenevät sekoittimen pyörimisnopeuden kasvaessa. Wollastoniitilla saavutettiin pienimmillään noin 2  $\mu\text{m}$  halkaisijaltaan olevia partikkeleja kun lähtöaineen keskimääräinen partikkelikoko oli 161,60  $\mu\text{m}$ .

Kuvassa 22 on esitetty helmimyllyn partikkelikokojakaumat kvartsille (Turkki), jauhatusajalla 10 minuuttia ja sekoitineliimen pyörimisnopeuksilla 400, 550 ja 700 rpm.



Kuva 22. Helmimyllyllä jauhetun kvartsin (Turkki) partikkelikokojakaumat, ajanhetkellä 10 minuuttia ja sekoittimen pyörimisnopeuksien ollessa 400, 550 ja 700 rpm sekä lähtöaineesta. Sarjojen näytteistä mitattiin kaksi rinnakkaisnäytettä, joista laskettiin keskiarvot kyseisien partikkelien tilavuusosuuksille.

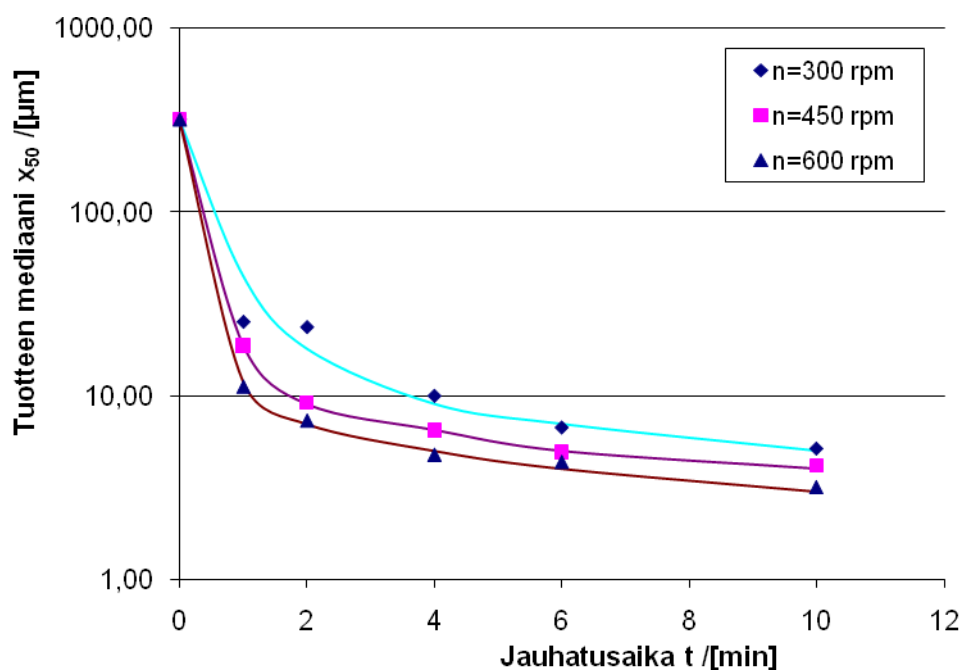
Kuvasta 22 havaitaan, että pyörimisnopeuden kasvaessa pienempien partikkeleiden suhteellinen määrä lisääntyy voimakkaasti ja jakaumat siirtyvät muutenkin selvästi vasemmalle eli jauhautuminen on tehokkaampaa isommilla sekoitineliimen nopeuksilla.

## 7.2 Planeettamylly

Taulukossa V on esitetty kalkkikiven mediaanikoot eri jauhatuseroilla jauhattaessa planeettamyllyllä.

Taulukko V Planeettamylyllä jauhetun kalkkikiven keskimääräiset partikkelikoot eri jauhatusaajoilla, myllyn pyörimisnopeuksilla 300, 450 ja 600 rpm.

