

Saska Saarinen

MAGNEETTIEROTUS

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Toukokuu 2017**

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Toukokuu 2017	Tekijä/tekijät Saska Saarinen
Koulutusohjelma Kemiantekniikka		
Työn nimi MAGNEETTIEROTUS		
Työn ohjaaja Laura Rahikka	Sivumäärä 19	
Työelämäohjaaja		
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia magneettierotuksen sopivuutta sivukivelle kaivosalan prosessissa. Toimeksiantajan kanssa tehdyn salassapitosopimuksen takia opinnäytetyö sisältää vain kirjallisuustutkielman magneettierotuksesta ja esittelyn vaihtoehtoisesta optisesta erottelusta. Opinnäytetyön yritysesittely ja kokeellinen osuus tuloksineen eivät ole tässä versiossa.</p> <p>Magneettierotuksen suunnittelun kannalta tärkeää on saada aikaan tarvittavan magneettikentän voimakkuuden lisäksi jyrkkä kenttägradientti. Magneettikentän voimakkuutta pitää myös pystyä säätämään erotettavan materiaalin ominaisuuksien mukaan. Erotus tapahtuu, kun partikkelit järjestäytyvät erottimen magneettikentän kenttäviivojen mukaisesti ja kulkeutuvat niitä pitkin magneetin pinnalle.</p> <p>Magneettierotus voidaan tehdä monella tavalla riippuen siitä onko erotettava materiaali para- vai ferromagneettista. Ferromagneettisten materiaalien erotukseen tarvitaan heikkomagneettierottimia, joiden magneettikentän voimakkuus on maksimissaan 0,2 Teslaa. Heikkomagneettierottimia käytetään yleensä poistettaessa ferromagneettista materiaali, joka muuten vahingoittaisi prosessia. Erilaiset rumpuerottimet ovat yleisimpiä teollisuudessa käytettyjä heikkomagneettierottimia.</p> <p>Vahvamagneettierottimia käytetään, kun erotettava osa on paramagneettista. Vahvamagneettierottimissa käytetään yleensä solenoideja eli sähkömagneetteja ja magneettikentän voimakkuus on noin 2 Teslaa. Vahvamagneettierottimia käytetään teollisuudessa esimerkiksi kvartsihiekkan valmistuksessa erottamaan heikosti magneettiset rautaa sisältävät partikkelit. Vahvamagneettierottimista yleisimpiä ovat indusoitu rullamagneettierotin ja Jonesin erotin.</p>		
Asiasanat Ferromagnetismi, magneettierotus, heikkomagneettierottimet, paramagnetismi, vahvamagneettierottimet		

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date May 2017	Author Saska Saarinen
Degree programme Chemical Engineering		
Name of thesis MAGNETIC SEPARATION		
Instructor Laura Rahikka		Pages 19
Supervisor		
<p>The aim of this thesis was to study suitability of magnetic separation for gangue in a mine process. Because of the confidentiality agreement with the commissioner thesis contains only study of magnetic separation and introduction to alternative optical separation. Introduction of the company and experimental part with results are not in this version of the thesis.</p> <p>When designing magnetic separators it is important to produce high magnetic field with high field gradient. Also it is essential that magnetic field can be adjusted according to the attributes of the material. In magnetic separation the magnetic particles are divided in magnetic field so that they are in alignment with the field lines and they drift along the field lines to the surface of the magnet.</p> <p>Magnetic separation can be made many different ways depending on if the separated material is paramagnetic or ferromagnetic. With ferromagnetic particles separation is made with low-intensity separators which field intensity is 0,2 Tesla maximum. Low-intensity separators are widely used to separate ferromagnetic materials which otherwise would harm the process. The most used low-intensity separators in the industry are different kinds of drum separators.</p> <p>High-intensity separators are used when the separated material is paramagnetic. In the high-intensity separators solenoids are usually used and they produce magnetic field intensity up to 2 Tesla. These separators are for example used in the silica sand industry to remove low magnetic particles which contain iron. The most common high-intensity separators are induced roll separator and Jones separator.</p>		
<p>Key words Ferromagnetism, high-intensity magnetic separators, low-intensity magnetic separators, magnetic separation, paramagnetism</p>		

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 MAGNETISMI	2
2.1 Magneettikenttä.....	2
2.2 Materiaalien magneettiset ominaisuudet	3
2.2.1 Magneettimomentti ja magnetoituma	4
2.2.2 Magneettivuon tiheys ja magneettikentän voimakkuus	5
2.2.3 Permeabiliteetti ja susceptibiliteetti	5
3 MAGNEETTIEROTUS	8
3.1 Magneettierottimen suunnittelu	8
3.2 Erilaiset magneettierottimet.....	9
3.2.1 Heikkomagneettierottimet.....	10
3.2.2 Vahvamagneettierottimet	12
3.2.3 Suuren kenttägradientin magneettierottimet	14
3.2.4 Suprajohtavat magneettierottimet	16
4 OPTINEN EROTUS.....	17
LÄHTEET	19
KUVAT	
KUVA 1. Magneettikenttä kuvailtuna kenttäviivojen avulla.....	3
KUVA 2. Hematiitin ja kvartsin magnesaatiokäyrät	6
KUVA 3. Magnetiitin magnesaatiokäyrä.....	7
KUVA 4. Tasainen magneettikenttä ja jyrkän kenttägradientin omaava magneettikenttä	9
KUVA 5. Rumpumagneettierotin	10
KUVA 6. Vastavirtaan pyörivä märkäheikkomagneettierotin.....	11
KUVA 7. Myötävirtaan pyörivä märkäheikkomagneettierotin	11
KUVA 8. Rullamagneettierotin	12
KUVA 9. Indusoitu rullamagneettierotin.....	13
KUVA 10. Suuren kenttägradientin magneettierotin.....	15
KUVA 11. Röntgenlähettimen perustuva erotin	18

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää magneettierotuksen sopivuutta kaivosalan prosessiin. Opinnäytetyön toimeksiantajan kanssa tehtiin salassapitosopimus. Tästä syystä opinnäytetyö sisältää vain teoriaosuuden magneettierotuksesta ja vaihtoehtoisesta optisesta erottelussa. Alkuperäinen versio sisälsi myös kokeellisen osuuden ja yritysesittelyn, mutta tässä versiossa niitä ei ole.

Magneettierotuksessa käytetään hyväksi materiaalien erilaisia magneettisia ominaisuuksia. Magneettierottimen sisältämät magneetit luovat ulkoisen magneettikentän. Para- ja ferromagneettisten materiaalin atomit ja molekyylit ovat kuin pieniä magneetteja eli dipoleja ja nämä dipolit järjestäytyvät erottimen ulkoisen magneettikentän kenttäviivojen mukaisesti ja partikkelit kulkeutuvat niitä pitkin magneetin pinnalle. Paramagneetteja erotetaan vahvamagneettierottimilla ja ferromagneetteja heikkomagneettierottimilla. Erotus voidaan suorittaa kuiva- tai märkäerotuksena.