Jauhatusaika, min	Partikkelikoko, $\mu\text{m}$		
	n= 300 rpm	n=450 rpm	n=600 rpm
0	320,40	320,40	320,14
1	25,28	18,70	11,23
2	23,64	9,14	7,33
4	9,98	6,50	4,78
6	6,71	4,94	4,37
10	5,15	4,17	3,18



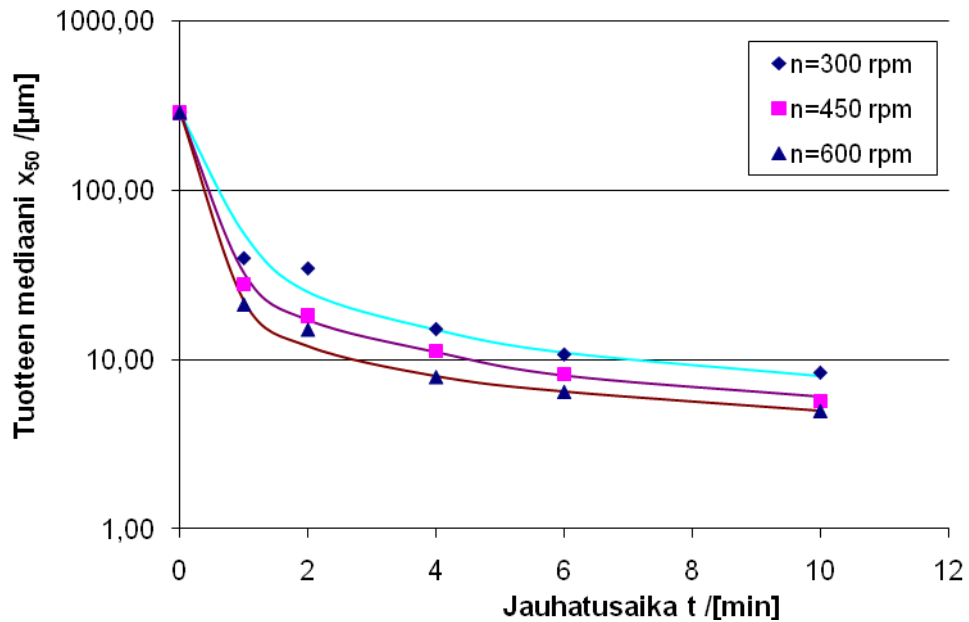
Kuva 23 Kalkkikiven mediaanikoko  $x_{50}$  jauhatusajan funktiona, jauhettaessa planeettamylyllä kierrosnopeuksilla 300, 450 ja 600 rpm. Kalkkikiven jauhatus suoritettiin panostoimisena märkäjauhatuksena. Jauhinastin tilavuus oli  $0,25 \text{ dm}^3$  ja lietteen konsentraatio 30 p-%.

Taulukossa VI on esitetty kvartsin (Turkki) mediaanikoot eri jauhatusaajoilla jauhettaessa planeettamylyllä.



Taulukko VI Planeettamylyllä jauhetun kvartsin (Turkki) keskimääräiset partikkelikoot eri jauhatusaajoilla, myllyn pyörimisnopeuksilla 300, 450 ja 600 rpm.

Partikkelikoko, $\mu\text{m}$			
Jauhatusaika, min	n= 300 rpm	n=450 rpm	n=600 rpm
0	285,70	285,70	285,70
1	39,75	27,77	21,17
2	34,58	18,10	15,05
4	15,21	11,20	7,90
6	10,78	8,21	6,47
10	8,43	5,67	4,98