Optisessa erotuksessa käytetään erilaisia sensoreja, jotka perustuvat joko heijastumaan tai lähetykseen. Heijastumasensoreilla erotus tapahtuu partikkelien erilaisten pintaominaisuuksien ja lähetyssensoreilla esimerkiksi partikkelien erilaisten tiheyksien ansiosta.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa selvitetään ensin magnetismin peruseriaatteet. Tämän jälkeen laajimmassa osiossa tutkitaan magneettierotusta. Tässä osiossa kerrotaan magneettierotuksen suunnittelussa huomioon otettavia asioita ja erilaisista magneettierottimista, kuten vahva- ja heikkomagneettierottimista. Lopuksi esitellään lyhyesti optinen erotus vaihtoehtoisena prosessina sivukiven poistoon.

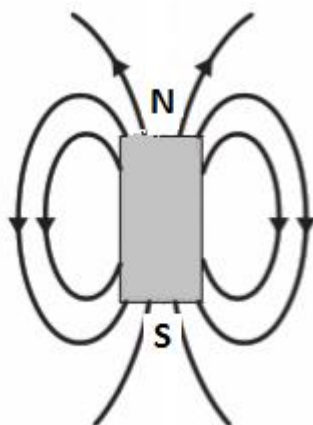
2 MAGNETISMI

Magneetti voidaan esittää koostuvan kahdesta magneettisesta navasta, jotka ovat sen molemmissa päissä. Pohjoiseen osoittavalle navalle on annettu nimeksi N-napa ja etelään S-napa. Momentti, jonka ansiosta magneetti pyörii, syntyy molempien napojen voimista, jotka työntävät N-napaa pohjoiseen päin ja S-napaa etelään. Magneetti pyrkii oikeissa olosuhteissa aina pyörimään siten, että N-napa osoittaa pohjoiseen ja S-napa etelään, mutta magneetti ei ikinä liiku pohjois- tai eteläsuunnassa. Tästä voidaan päätellä, että napojen voimat ovat yhtä suuret ja vastakkaismerkkiset, eikä nettovoimaa ole. (Mansfield & O'Sullivan 1998, 471.)

Kaksinapaisen magneetin nimi on magneettinen dipoli. Yksinapaista magneettia ei ole olemassa. Vaikka voidaan tehdä monimutkaisempia magneetteja, kuten neljä- tai kuusinapaisia, yleensä magneetit ovat dipoleja. Kestomagneetteja voidaan tehdä myös erimuotoisiksi, esimerkiksi yleinen ja hyödyllinen magneetti on ns. hevosenkenkä, jossa navat taivutetaan lähelle toisiaan. Kun kaksi dipolia tuodaan lähekkäin, niiden erimerkkiset navat vetävät toisiaan puoleensa ja samanmerkkiset hylkivät toisiaan. (Mansfield & O'Sullivan 1998, 471.)

2.1 Magneettikenttä

Magneetin tai liikkuvan sähkövirran ympärille voidaan määrittää alue, johon magneettiset voimat vaikuttavat. Tämän alueen nimi on magneettikenttä ja se on hahmoteltu kuvassa 5. Magneettikentän voimakkuus on selvästi suurin magneetin navoilla ja se laskee magneetista pois päin. Magneettikentän muoto voidaan ilmaista magneettisten kenttäviivojen avulla. Sopimuksen mukaan kenttäviiva on viiva, jota pitkin N-napa kulkisi, jos se vapautettaisiin muista. Mitä tiheämmin kenttäviivoja magneetissa on, sitä voimakkaampi magneettikenttä on. (Mansfield & O'Sullivan 1998, 472.)



KUVA 1. Magneettikenttä kuvailtu kenttäviivojen avulla (mukaiillen Reis 2013, 5)

Materiaalien magneettikentän ominaisuudet mikrotasolla johtuvat elektronien liikkeestä atomeissa. Elektroni on negatiivisesti varattu hiukkanen ja varauksen ansiosta se synnyttää liikkuessaan ytimen ympärille magneettikentän. Magneettikenttä syntyy myös elektronin pyörimisestä itsensä ympäri eli sen spinin vaikutuksesta. Atomit ja molekyylit ovat siis kuin pieniä dipoleja. Dipolit ovat huoneenlämmössä lämpöliikkeen vaikutuksesta yleensä satunnaisesti järjestäytyneet. Materiaalien magneettiset ominaisuudet riippuvat siitä miten dipolien järjestys muuttuu ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta. (Lehto, Havukainen, Maalampi, Leskinen 2011, 12.)

2.2 Materiaalien magneettiset ominaisuudet

Kaikki materiaalit reagoivat jollain tavalla magneettikentässä, mutta monilla aineilla vaikutus on niin pieni, ettei se ole havaittavissa. Materiaalit voidaan jakaa kahteen ryhmään riippuen siitä, miten ne reagoivat ulkoiseen magneettikenttään:

- 1) Paramagneettisten aineiden elektronit ovat järjestäytyneet siten, että se sisältää pysyviä pieniä dipoleja. Ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta paramagneettisten aineiden dipolit suuntautuvat ulkoisen magneettikentän kenttäviivojen suuntaisesti. Tällöin paramagneettien magneettikentän voimakkuus nousee ja ulkoinen magneettikenttä vetää puoleensa niitä. Tämä voima on kuitenkin heikko verrattuna ferromagneettisiin materiaaleihin. Lämpöliikkeen vaikutuksesta dipolit järjestäytyvät jälleen satunnaisesti, kun ulkoinen magneettikenttä poistetaan. Paramagneettiset materiaalit voidaan rikastaa vahvamagneettierottimella. Esimerkkejä teollisuudessa erotettavista paramagneettisista aineista ovat ilmeniitti (FeTiO_3), rutiili (TiO_2), wolframiitti ($(\text{Fe,Mn})\text{WO}_4$), sideriitti (FeCO_3) sekä hematiitti (Fe_2O_3). (Wills & Napier-Munn 2006, 353.)

- 2) Diamagneettisten aineiden atomeissa elektronien järjestys on sellainen, että ne eivät sisällä pysyviä dipoleja ja tästä syystä niillä ei ole paramagneettisia ominaisuuksia. Ulkoinen magneettikenttä muuttaa paramagneettisten aineiden elektronien rataliikettä ja atomeihin indusoituu sähkövirtoja. Sähkövirtojen momentit suuntautuvat vastakkaisuuntaisiksi ulkoisen magneettikentän kenttäviivojen suhteen. Tällöin diamagneettien sisäisen magneettikentän voimakkuus laskee hieman ja ulkoinen magneettikenttä hylkii niitä. Diamagneettien vaikutus magneettikenttää on kuitenkin hyvin pieni eikä niitä voi rikastaa magneettisesti. (Wills & Napier-Munn 2006, 353.)