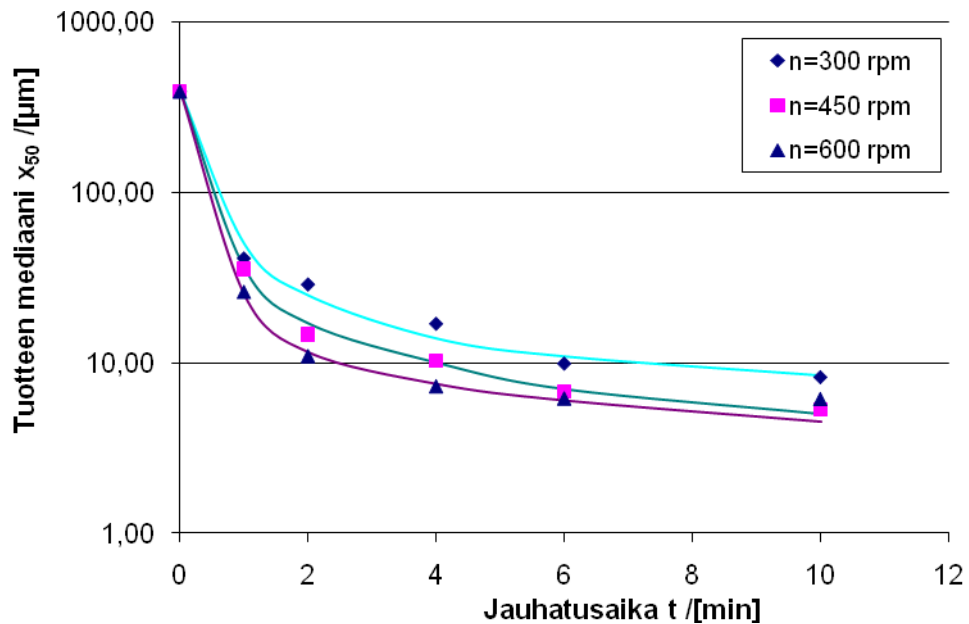


Kuva 24 Kvartsin (Turkki) mediaanikoko  $x_{50}$  jauhatusajan funktiona, jauhettaessa planeettamylyllä kierrosnopeuksilla 300, 450 ja 600 rpm. Kvartsin (Turkki) jauhatus suoritettiin panostoimisena märkjauhatuksena. Jauhinastin tilavuus oli  $0,25 \text{ dm}^3$  ja lietteen konsentraatio 30 p-%.

Taulukossa VII on esitetty kvartsin (Belgia) mediaanikoot eri jauhatusaajoilla jauhettaessa planeettamylyllä.

Taulukko VII Planeettamylyllä jauhetun kvartsin (Belgia) keskimääräiset partikkelikoot eri jauhatusajoilla, myllyn pyörimisnopeuksilla 300, 450 ja 600 rpm.

Partikkelikoko, $\mu\text{m}$			
Jauhatusaika, min	n= 300 rpm	n=450 rpm	n=600 rpm
0	393,25	393,25	393,25
1	41,00	35,57	26,15
2	28,81	14,69	10,95
4	16,91	10,29	7,29
6	9,86	6,82	6,18
10	8,20	5,33	6,13



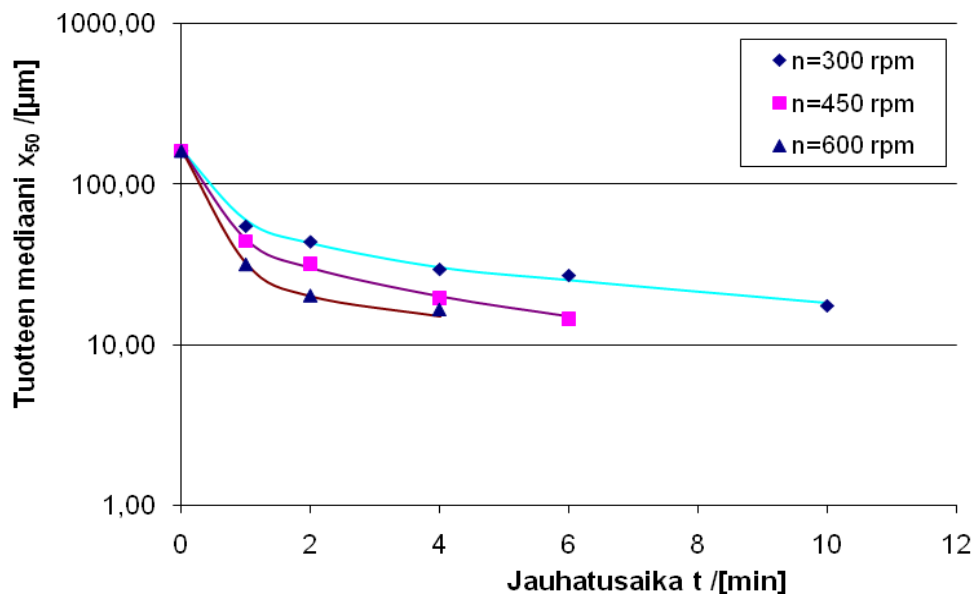
Kuva 25 Kvartsin (Belgia) mediaanikoko  $x_{50}$  jauhatusajan funktiona, jauhettaessa planeettamylyllä kierrosnopeuksilla 300, 450 ja 600 rpm. Kvartsin (Belgia) jauhatus suoritettiin panostoimisena märkäjauhatuksena. Jauhinastin tilavuus oli  $0,25 \text{ dm}^3$  ja lietteen konsentraatio 30 p-%.