Jotkin alkuaineet ovat itsessään paramagneettisia, kuten nikkeli, koboltti, mangaani, kromi, cesium, titaani, happi ja platina-ryhmään kuuluvat metallit. Kuitenkin monesti materiaalin paramagneettiset ominaisuudet johtuvat sen sisältämästä raudasta jossakin ferromagneettisessa muodossa. Ferromagneettisuutta voidaan pitää paramagneettisuuden erikoismuotona. Ferromagneettiset materiaalit ovat hyvin herkkiä magneettisille voimille ja ne säilyttävät osan magneettisuudesta, kun ne poistetaan magneettikentästä eli niistä voidaan valmistaa kestromagneetteja. Ferromagneettiset vahvat magneettiset ominaisuudet johtuvat hyvin voimakkaista dipoli-dipoli vuorovaikutuksista näiden materiaalin vierekkäisissä atomeissa. Ferromagneettiset materiaalit voidaan rikastaa heikkomagneettierottimella ja pääasiallinen teollisuudessa erotettava ferromagneetti on magnetiitti (Fe_3O_4). Hematiitin ja sideriitin erotusta voidaan parantaa pasuttamalla ne ensin magnetiitiksi. (Wills & Napier-Munn 2006, 353.)

Para- ja ferromagneettiset aineet voivat kyllästyä magneettisesti. Mitä suurempi ulkoisen magneettikentän voimakkuus on, sitä enemmän materiaalin sisältämät pienet dipolit ovat suuntautuneet ulkoisen magneettikentän kenttäviivojen suuntaiseksi. Kyllästyminen tapahtuu, kun lähes kaikki dipolit ovat suuntautuneet tällä tavalla. (Lehto ym. 2011, 12.)

2.2.1 Magneettimomentti ja magnetoituma

Elektronin rataliikkeen synnyttämät materiaalin magneettiset ominaisuudet määritellään magneettimomentin m_r avulla. Monissa aineissa nämä elektronien rataliikkeet vaihtelevat suunnan ja nopeuden osalta atomista toiseen ja kaikkien atomien laskettu keskimääräinen magneettimomentti on nolla. (Inkinen, Manninen, Tuohi 2003, 146.)

Spinin aiheuttama momentti m_s on kaikilla elektroneilla sama ja sen arvo on $9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$. Useampia elektroneja sisältävien atomien elektronit muodostavat vastakkaismerkkisistä spineistä pareja. Nämä

vastakkaismerkkisten spinien momentit kumoavat toisensa ja elektronien määrän ollessa parillinen spinien kokonaismomentti on nolla. Parittoman määrän elektroneja sisältävä atomi sisältää ainakin yhden elektronin spinin magneettimomentin. Atomin kokonaismagneettimomentti lasketaan rataliikkeen ja spinin magneettimomenttien summana, $m = m_r + m_s$. Spinin magneettimomentti on hallitseva kokonaismomentissa. (Inkinen ym. 2003, 146.)

Materiaalin magnetoituma M kertoo missä määrin aine magnetoituu ulkoisessa magneettikentässä ja se on ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta syntyvien magneettimomenttien vektorisumma m_{kok} tilavuudessa V :

$$M = \frac{m_{\text{kok}}}{V} \quad (1)$$

(Inkinen ym. 2003, 146.)

2.2.2 Magneettivuon tiheys ja magneettikentän voimakkuus

Materiaalin magnetoituma johtuu ulkoisen magneettikentän voimakkuudesta (H):

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (2)$$

Missä B on magneettivuon tiheys ja μ suhteellinen permeabiliteetti. Magneettivuon tiheys kertoo kuinka tiheästi kenttäviivoja on magneettikentässä ja sen yksikkö on Tesla. Materiaalin magnetoitua ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta magneettikenttä voimistuu ja magneettivuon tiheys lasketaan magnetoituman ja magneettikentän voimakkuuden avulla:

$$B = \mu_0 * (H + M) \quad (3)$$

Missä μ_0 on tyhjiön permeabiliitti. Ferromagneettisille materiaaleille magnetoituman M aiheuttama voima on yleensä huomattavasti suurempi kuin magneettikentän (Fuerstenau & Han 2003, 227–228.)

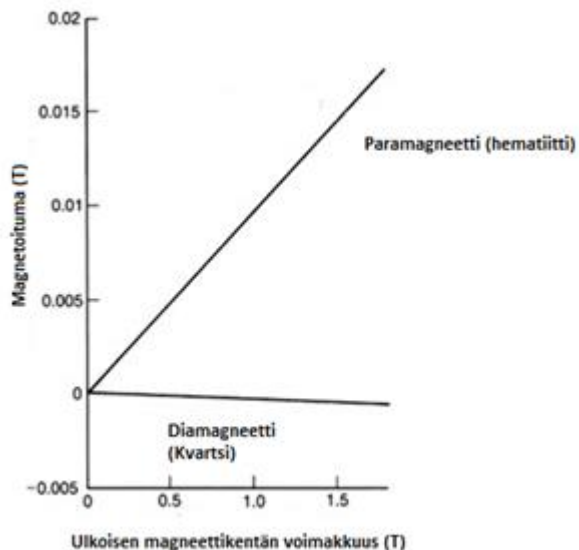
2.2.3 Permeabiliteetti ja susceptibiliteetti

Magneettivuon tiheyttä B , magneettikentän voimakkuutta H ja magnetoitumaa M voidaan käyttää vertaillessa erilaisten materiaalien magneettisia ominaisuuksia. Magneettista susceptibiliteettia (S) käytetään kuvatessa aineiden magnetoitumisen herkkyyttä:

$$S = \frac{M}{H} \quad (4)$$

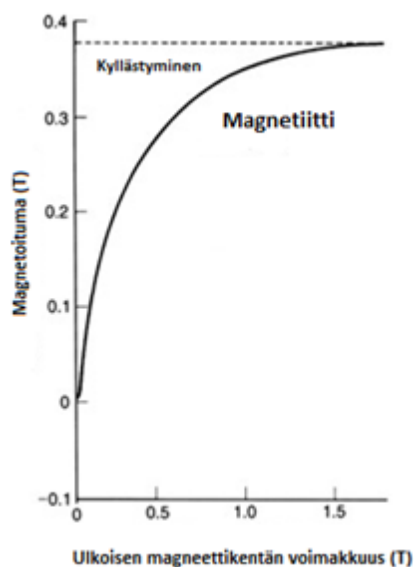
Suskeptibiliteetti on siis magnetoituman suhde magneettikentän voimakkuuteen. (Fuerstenau & Han 2003, 228.)

Paramagneettisille materiaaleille suskeptibiliteetti on pieni positiivinen vakio ja diamagneettisille negatiivinen. Kuvassa 6 on paramagneettisen (hematiitti) ja diamagneettisen (kvartsi) magnetisaatiokäyrät, missä y-akselilla on magnetoituma M ja x-akselilla ulkoisen magneettikentän voimakkuus H . Käyrän kulmakerroin on materiaalin magneettinen suskeptibiliteetti ja tässä tapauksessa se on noin 0,01 hematiitille ja -0,001 kvartsille. (Wills & Napier-Munn 2006, 354.)



KUVA 2. Hematiitin ja kvartsin magnetisaatiokäyrät (mukaan Wills & Napier-Munn 2006, 354)

Ferromagneettisten aineiden magneettinen suskeptibiliteetti riippuu magneettikentästä ja se laskee magneettikentän voimakkuuden kasvaessa, kunnes materiaalista tulee magneettisesti kylläinen. Kuvan 7 magnetiitin magnetisaatiokäyrästä nähdään, että kyllästyminen tapahtuu, kun magneettikentän voimakkuus on noin 1,5 T. (Wills & Napier-Munn 2006, 354.)



KUVA 3. Magnetiitin magnesaatiokäyrä (mukaillen Wills & Napier-Munn 2006, 355)

Magneettivuon tiheyden ja magneettikentän voimakkuuden suhdetta kutsutaan permeabiliteetiksi:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (5)$$

Yleensä aineiden permeabiliteetti esitetään suhteellisena permeabiliteettina:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (6)$$

Tyhjiön permeabiliteetin, μ_0 , arvo on $4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am. Diamagneettisten materiaalien suhteellinen permeabiliteetti on vähän alle ja paramagneettisten vähän yli yksi. Ferromagneettisilla aineilla suhteellinen permeabiliteetti on huomattavan suuri. Esimerkiksi raudalla, joka sisältää 0,2 prosenttia epäpuhtauksia, permeabiliteetin arvo on noin 500. (Fuerstenau & Han 2003, 228.)

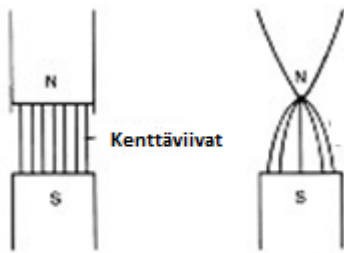
3 MAGNEETTIEROTUS

Perinteisessä magneettierotuksesta, jota on tehty jo vuodesta 1849, ferromagneettiset ja para- ja diamagneettiset materiaalit erotettiin toisistaan kestromagneettien avulla. Myöhemmin kehitettiin sähkömagneetteja ja havinaisten maametallien seoksista tehtyjä magneetteja, joilla pystyttiin luomaan 2,5 teslan magneettikentän ja erottamaan heikommat paramagneettiset materiaalit diamagneettisista materiaaleista. Viimeisen kahden vuosikymmenen aikana on pystytty luomaan jopa 5-6 teslan magneettikenttä suprajohdaviin magneettien avulla. Suprajohdavia magneetteja pystytään hyödyntämään para- ja diamagneettisten aineiden märkäerotuksessa ja erotettavan partikkelin koko voi olla vain 2 μm . (Young & Luttrell 2012, 229.)

Magneettierotuksen pääasialliset edut ovat suuri saanto, pieni energiankulutus, pienet käyttökulut ja prosessin helppo hallittavuus. Sen haittapuoli on kuitenkin huono erottelukyky, kun partikkelien koko on pienempi. Magneettierotuksen käytettävyyttä voidaan laajentaa, mikäli sillä pystyttäisiin erottamaan nämä pienemmät partikkelit sekä ei-magneettiset epäpuhtaudet siten, että magneettierotuksen eduista ei tarvitse luopua. Tämä voidaan esimerkiksi saavuttaa lisäämällä kemiallinen prosessi magneettierotuksen yhteyteen. (Young & Luttrell 2012, 229.)

3.1 Magneettierottimen suunnittelu

Suunnitellessa magneettierottimia suurin vaatimus on saada aikaan voimakas magneettikenttä, jossa on jyrkkä kenttägradientti. Yhtenäisessä magneettisen vuon kentässä (KUVA 8), magneettiset partikkelit suuntautuvat kenttäviivojen suuntaisesti, mutta eivät liiku niiden suuntaisesti. Helpoin tapa tuottaa magneettierotukseen soveltuva kenttä on tuoda V-mallinen tolppa tasaisen tolpan yläpuolelle (KUVA 8). Yläpuolella oleva suippo tolppa keskittää magneettisen vuon hyvin pienelle alueelle tuottaen suuren kentän voimakkuuden. Alhaalla oleva tasainen tolppa jakaa yhtä suuren magneettisen vuon suuremmalle alueelle ja kentän voimakkuus on pienempi. Näiden kentän voimakkuuksien erojen avulla saadaan aikaan jyrkkä kenttägradientti tolppien väliselle alueelle. Suuri kenttägradientti voidaan tuottaa myös käyttämällä tolppaa, jossa vuorottelevat magneettiset ja ei-magneettiset kerrokset. (Wills & Napier-Munn 2006, 355.)



KUVA 4. Tasainen magneettikenttä ja jyrkän kenttägradientin omaava magneettikenttä (mukaillen Wills & Napier-Munn 2006, 355)

Magneettierottimessa pitää olla mahdollisuus säädellä magneettikentän voimakkuutta eri materiaalien ominaisuuksien mukaan. Sähkömagneeteilla tämä onnistuu helposti muuttamalla sähkövirtaa ja kesto-
magneeteilla napojen välistä etäisyyttä. (Wills & Napier-Munn 2006, 355.)

Teollisuudessa käytettävät magneettierottimet ovat jatkuvatoimisia ja erottelu tapahtuu partikkelien mennessä magneettikentän läpi. Magneettisesti herkät kappaleet järjestäytyvät magneettikentän kenttäviivojen mukaisesti ja kulkeutuvat niitä pitkin magneetin pinnalle. Partikkelien nopeutta on hallittava tarkasti ja yleensä syötössä käytetään hihnoja tai rumpuja. (Wills & Napier-Munn 2006, 355.)

3.2 Erilaiset magneettierottimet

Teollisuudessa käytettäviä magneettierottimia on kahta päätyyppiä: Heikkomagneettierottimet (LIMS) sekä vahvamagneettierottimet (HIMS). Märkävahvamagneettierottimet (WHIMS) ovat yleisimpiä teollisuudessa käytetyistä magneettierottimista. Joitakin heikkomagneettierottimia on kehitetty toimimaan suuremmilla magneettisilla voimilla ja niitä kutsutaan keskivahvamagneettierottimiksi (MIMS). Vahvamagneettierottimia käytetään myös joskus heikommilla magneettisilla voimilla. Tämän lisäksi vahvamagneettierottimiin kuuluu suuren gradientin vahvamagneettierottimet (HGMS) ja suprajohtavat magneettierottimet, joita käytetään kun tarvitaan suurempia magneettisia voimia. (Anderson, Dunne & Uhrig 2014, 223-224.)

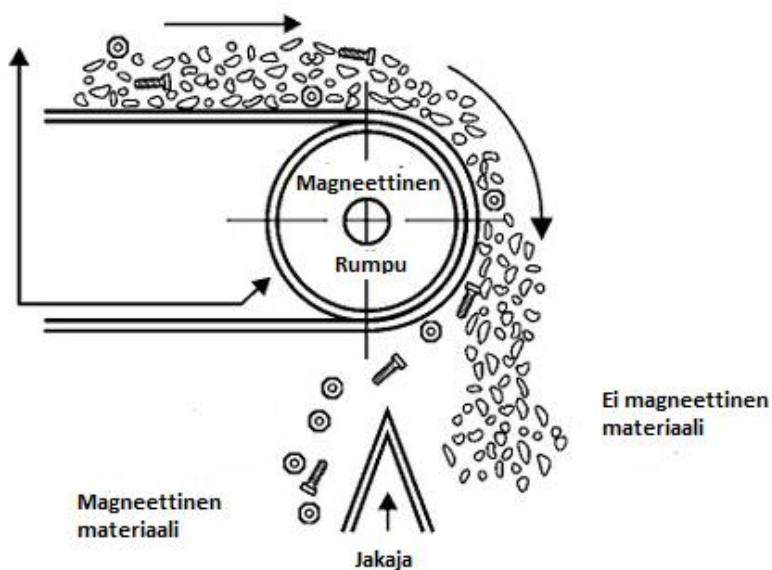
Magneettikentän voimakkuus LIMS-erottimilla on maksimissaan 0,2 teslaa ja MIMS-erottimilla 0,2-0,6 teslaa. HIMS-, WHIMS- ja HGMS-erottimilla kentän voimakkuus on vähintään 0,6 teslaa. Teollisuudessa käytettävät suprajohtavat HGMS-erottimet voivat tuottaa jopa 5 teslan kentän. Magnetiitin pois-