Taulukossa VIII on esitetty wollastoniitin mediaanikoot eri jauhatusajoilla jauhettaessa planeettamylyllä.

Taulukko VIII

Planeettamylyllä jauhetun wollastoniitin keskimääräiset partikkelikoot eri jauhatusajoilla, myllyn pyörimisnopeuksilla 300, 450 ja 600 rpm.

Partikkelikoko, $\mu\text{m}$			
Jauhatusaika, min	n= 300 rpm	n=450 rpm	n=600 rpm
0	161,60	161,60	161,60
1	54,85	44,05	31,85
2	43,81	31,82	20,36
4	29,48	19,42	16,65
6	27,03	14,46	-
10	17,48	-	-



Kuva 26 Wollastoniitin mediaanikoko  $x_{50}$  jauhatusajan funktiona, jauhettaessa planeettamylyllä kierrosnopeuksilla 300, 450 ja 600 rpm. Wollastoniitin jauhatus suoritettiin panostoimisena märkäjauhatuksena. Jauhinastin tilavuus oli  $0,25 \text{ dm}^3$  ja lietteen konsentraatio 30 p-%.

Kalkkikiveä jauhettaessa keskimääräiset partikkelikoot pienenevät myllyn pyörimisnopeuden kasvaessa. Kalkkikivillä saavutettiin pienimmillään noin  $3 \mu\text{m}$

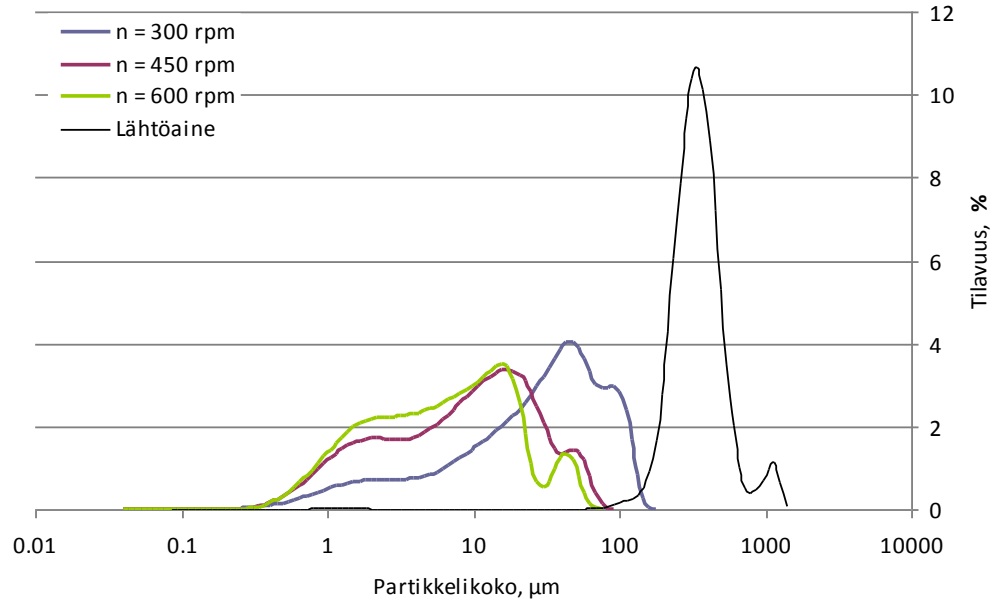
halkaisijaltaan olevia partikkeleja kun lähtöaineen keskimääräinen partikkelikoko oli 320,40  $\mu\text{m}$ . Jo 1 minuutin jauhatusaika pienensi keskimääräistä partikkelikokoa alle 10 % lähtökoosta.