tamisessa erottimen tuottaman magneettikenttä vaihtelee 0,08-0,18 teslan välillä. Hyvin heikosti magneettisten materiaalien erottamiseen tarvitaan vähintään 1,8-2 teslan voimakkuus. (Anderson ym. 2014, 224.)

3.2.1 Heikkomagneettierottimet

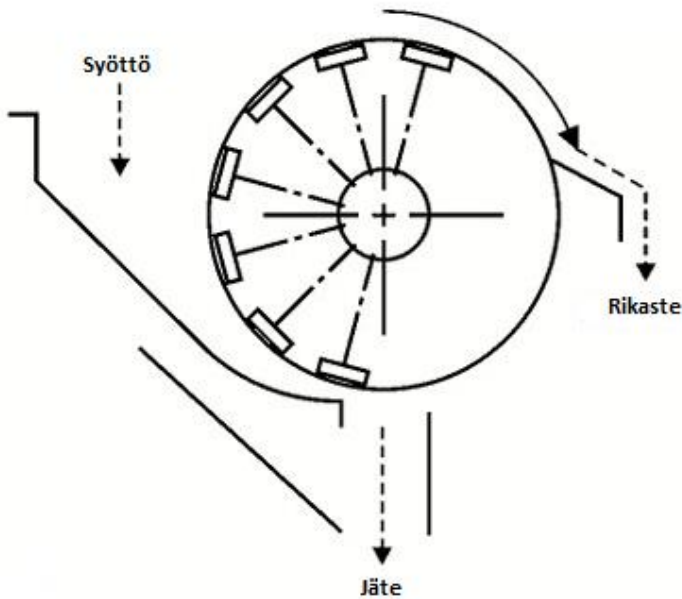
LIMS-erottimia käytetään yleensä poistamaan ferromagneettiset materiaalit, jotka vahingoittaisivat muuten prosessia. Ferromagneettiset materiaalit voidaan myös ensin poistaa, jotta parannetaan heikosti magneettisten materiaalien erotuksen tehokkuutta. Heikkomagneettierotus voidaan tehdä joko märkä- tai kuivaerotuksena. Suuremmilla partikkelikoilla käytetään kuivaerotusta ja alle 0,5 cm partikkeleille märkäerotusta, koska tällöin saadaan puhtaampi tuote ja vähemmän pölyhäviötä. (Fuerstenau & Han 2003, 228; Wills & Napier-Munn 2006, 357.)

Rumpumagneettierotin (KUVA 9) on yleisin laite, kun magneettierotus tehdään kuiville kiintoaineille. Erotin koostuu ei-magneettisesta rummista, jossa on 3-6 napojen suhteen toisinpäin sijoitettuja magneetteja. Alun perin rumpuerottimien magneetit olivat sähkömagneetteja, mutta nykyään käytetään myös kestmagneetteja. Rumpuerottimien toiminta perustuu siihen, että syötteen magneettipitoinen aine kiinnittyy pyörivään rumpuun pysyen sen kehällä erottuen ei-magneettisesta materiaalista. Lopuksi magneettinen materiaali irrotetaan rummista vesisuihkun avulla. Monia erilaisia magneetteja voidaan käyttää, esimerkiksi levymagneetteja, putkimagneetteja tai ritilämagneetteja. (Kaiva.fi 2014; Wills & Napier-Munn 2006, 357–358.)

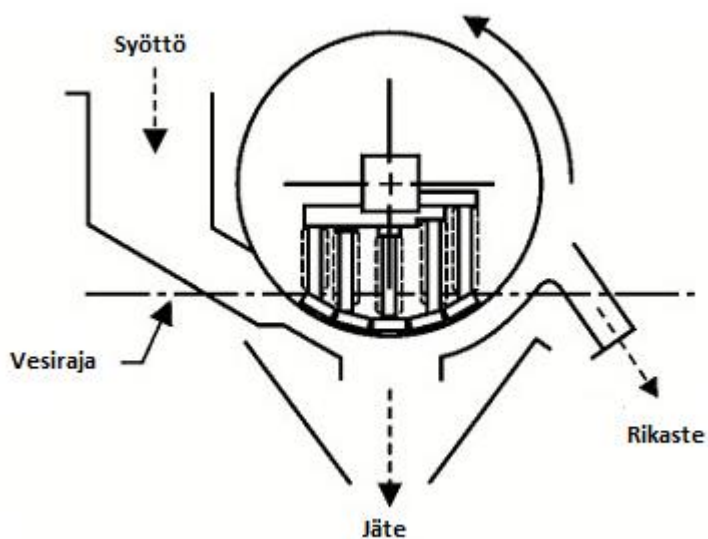


KUVA 5. Rumpumagneettierotin (mukaiillen Fuerstenau & Han 2003, 229)

Märkäheikkomagneettierottimilla rikastetaan yleensä rautamalmi, jossa on runsaasti magnetiittia. Näitä magneetteja käytetään esimerkiksi hiiliteollisuudessa, jossa otetaan talteen magnetiitti tai ferropii. Monet tällaiset erottimet toimivat samalla periaatteella, mutta niiden rakenteissa on eroavaisuuksia. Yleisimmän käytössä olevat ovat vastavirtaan pyörivä rumpuerotin (KUVIO 10) ja myötävirtaan pyörivä rumpuerotin (KUVIO 11). Vastavirtaista laitetta käytetään, kun erotetaan enemmän rikastetta ja myötävirtaista, kun kyseessä on pienemmät rikastemäärät. (Kaiva.fi 2014; Fuerstenau & Han 2003, 229.)