Kuvasta 23. havaitaan, että kvartsin (Turkki) partikkelikoko pienenee tasaisesti ajan ja myllyn pyörimisnopeuden kasvaessa. Pienimmillään saavutetaan noin 5  $\mu\text{m}$  halkaisija.

Taulukosta VII. havaitaan, että kvartsin (Belgia) partikkelikoko pienenee tasaisesti ajan ja myllyn pyörimisnopeuden kasvaessa. Pienimmillään saavutetaan noin 5  $\mu\text{m}$  halkaisijakoko.

Wollastoniittia jauhettaessa keskimääräiset partikkelikoot pienenevät myllyn pyörimisnopeuden kasvaessa. Pienimmäksi partikkelikooksi saatiin noin 15  $\mu\text{m}$  lähtöaineen ollessa 161,60  $\mu\text{m}$ . Wollastoniittia jauhettaessa isommilla pyörimisnopeuksilla ei jauhatusta voitu jatkaa loppuun saakka partikkeleiden alkaessa flokkautumaan myllyssä. Tätä voitaisiin todennäköisesti estää jauhamalla wollastoniittia alemmassa konsentraatiossa ja käyttämällä jotakin sopivaa jauhatusapuainetta.

Kuvassa 27 on esitetty planeettamyllyn partikkelikokojakaumat kvartsille (Belgia), jauhatusajalla 2 minuuttia ja myllyn pyörimisnopeuksilla 300, 350 ja 600 rpm.



Kuva 27. Planeettamylyllä jauhetun kvartsin (Belgia) partikkelikokojakaumat, ajanhetkellä 2 minuuttia ja sekoittimen pyörimisnopeuksien ollessa 300, 450 ja 600 rpm sekä lähtöaineesta. Sarjojen näytteistä mitattiin kaksi rinnakkaisnäytettä, joista laskettiin keskiarvot kyseisien partikkelien tilavuusosuuksille.

Kuvasta 27 havaitaan, että pyörimisnopeuden kasvaessa pienempien partikkeleiden suhteellinen määrä lisääntyy voimakkaasti ja jakaumat siirtyvät muutenkin selvästi vasemmalle eli jauhautuminen on tehokkaampaa isommilla sekoitinelimen nopeuksilla.

### 7.3 Johtopäätökset

Työssä tutkittiin kalkkikiven, kahden eri kvartsin ja wollastoniitin hienojauhatusta käyttäen helmi- ja planeettamylyä. Jauhaukset suoritettiin märkäjauhatuksena ja panostoimisena. Lietteet olivat 30 paino-% ja väliaineena käytettiin vettä. Yhteisvertailussa vertaillaan jokaisten jauhettujen materiaalien partikkelikokoja helmi- ja planeettamylyjen tulosten kesken sekä pyörimisnopeuksien vaikutusta jauhautuneisuuteen.

Helmimyllyllä saavutettiin kalkkikiveä jauhamalla, sekoittimen pyörimisnopeudesta riippumatta, noin 2  $\mu\text{m}$ :m loppukoko. Suuremmilla pyörimisnopeuksilla jauhautuminen oli nopeampaa. Kalkkikiveä jauhettaessa pienempi keskimääräinen partikkelikoko saavutettiin helmimyllyllä. Planeettamyllyllä loppukoko oli väliltä 3 – 5  $\mu\text{m}$ , riippuen pyörimisnopeudesta.

Kvartsia (Turkki) jauhettaessa planeettamyllyllä 300 rpm ja helmimyllyllä 400 rpm saavutettiin samaa partikkelikokoa olevat lopputuotteen, mutta planeettamyllyllä partikkelit pienenevät huomattavasti nopeammin. Suuremmilla jauhatusnopeuksilla (planeettamyllyn 450 ja 600 rpm sekä helmimyllyn 550 ja 700 rpm) partikkelit pienenevät suhteessa samaan tahtiin, mutta helmimyllyllä saatiin noin 2  $\mu\text{m}$  pienempiä partikkeleja. Lopputuote helmimyllyllä oli noin 3  $\mu\text{m}$ .

Kvartsia (Belgia) jauhettaessa helmimyllyllä saavutettiin, kierrosnopeudesta riippumatta, samaa loppukokoa olevat partikkelit jauhatusajalla 120 min. Planeettamyllyllä jauhettaessa partikkelien pieneneminen loppui jauhatusajan ollessa 6 min, tämän jälkeen jauhatusenergia muuttui lämpöenergiaksi ja partikkelit flokkautuivat myllyssä. Planeettamyllyllä olisi mahdollisesti saatu hienompia tuotteita, jos jauhatuksessa olisi käytetty jotakin jauhatusapua. Planeettamyllyn lopputuotteen partikkelikoot vaihtelivat huomattavasti pyörimisnopeuden suhteen (5 – 8  $\mu\text{m}$ ).

Wollastoniittia jauhettaessa helmimyllyllä partikkelit pienenevät tasaisesti loppukokoihin 2 – 4  $\mu\text{m}$ . Helmimyllyllä havaittiin jauhatusajan olevan tärkeämpi parametri suuremmilla sekoittimen pyörimisnopeuksilla (550 ja 700 rpm). Jauhettavan lietteen ominaisuuksista johtuen planeettamylly oli tehoton. Jauhettaessa jauhatusenergia muuttui melkein kokonaisuudessaan lämpöenergiaksi mikä aiheutti partikkelien vähäisen jauhatusnopeuden. Hienompia tuotteita olisi

todennäköisesti saatu planeettamylyllä jos wollastoniittilietteen massakonsentraatio olisi ollut jauhatuksissa huomattavasti pienempi.

Vertaillen kvartseja (Turkki ja Belgia) keskenään voidaan havaita, että helmimyllyllä saavutettiin noin 3  $\mu\text{m}$  loppukoko, poikkeuksena kvartsi (Turkki) 400 rpm jossa partikkelikoko oli 9,7  $\mu\text{m}$ . Lyhyillä jauhatusajoilla (5, 10 ja 20 min) partikkelien mediaaneissa oli suuria kokoeroja, johtuen kvartsin (Belgia) huomattavasti suuremmasta lähtökokoosta. Planeettamylyllä keskimääräinen loppukoko oli noin 5  $\mu\text{m}$ . Planeettamylyllä pieneneminen oli yhtä suurta kaikilla jauhatusajoilla pyörimisnopeuksia vertaillen.

Partikkelien suhteellista pienenemistä lähtökokoonsa nähden vertailtiin myllykohtaisesti. Tällöin havaittiin että, helmimyllyllä lyhyillä (5 ja 10 min) ja pitkällä (60 ja 120 min) jauhatusajoilla jauhettaessa kalkkikivi hienontui parhaiten ja heikoimmin hienontui wollastoniitti. Poikkeuksena pitkällä jauhatusajoilla pyörimisnopeuden ollessa 400 rpm hienontui kvartsi (Turkki) heikoiten. Samanlaiset tulokset saatiin planeettamylyllä. Kuitenkin kierrosnopeuden ollessa 600 rpm ja jauhatusaikojen ollessa pitkät (6 ja 10 min) heikoiten hienontui kvartsi (Turkki), koska wollastoniitin jauhatuksesta ei saatu vertailu kelpoisia tuloksia.