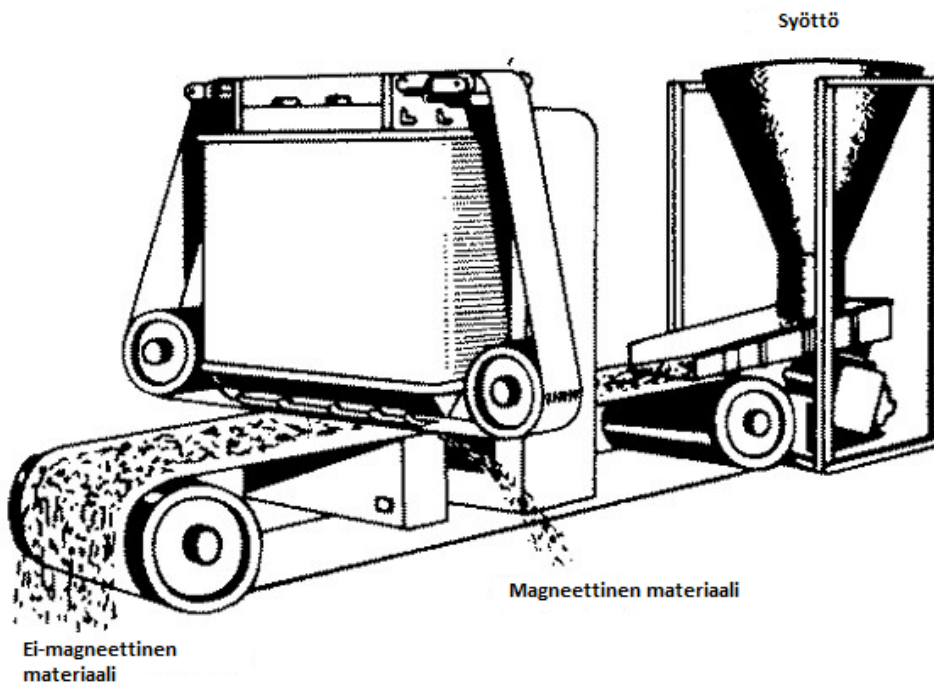


KUVA 6. Vastavirtaan pyörivä märkäheikkomagneettierotin (mukaiillen Fuerstenau & Han 2003, 230)



KUVA 7. Myötävirtaan pyörivä märkäheikkomagneettierotin (mukaiillen Fuerstenau & Han 2003, 230)

Hihna- ja levymagneettierottimia käytettiin ennen yleisesti hiekkamineraaliteollisuudessa, esimerkiksi ilmeniitin rikastamiseen, mutta nykyään niitä ei juurikaan käytetä. Niiden sijasta käytetään rulla- (KUVA 12) ja rumpuerottimia, joiden kestomagneetit on valmistettu harvinaisista maametalleista. (Wills & Napier-Munn 2006, 358.)



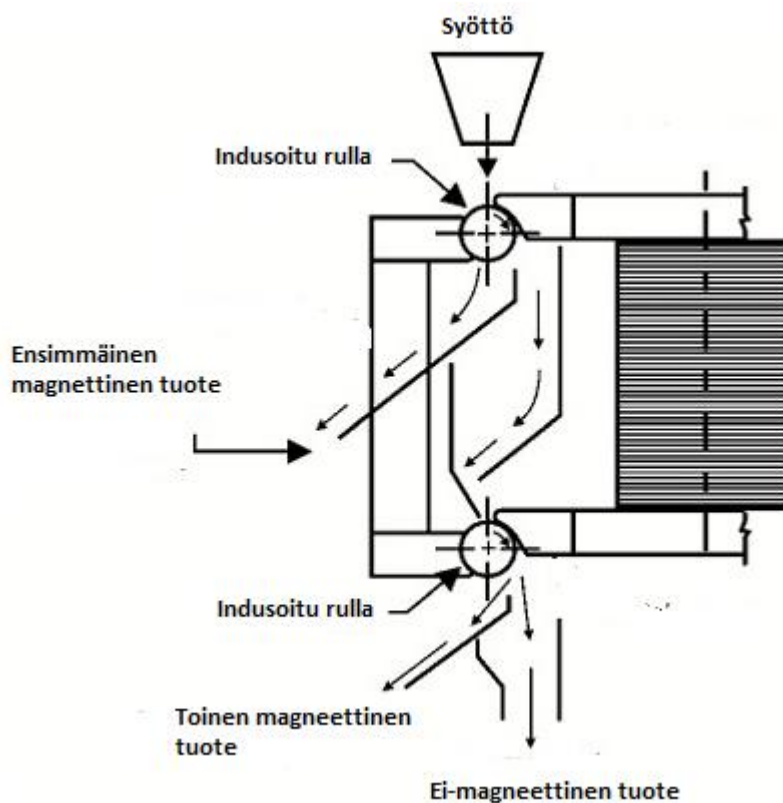
KUVA 8. Rullamagneettierotin (mukaiillen Wills & Napier-Munn 2006, 359)

Harvinaisiin maametalleihin perustuvissa rullaerottimissa käytetään vuoron perään magneettista ja ei-magneettista päällystystä suuren magneettikentän ja gradientin saavuttamiseksi. Syöttö tapahtuu ohutta hihnaa pitkin, jolloin partikkelit pysyvät suhteellisen paikallaan ja niiden nopeus on samanlainen, kun ne tulevat magneettiselle alueelle. Näiden ominaisuuksien ansiosta erotus onnistuu hyvin. (Wills & Napier-Munn 2006, 358.)

3.2.2 Vahvamagneettierottimet

Paramagneettisten tai heikosti magneettisten materiaalin erotukseen tarvitaan erotin, joka tuottaa suuren magneettivuon tiheyden. Suuri magneettivuon tiheys saadaan aikaan sähkömagneettiin perustuvalla erotuspiirillä, joka voi tuottaa maksimissaan 2 teslan magneettivoiman. Esimerkiksi kvartsihiekan valmistuksessa käytetään näitä erottimia erottamaan heikosti magneettiset rautaa sisältävät partikkelit. (Wills & Napier-Munn 2006, 359.)

Indusoitu rullamagneettierotin on yleisesti käytössä teollisuudessa, kun halutaan erottaa paramagneettiset materiaalit tuotteista, kuten kvartsista, maasälvästä ja kalsiitista. Laite sisältää päällystettyjä rullia ja päällysteet ovat vuoron perään magneettisia ja ei-magneettisia. Tällä tavalla saadaan luotua 2 teslan magneettivuo sekä suuri kenttägradientti. Rakeista materiaalia syötetään ohuena virtana ensimmäiseen rullaan ja magneettinen materiaali tarttuu siihen (KUVIO 13). Erottimen selektiivisyyttä voidaan muokata muuttamalla rullien nopeutta ja magneettivuon voimakkuutta. Syötteen tulee olla suhteellinen samankokoisina partikkeleina, jos erotukseen vaaditaan suuri selektiivisyys. Teollisuuden indusoidut rullamagneettierottimet sisältävät useimpia rullia ja niiden kapasiteetti voi olla jopa 10 tonnia tunnissa. (Fuerstenau & Han 2003, 230.)



KUVA 9. Indusoitu rullamagneettierotin (mukaillen Fuerstenau & Han 2003, 230)

Partikkelien nostoon perustuvia erottimia käytetään rakeisiin ja jauhemaisiin kuiviin materiaaleihin, jotka pääsevät virtaamaan vapaasti. Tällaisten erottimien tuote on puhdasta, koska magneettiset partikkelit erotetaan virrasta, joka virtaa painovoiman vaikutuksesta toiseen suuntaan. Selektiivisyys on myös parempi kuin indusoidulla rullamagneettierottimella, mutta kapasiteetti on pienempi. (Fuerstenau & Han 2003, 230–231.)

Yksi tunnetuimmista vahvamärkäerottimista on Jonesin magneettierotin. Monet märkäerottimet hyödyntävät Jonesin magneettierottimen tekniikkaa. Jonesin erottimella on vahva teräksestä rakennettu runko, johon magneettiset kiinnikkeet hitsataan kiinni. Kiinnikkeisiin liitetään ilmalla jäähdytetyissä laatikoissa olevat magneetikelat. Laitteen keskellä on akseli, joka pyörittää yhden tai kahden moottorin avulla kehällä olevia laatikoita. Laatikot sisältävät tasaisin välein sijoiteltuja uurteisia levyjä, jolloin magneettikenttä on voimakkaimmillaan uurteiden huipulla. Syöttöputket laatikkoihin sijaitsevat juuri ennen magneetikeloja ja niitä on kaksi identtistä molemmilla puolilla kehää. Laatikoissa magneettinen materiaali tarttuu uurteiden huippuihin ja ei-magneettinen putoaa laatikon läpi. Juuri ennen laatikon poistumista magneettikentästä magneettisiin partikkeleihin kiinni jääneet ei-magneettiset materiaalit poistetaan veden avulla. Kehän pyöriessä laatikko saavuttaa pisteen, jossa magneettikentän voimakkuus on käytännöllisesti katsoen nolla, jolloin magneettiset partikkelit huuhdotaan pois voimakaspaineisella vedellä. (Wills & Napier-Munn 2006, 360–361.)

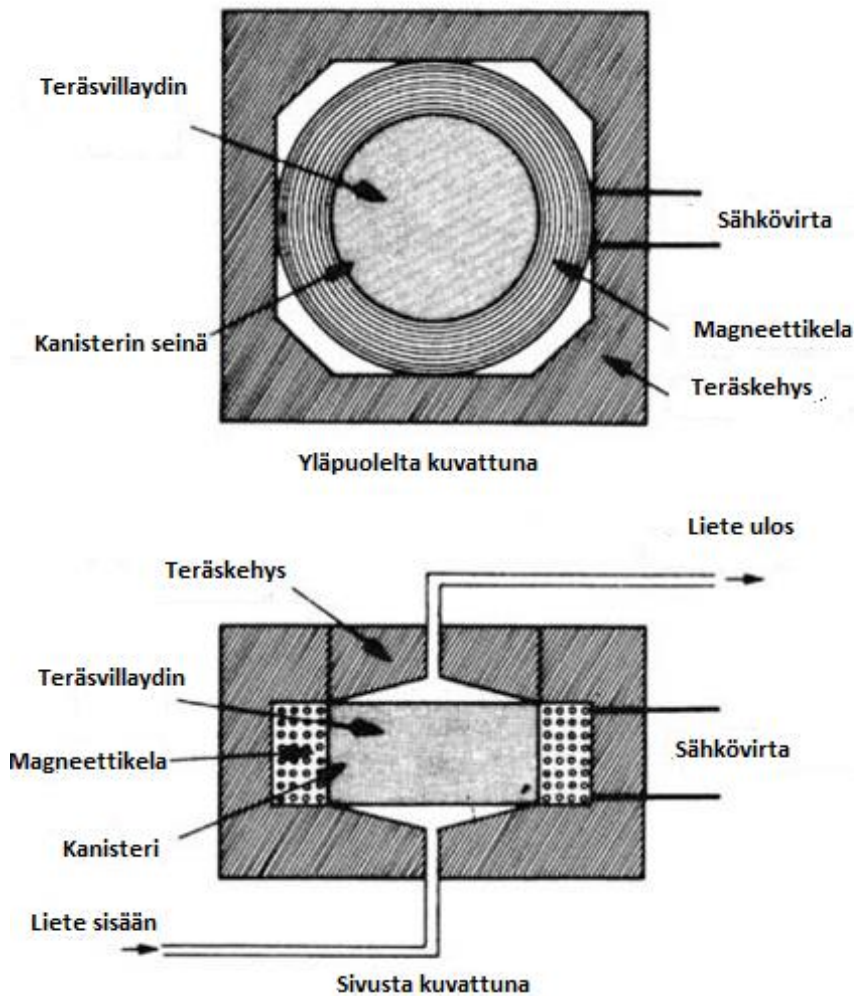
3.2.3 Suuren kenttägradientin magneettierottimet

Paramagneettisten hyvin pienen magneettisen susceptibiliteetin omaavien materiaalien erottamiseen tarvitaan laitteita, joilla pystytään luomaan hyvin suuria magneettisia voimia. Tällaiset voimat voidaan saavuttaa suurentamalla magneettikentän voimakkuutta (B). Perinteisissä vahvamagneettierottimissa tämä saadaan aikaan ferromagneettisella teräksellä, jotta energian kulutus on mahdollisimman vähäistä. Tällöin tarvitaan kuitenkin paljon terästä verrattuna tilaan, jossa erottelu tapahtuu. Esimerkiksi Jonesin erottimessa teräs vie 60 % laitteen kokonaistilavuudesta. Yleensä perinteiset vahvamagneettierottimet ovat tästä syystä hyvin massiivisia ja niiden investointi- ja asennuskulut ovat korkeita. (Wills & Napier-Munn 2006, 363.)

Perinteisten magneettierottimien teräspiireillä ei pystytä saamaan aikaan yli 2 Teslan magneettikenttää, koska rauta kyllästyy magneettisesti 2-2,5 Teslassa. Tällaisia magneettikenttiä pystytään tuottamaan solenoidien eli sähkömagneettien avulla, mutta tällöin energiankulutus on kohtuuttoman suuri ja solenoidien jäähdytys on ongelmallista. (Wills & Napier-Munn 2006, 363.)

Vaihtoehtoisesti magneettista voimaa voidaan lisätä suurentamalla kenttägradientin arvoa. Tällaisissa magneettierottimissa (KUVA 14) käytetään solenoidia, jonka ytimessä on esimerkiksi teräsvillaa. Teräsvillan avulla saadaan aikaan monia sekundaarisia magneettisia napoja. Jokainen sekundaarinen napa tuottaa noin 2 Teslan magneettikentän voimakkuuden ja lähietäisyydelleen suuren kenttägradientin,

jonka arvo voi olla jopa 14 T/mm. Näin saavutetaan paljon suuria kenttägradientteja sekundaaristen napojen pieniin väleihin. Solenoidin energiankulutusta voidaan pienentää rakentamalla solenoidin ympärille raudasta runko, jolloin magneettivoi pääsee kulkeutumaan jatkuvasti takaisin systeemiin. Solenoidin sisällä oleva teräsvilla on kanisterissa, jonka läpi syöte menee. Systeemin erotuskyky heikkenee mitä enemmän materiaali tarttuu teräsvillaan. Partikkelit saadaan talteen säännöllisesti poistamalla magneetikenttä ja huuhtomalla ne vedellä. (Wills & Napier-Munn 2006, 363.)



KUVA 10. Suuren kenttägradientin magneettierotin (mukaillen Wills & Napier-Munn 2006, 363)

Suuren kenttägradientin magneettierottimien heikkous on, että suuren gradientin takia sekundaaristen napojen magneettivoiman kantama on vain noin 1 mm. Sekundaaristen napojen tulee siis olla hyvin lähellä toisiaan, ja erotus toimii vain hienoilla partikkeleilla. Suuren gradientin magneettierottimia käytetään pääosin kaoliiniteollisuudessa erottamaan hyvin pieniä rautaa sisältäviä partikkeleita. (Wills & Napier-Munn 2006, 363.)