Vertaillen myllyjä keskenään havaittiin että, helmimyllyn olevan tehokkaampi kaikilla testattavilla mineraaleilla ja jauhatusajoilla. Planeettamyly osoittautui kuitenkin paremmaksi jauhettaessa pitkällä jauhatusajoilla kalkkia ja lyhyillä jauhatusajoilla kvartsia (Turkki).

## 8 Lähteet

1. *Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology*, ,vol 18, ed., Mark H. F., McKetta J. J., Othmer D. F., 2. Edition, New York London Sydney Toronto 1969
2. Oriplan oy, <http://www.oriplan.com>, 20.10.2008
3. McCabe W. L., Smith J. C., Harriot P., *Unit operations of chemical engineering*, 7 edition, 2005
4. Hukki R.T., *Mineraalien hienonnus ja rikastus*, Keuruu 1964
5. *Ullman's encyclopedia of industrial chemistry*, vol B 2: Unit operations I, ed., Elvers B., Ravenscroft M., Rounsaville J. F., Schulz G., 5. Edition, Weinheim 1988
6. Tuunila R., *Lisensiaattityö: Helmimyllyjauhatuksen kokeellinen optimointi ja panosjauhatuksen mallintaminen*, Lemi 1995
7. Coulson J. M., Richardson J.F., *Chemical Engineering*, vol 2, 3. Edition, Pergamon press, Oxford 1991
8. Beke B., *The process of fine grinding*, volume 1, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1981
9. Sturtevant, <http://www.sturtevantinc.com>, 25.1.2009
10. Metso, <http://www.metso.com>, 20.1.2009
11. Mine Engineer, <http://www.mine-engineer.com>, 25.1.2009



12. Mining and Metallurgy Basics, [www.miningbasics.com](http://www.miningbasics.com), 25.1.2009
13. Marklund, O.E., Elmlid, C., Marklund, U. P., Borell, M. C., Autogenous grinding method, U.S. Patent No. 4681268, 21.7.1987
14. The Jet Pulverizer Company, <http://www.jetpul.com>, 25.1.2009
15. Promas Engineers, <http://www.promasengineers.com>, 25.1.2009
16. Tuunila, R., Ultrafine grinding of FDG and phosphogypsum with an attrition bead mill and jet mill: Optimization and modeling of grinding and mill comparison, Lappeenranta 1997
17. Hosokawa Alpine, <http://www.halpine.com>, 11.11.2008
18. Union process, <http://www.unionprocess.com>, 21.10.2008
19. Velamakanni, B., V., Effect of polymeric additives on the rheology and fine grinding of dense mineral suspensions, Berkeley 1988
20. Royal Society of Chemistry, <http://www.rsc.org>, 16.11.2008
21. Laboratory Talk, <http://www.laboratorytalk.com>, 16.11.2008
22. Retsch, <http://www.retsch.com>, 11.11.2008
23. *Perry's chemical engineers' handbook*, ed., Green D. W., 8. Edition, New York 2007

24. Brady, G. S., *Materials handbook: An encyclopedia for purchasing agents, engineering, executives and foreman*, 9. Edition, New York London Toronto 1963
25. *Ullman's encyclopedia of industrial chemistry, vol A 15: Isotopes, natural to magnesium compounds*, ed., Elvers B., Hawkins S., Schulz G., 5. Edition, Weinheim 1990
26. Bureau Of Economic Geology, <http://www.beg.utexas.edu>, 9.2.2009
27. *Encyclopedia of minerals*, ed., Roberts W. L., Rapp G. R., Weber J., New York 1974
28. Suomen Kansallinen Geologian Komitea, Geologia.fi, <http://www.geologia.fi>, 9.2.2009
29. Kiviopas, <http://www.kiviopas.fi>, 9.2.2009
30. Chemie, <http://www.chemie.de>, 2.2.2009
31. Beckman Coulter, <http://www.beckmancoulter.com>, 2.2.2009
32. Fukai, A., Laser diffraction type apparatus for particle size distribution measurement [machine translation], JP Patent No. 2009098154 (A), 7.5.2009
33. Malvern, <http://www.malvern.co.kr>, 2.2.2009