3.2.4 Suprajohtavat magneettierottimet

Tulevaisuuden kehitys magneettierotuksissa keskittyy suurten magneettivoimien käyttöön, jolloin pystytään erottamaan myös hyvin heikosti paramagneettisia partikkeleita. Yli 2 Teslan magneettikentän voimakkuus saadaan tuotettua taloudellisesti vain suprajohtavien magneettien avulla. (Wills & Napier-Munn 2006, 365.)

Suprajohtavat aineet ovat tietynlaisia metalliseoksia, jotka eivät vastusta sähköän virtausta todella matalissa lämpötiloissa. Esimerkiksi tällainen aine on niobium-titaaniseos 4,2 Kelvinin lämpötilassa. Suprajohtavasta seoksesta tehtyyn kelaan johdettu sähkövirta jatkaa kulkuaan senkin jälkeen, kun se ei enää ole kytkettynä virtalähteeseen. Tällöin kelasta tulee kestopagneetti. Suprajohtavilla magneeteilla pystytään luomaan hyvin voimakas ja yhtenäinen magneettikenttä, joka voi olla jopa 15 Teslaa. Perusongelma suprajohtavissa magneettierottimissa on todella matalien lämpötilojen ylläpitäminen. (Wills & Napier-Munn 2006, 365.)

4 OPTINEN EROTUS

Optinen erotus perustuu prosessissa käytettäviin sensoreihin, jotka lajittelevat materiaalin pintaominaisuuksien tai erilaisten tiheyksien mukaan. Ensimmäiseksi materiaali murskataan ja seulotaan siten, että partikkelien koko on 20–150 mm:n välillä. Syöttö sensorille tapahtuu värisevällä syöttölinjalla, jonka jälkeen on ränni tai nopea hihnakuljetin. Sensorit jaetaan kahteen erilaiseen luokkaan:

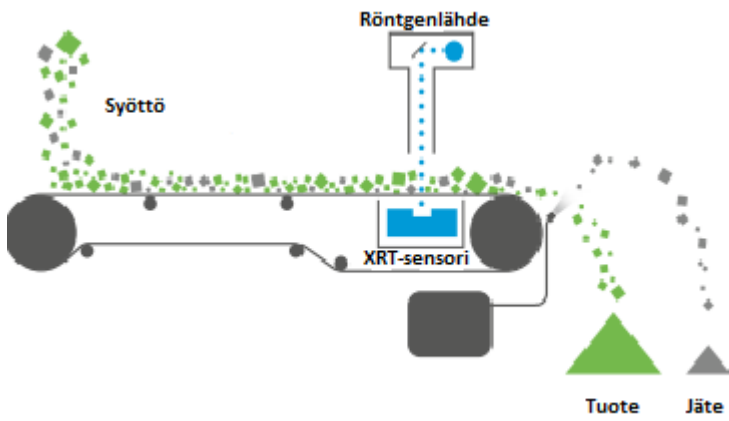
- 1) Heijastumaan perustuvat sensorit. Esimerkiksi optiset kamerat, jotka määrittävät partikkelit niiden pintaominaisuuksien mukaan.
- 2) Lähetykseen perustuvat sensorit. Esimerkiksi röntgenlähettimet, jotka määrittävät partikkelit niiden erilaisten tiheyksien mukaan.

Sensorilta tuleva data prosessoidaan reaaliaikaisesti ja datan perusteella systeemi tekee jokaiselle partikkelille erikseen päätöksen irrottaako se materiaalivirrasta vai ei. Päätöksen jälkeen valitut partikkelit irrotetaan materiaalivirrasta ilmasuihkun avulla. (Outotec 2015.)

Värisensorit lajittelevat kameran avulla partikkelit värien mukaan. Tämä voidaan tehdä näkymän valon aallonpituuksien lisäksi esimerkiksi infrapuna- tai ultraviolettivalon aallonpituuksilla. Värikameroita käytetään monissa erilaisissa prosesseissa epäpuhtauksien tai huonolaatuisten partikkelien erottamiseen. (Outotec 2015.)

Infrapunaspektrometrisensoreilla (NIR) lajittelevat materiaalit perustuen partikkelien erilaisten infrapuna- valon aallonpituudella heijastaman valon spektrin ominaisuuksiin. NIR-sensoreilla pystytään erottamaan sellaiset mineraalit toisistaan, jotka ovat vaikeita erotella ihmissilmän tai tavanomaisen kameran avulla. (Outotec 2015.)

XRT- eli röntgenlähettimellä (KUVA 15) partikkelit voidaan erottaa niiden erilaisten atomaaristen tiheyksien avulla. XRT:llä saadaan erotettua puhtaampi tuote, koska partikkelien pintojen sisältämät epäpuhtaudet, kuten kosteus tai pölykerros, eivät häiritse prosessia. Röntgenlähettämiä voidaan käyttää esimerkiksi erilaisten sulfidien havaitsemiseen. (Outotec 2015.)



KUVA 11. Röntgenlähettimeen perustuva erotin (mukaillen Outotec 2015)

Elektromagneettinen sensori (EM) pystyy erottamaan materiaalit toisistaan elektromagneettisten ominaisuuksien perusteella. Tällaisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi konduktiivisuus ja permeabiliteetti. EM-sensorit toimivat, kun halutaan prosessoida esimerkiksi sulfidimalmeja tai metallikuonaa. (Outotec 2015.)

LÄHTEET

Anderson, C., Dunne, R., Uhrie J. 2014. Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 100 Years of Innovation. Eaglewood: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

Fuerstenau, M., Han, K. 2003. Principles of Mineral Processing. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

Inkinen, P., Manninen R., Tuohi J. 2003. Momentti 2. Insinöörifysiikka. Keuruu: Kustannusosakeyhtiö Otava.

Kaiva.fi. 2014. Rikastus. Saatavissa: https://kaiva.fi/wp-content/uploads/2014/12/Rikastus_kaiva.pdf. Viitattu: 8.2. 2017.

Lehto, H., Havukainen, R., Maalampi, J. Leskinen, J. 2011. Fysiikka 7. Sähkömagnetismi. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Tammi.

Mansfield, M., O’Sullivan, C.1998. Understanding Psysics. Chichester: Praxis Publishing Ltd.

Reis, M. 2013. Fundamental of Magnetism. Kidlington: Elsevier Ltd.

Outotec. 2015. Outotec-Tomra Sensor-Based Ore Sorting Solutions. Saatavissa: http://new.outotec.com/globalassets/products/dry-comminution-and-sorting/ote_outotec_tomra_sensor-based_ore_sorting.pdf. Viitattu: 28.4.2017.

Wills, B., Napier-Munn, T. 2006. Wills’ Mineral Processing Technology. An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 7. painos. Burlington: Elsevier Ltd.

Young, C. Luttrell, G. 2012. Separation Technologies for Minerals, Coal, and Earth Resources. Eaglewood: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc