LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Erotustekniikan laboratorio

Minna Laitinen

SEULONNAN EROTUSTEHOKKUUDEN MÄÄRITTÄMINEN – TARKASTELUSSA REICHERTIN KARTIOSEULA

Kandidaatintyö

Työn ohjaajat: Tutkijaopettaja Ritva Tuunila
Nuorempi tutkija Nicolus Rotich

Pvm: 12.2.2014

Tiivistelmä

Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Kemiantekniikan koulutusohjelma

Erotustekniikan laboratorio

Tekijä: Minna Laitinen

Nimi: Seulonnan erotustehokkuuden määrittäminen – tarkastelussa Reichertin kartioseula

Kandidaatintyö 2014

49 sivua, 3 taulukkoa, 24 kuvaa

Työn ohjaaja: Ritva Tuunila ja Nicolus Rotich

Hakusanat: erotustehokkuus, kallistuskulma, Reichertin kartioseula, optimointi

Seulonta on vanha ja teollisuudessa yleisesti käytetty erotusmenetelmä. Huolimatta yksinkertaisesta prosessista seulontaa ilmiönä on tutkittu vähän. Prosessin yksinkertaisuus on voinut osaltaan vaikuttaa tutkijoiden mielenkiintoon aihetta kohtaan. Tutkimuksen vähyys näkyy etenkin painovoimaiseen seulontaan liittyvän kirjallisuuden vähyytenä. Kirjallisuusosassa käsitellään seulonnan taustaa ja märkä- sekä kuivaseulontaa. Lisäksi määritetään seulontaan vaikuttavat tekijät ja kartoitetaan seulontaan liittyvää matematiikkaa.

Työn kokeellisessa osassa tutkitaan Reichertin kartioseulan erotustehokkuutta 10, 12,5 ja 15 asteen kallistuskulmissa. Tutkimukset tehdään ideaalisille pallomaisille lasihelmille. Mittaustulosten avulla tutkitaan myös partikkelien liikettä seulapinnalla ja syötetyn massan vaikutusta erotustehokkuuteen. Kokeellisia mittaustuloksia käytetään MATLAB-mallinnuksessa, jonka avulla optimoidaan kartioseulan kallistuskulmaa ja massapanosta suhteessa erotustehokkuuteen. Tutkimuksen kannalta olennaisia kysymyksiä ovat: ”Onko painovoimaan perustuva erottelu seuloilla riittävä takaamaan hyvän erotustehokkuuden?” ja ”Mikä on seulan erotustehokkuuden kannalta optimaalinen kallistuskulma ja syötettävä massa?”

Reichertin kartioseulan etuja ovat sen energiatehokkuus ja yksinkertainen helposti säädettävä prosessi. Koemittauksista havaitaan, että erotustehokkuus vastaa optimoinnin tuloksia. Seulan liian pieni kallistuskulma ja suuri massapanos pienentävät seulan erotustehokkuutta. Lisätutkimuksia tarvitaan eri kallistuskulmilla ja materiaaleilla, jotta tuloksia voidaan verrata todellisiin seulontaprosesseihin.

Abstract

Lappeenranta University of Technology

Faculty of Technology

Department of Chemical engineering

Laboratory of Separation Technology

Author: Minna Laitinen

Title: Determination of screening efficiency in an approach of Reichert cone screen

Bachelor's Thesis 2014

49 pages, 3 tables, 24 figures

Supervisor: Ritva Tuunila and Nicolus Rotich

Key words: separation efficiency, inclination angle, Reichert cone screen, optimization

Screening is an old and widely used separation method in the chemical industry. Although screening has been regarded as a straightforward process, there have only been a few studies made. This might be explained by the lack of interest in the topic. The lack of research appears through its limited literature concerning gravitational screening. In this work the principles of screening, including wet and dry screening, are discussed. In addition, factors affecting screening and its mathematics are explored.

In the experimental part, the aim is to determine the screening separation efficiency of 10, 12,5 and 15 degree inclination angles in the screen modified from a Reichert cone separator. The experiment is performed for ideal glass beads. Particle movement on the screen surface and the effect of rates on separation efficiency are also explored based on results obtained through the experiment. Optimization is carried out using a MATLAB simulation to determine the optimal inclination angle, separation efficiency and batch. The essential research questions are: "is gravitational screening efficient enough for achieving sufficient screening separation efficiency?" and "which inclination angle and batch give the most optimal separation efficiency?"

The advantages of the Reichert cone screen are energy efficiency and easily modified process. The experimental results correspond to the results from optimization. If the inclination angle of screen is too shallow or the rate of beads is too high, the separation efficiency decreases. Additional research with different materials and inclination angles is required in order to obtain comparison material for real screening processes.

Symboliluettelo

F	syötön massavirta	kgs^{-1}
O	ylikoon massavirta	kgs^{-1}
U	alikoon massavirta	kgs^{-1}
X_F	syötön massajae	-
X_O	ylikoon massajae	-
X_U	alikoon massajae	-
E_O	ylitteen erotustehokkuus	-
E_U	alitteen erotustehokkuus	-
D_{pc}	Partikkelin halkaisija	mm tai µm
p	partikkelin todennäköisyys läpäistä seula	
d	partikkelin halkaisija	mm
x	neliömäisen aukon koko	mm
w	aukkoa ympäröivän viiran halkaisija	mm
$f_\circ$	vapaan pinnan pinta-ala	mm^2
n	partikkelin esiintyvyys seulalla	-
p’	partikkelin todennäköisyys läpäistä seula n-lukumäärällä partikkelin esiintyvyyksiä	-
Γ	värinän intensiteetti	G
a	värinäaallon amplitudi	m
f	värinäaallon taajuus	Hz
η	seulan erotustehokkuus	%

M_U	alikoon kokonaismassa	g
M_T	syötön massapanos	g
M_O	ylikoon kokonaismassa	g
M	seulaan tarttuneiden tai hukkaan joutuneiden lasihelmien massa	g
θ	seulan kallistuskulma	rad
$m_i(t)$	ylikoon massa ajan hetkellä t	g
M_T	alkuperäinen massapanos	g
v_0	alkunopeus	m/s
g	painovoimakiihtyvyys	m/s^2
t	viipymäaika seulapinnalla	s
t_0	aika kokeen alussa	s
μ	kitkakerroin	-

Sisällys

I Kirjallisuusosa 2
Johdanto 2
2 Seulat yleisesti 4
3 Seulojen matematiikka 6
3.1 Seulan ainevirtojen massataseet ja erotustehokkuus 6
3.2 Seulan kapasiteetti 9
3.3 Gaudin yhtälö 9
3.4 DEM ja SHP -menetelmät seulojen matemaattisessa mallintamisessa 10
4 Seulontaan vaikuttavat tekijät 11
4.1 Partikkelien koko ja muoto 11
4.2 Materiaalin syöttövirta seulalle 12
4.3 Seulan kallistuskulma ja seula-aukon vapaa pinta-ala 14
4.4 Värinä ja kosteus 15
4.5 Seulapinnan pituus 16
5 Yleisimmät seulatyypit 17
5.1 Täryseulat 19
5.1.1 Banaaniseulat 21
5.1.2 Rakoseulat, moduuliseulat ja lineaariset täryseulat 23
5.3 Trommel – seula 24
5.4 Pansep-seula 26
5.5 Kaariseulat 28
5.6 Pyöröseulat 28
II Kokeellinen osa 30
6 Työn tarkoitus 30
7 Työn taustaa - Reichertin kartioseula 30
7 Koelaitteisto ja mittausten suoritus 32
8 Mittaustulosten käsittely ja tulokset 33
9 Seulan erotustehokkuus optimoimalla 39
10 Johtopäätökset ja tulosten tarkastelu 42
11 Lähteet 47

I Kirjallisuusosa

Johdanto

Kiintoaineen luokittelulla tarkoitetaan partikkeleiden erottelua koon perusteella. Luokitteluprosessissa kiintoaine jaetaan yleensä karkeaan ja hienojakoiseen jakeeseen. (Ortega-Rivas 2007; Schmidt 2012) Materiaalin luokitteluun vaikuttavat partikkelin fysikaaliset ominaisuudet, kuten koko, muoto, tiheys ja partikkelien väliset vuorovaikutukset (Coulson & Richardson 1991). Lisäksi luokittimen valintaan vaikuttavat käsiteltävän fluidin tai kiintoainevirran koostumus, luokittimen taloudellisuus ja energiatehokkuus. (Coulson & Richardson 1991)

Yleisimpiä kiintoaineen luokittelussa käytettyjä laitteita ovat syklonit, seulat ja painovoimaiset sekä hidasteiset laskeuttimet, joita ovat esimerkiksi hydrauliluokitin ja laskeutuskartio. (Coulson & Richardson 1991; Holdich 2002; Wills & Napier-Munn 2006) Mekaanisiin luokittimiin kuuluvat esimerkiksi ruuvi- ja raappaluokitin. (McGabe *et al.* 1993; Wills & Napier-Munn 2006) Koska luokittimien kirjo on laaja, esitellään tässä työssä tarkemmin vain yleisimmät kiintoaineen luokitteluun käytettävät laitteet, kuten syklonit, laskeuttimet ja seulat.

Syklonin toiminta perustuu keskipakoisvoimaan, jonka avulla kiintoainepartikkelit erotetaan kaasuvirrasta. Syklonia vastaavaa laitetta, joka erottelee kiintoaineen nesteestä, kutsutaan hydrosykloniksi. Sykloni on muodoltaan kartiomainen sylinteri, jonka yläosaan kiintoaine-ilma-virta syötetään. Laitteen muoto pakottaa sisään syötetyn virtauksen alaspäin etenevään kierteeseen, jossa keskipakoisvoima ajaa partikkelit syklonin seinille. Seinällä olevat partikkelit päätyvät syklonin alaosaan, josta ne kerätään talteen. Samaan aikaan puhdas ilma poistuu syklonin yläosasta. (McGabe *et al.* 1993) Hydrosyklonin toiminta muistuttaa syklonia, mutta siinä syöttö jakautuu karkeita kiintoainepartikkeleita sisältävään alitteeseen ja hienojakoisia partikkeleita sisältävään ylitteeseen (Holdich 2002; Ortega-Rivas 2007).

Laskeutuskartio on perinteinen painovoimaan perustuva laskeutin. Laskeutuskartiossa partikkelit sedimentoituvat kartion pohjalle. Samaan aikaan lietevirta syöte-

tään laskeutusaltaaseen ylhäältä. Hydrauliluokitin muistuttaa laskeutuskartiota, mutta altaita on useita ja ne on asetettu peräkkäin. Vesivirta syötetään altaisiin alhaalta ja käsiteltävä liete ylhäältä. Ensin erottuvat karkeat kiintoaineet, minkä jälkeen käsitelty virta ohjataan seuraavaan tankkiin, jossa vastaavasti keskikokoiset partikkelit erottuvat altaan pohjalle. Lopulta hienojakoiset partikkelit erottuvat viimeisessä altaassa. (Wills & Napier-Munn 2006)

Luokittimia, kuten seuloja ja sykloneita, käytetään kaivos-, elintarvike-, lääke- ja öljyteollisuudessa (Coulson & Richardson 1991; Ortega-Rivas 2007; Schmidt 2012) Teollisuusprosesseissa ne on usein liitetty osaksi erilaisia jauhatuspiirejä, jossa ne tehostavat muiden erottimien toimintaa (Holdich 2002; Kuopanportti 2013; Ortega-Rivas 2007).

Luokittimien teollisuussovelluksista käytetyin on seula (Holdich 2002). Tästä huolimatta seulontaa ilmiönä on tutkittu vähän, vaikka menetelmällä on pitkät perinteet historiassa. Tutkimuksen vähyys voi selittyä prosessin yksinkertaisuudella, mikä on voinut vähentää mielenkiintoa aihetta kohtaan. Erotusmenetelmän tutkimiseen on myös vaikuttanut seulontaparametrien määritystapojen epäluotettavuus. Lisäksi tiedon hankintaa on saattanut hidastaa laaja tutkimuskenttä ja seulontalaitteiden monimuotoisuus (Liu 2009; Li *et al*. 2003; Chen *et al.* 2010).

Tämän kandidaatintyön kirjallisuusosan tarkoituksena on selventää seulontaa ilmiönä. Kirjallisuusosan alussa tarkastellaan kuiva- ja märkäseulonnan ominaisuuksia. Kolmannessa kappaleessa käsitellään seulontaan liittyvää teoriaa ja matematiikkaa. Lisäksi kirjallisuusosassa tarkastellaan seulontaan vaikuttavia tekijöitä ja esitellään yleisimmät seulatyypit. Koska seulontaa käsitteleviä perusteoksia on vähän, tämän työn kirjallisuusosa perustuu suurelta osin muutamaan aihetta käsittelevään yleisteokseen ja lehtijulkaisuihin. Suurin osa seulontaan liittyvästä kirjallisuudesta käsittelee pääosin seulan erotustehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä ja partikkelien liikettä seulapinnalla (Chen *et al.* 2010).

Tutkitun teoriatiedon vähyys oli havaittavissa myös tämän työn kokeellisessa osassa, jossa tutkitaan kiintoaineen erottumista kiinteän aineen massavirrasta painovoimaan perustuvalla Reichertin kartioseulalla. Kokeellisen osan tavoitteena oli

määrittää kartioseulan erotustehokkuus eri kallistuskulmissa, tutkia partikkelin liikettä seulapinnalla ja optimoida erotustehokkuuden kannalta suotuisin kallistuskulma ja massapanos.

Kokeellisen osan aihe on ajankohtainen, sillä viime vuosina seulatutkimusta ovat kiihdyttäneet teollisuuden kiristyneet energiavaatimukset. Laitevalinnassa tärkeiksi kriteereiksi ovat myös nousseet prosessien taloudellisuus ja ympäristövaikutukset. Tämä näkyy etenkin lisääntyneenä mielenkiintona painovoimaiseen erotteluun perustuvien seulojen käyttömahdollisuuksia ja matemaattista mallinnusta kohtaan.

2 Seulat yleisesti

Seulonta on vanha ja laajasti käytetty erotusmenetelmä. Menetelmää käytetään tieteellisessä tutkimuksessa kokoanalyysiin ja teollisuudessa kiinteän aineen kokoerotteluun (Ortega-Rivas 2012). Erilaisia seuloja ja niiden sovellutuksia voidaan myös käyttää:

- prosessien esiseulontaan
- tuoteraekoon lajitteluun
- kuivatukseen tai veden poistoon lietteestä
- hienoaineksen tai lietteen erotteluun
- roskien poistamiseen

(Liu 2009; Wills & Napier-Munn 2006; Kuopanportti 2013).

Perinteinen seula rakentuu aukollisesta pinnasta, joka voi olla asetettu tasoon tai kallistettu eriasteisiin kulmiin. Teollisuusseuloissa käytettyjä materiaaleja ovat teräsverkko, silkki, muovikangas, metallitangot, -levyt tai lomittain asetetut metallilangat. Seuloissa yleisimmin käytetty metalli on kuitenkin ruostumaton teräs. Kuten valmistusmateriaalejakin, seula-aukkojen muotoja on olemassa useita. Käytetyimmät muodot seulapinnoissa ovat ympyrä ja neliö. (Coulson & Richardson 1991; Ortega-Rivas 2012)

Seulonta ilmiönä perustuu siihen, että seulottava partikkeli kulkeutuu seulalla aukon läpi alikokoon tai ohittaa aukon päätyen ylikokoon. (Wills & Napier-Munn 2006; Metso Minerals 2006) Perinteisesti partikkelien erottuminen seulalla on perustunut painovoimaan. Materiaalin kulkeutumista seulan läpi voidaan tehostaa lisäksi keskipakoisvoiman avulla, harjaamalla tai mekaanisella värinällä. (McGabe *et al.* 1993)

Kuivaseulontaa suositaan märkäseulontaa useammin, vaikka sillä saavutetaan huonompi erotustehokkuus kuin märkäseulonnassa (Coulson & Richardson 1991; McGabe *et al.* 1993; Wills & Napier-Munn 2006). Märkäseulonnassa seulottavan aineen partikkelikoko vaihtelee 250 µm:stä - 100 µm:iin. Seulonnan erotustarkkuus paranee, jos seulottava aine on täysin märkää. Tällöin materiaalia voidaan erottaa jopa 40 µm:n partikkelikokoon asti. (Wills & Napier-Munn 2006; Kuopanportti 2013) Märkäseulonnan hyvä erotustehokkuus selittynee kostean kiintoaineen paremmalla jauhautumisella. Lisäksi kosteus sitoo seulonnan aikana syntyvää pölyä. Märkäseulonnan etu on myös se, että kostutetut kiintoainepartikkelit eivät tartu kiinni toisiinsa (Coulson & Richardson 1991). Seulonnan taloudellisuutta heikentää kostutetun kiintoaineen kuivaustarve ennen jatkokäsittelyä. (Coulson & Richardson 1991).

Kuivan kiintoaineen seulonnassa pienin partikkelikoko on yleensä 5 mm:ä. Jos kiintoaine on täysin kuivaa, voidaan erotus tehdä 40 µm:n partikkeleille. Suositeltavaa kuitenkin on, että halkaisijaltaan alle 5 mm:n partikkelit seulotaan märkänä. (Wills & Napier-Munn 2006; Kuopanportti 2013) Seulonnassa partikkelikoon alarajana voidaan pitää taloudellisuuden kannalta 150 meshiä (noin 99 µm:ä). Tätä kokoa pienemmät partikkelit on tehokkaampaa erotella muilla erotusmenetelmillä. (McGabe *et al.* 1993).

3 Seulojen matematiikka

Seulonta ilmiönä tunnetaan huonosti. Olemassa olevat matemaattiset mallit perustuvat havainnointiin ja kokeellisiin määrityksiin. Mallinnusta vaikeuttavat myös partikkelien ja ympäristön väliset vuorovaikutukset. (Dong & Yu 2012)

Seuloihin liittyvä matematiikka perustuu pääosin todennäköisyyteen, jota esimerkiksi Gaudin yhtälö (yhtälö 8) kuvaa, tai kineettisiin yhtälöihin. Seulonnan mallinnuksissa on aikaisemmin tutkittu partikkelien käyttäytymistä, kuten kerrostumista tai seulan läpäisyä. Ilmiötä on mallinnettu numeerisesti ja esimerkiksi kuvaamalla partikkelin käyttäytymistä DEM-menetelmällä. (Dong & Yu 2012; Soldinger 1999) Seulaa itseään kuvaavia muuttujia ovat puolestaan erotustehokkuus, ainetaseet ja kapasiteetti. Ainetaseiden avulla pystytään määrittämään sekä erotustehokkuus että kapasiteetti.

3.1 Seulan ainevirtojen massataseet ja erotustehokkuus

Seulojen erotustehokkuutta voidaan helpoiten kuvata massatasapainon lausekkeiden avulla. Ortega-Rivas, Wills & Napier-Munn ja McGabe *et al*. määrittävät teoksissaan seulalle syötettävän ja sieltä poistuvan aineen massataseen seuraavasti:

$$F = O + U \tag{1}$$

jossa F syötön massavirta

O ylikoon massavirta

U alikoon massavirta

Yhtälö 1 voidaan ilmaista myös massajakeiden avulla:

$$FX_F = OX_O + UX_U \tag{2}$$

jossa X_F syötön massajae

X_O ylikoon massajae

X_U alikoon massajae

Edellä olevien yhtälöiden 1 ja 2 avulla voidaan johtaa myös alikoon, ylikoon ja kokonaiserotustehokkuuden lausekkeet (yhtälöt 3, 4 ja 5). Seulan erotustehokkuuden avulla kuvataan seulan kykyä erottaa ali- ja ylikoko toisistaan. Ideaalitapauksessa erotus tapahtuu täydellisesti, jolloin ylikoossa on vain ylikokoon kuuluva aine ja vastaavasti alikoossa alikokoinen aine. Toisin sanoen seula erottaa materiaalin tarkasti, jolloin alikoon suurin partikkeli on vain vähän pienempi kuin ylikoon pienin partikkeli. Todellisuudessa seuloilla ei saada aikaan täydellistä erottumista, vaan massavirtojen välillä tapahtuu sekoittumista, minkä seurauksena yli- ja alikoossa on molempien kokoluokkien partikkeleita. Massataseiden avulla esitettynä erotustehokkuus on ylikoon tai vastaavasti alikoon ja syötön suhde. (McGabe *et al.* 1993; Ortega-Rivas 2012; Wills & Napier-Munn 2006)

$$E_O = \frac{OX_O}{FX_F} \tag{3}$$

jossa E_O ylitteen erotustehokkuus

$$E_U = \frac{U(1-X_U)}{F(1-X_F)} \tag{4}$$

jossa E_U alitteen erotustehokkuus

Kokonaiserotustehokkuus *E* saadaan ylikoon ja alikoon erotustehokkuuksien lausekkeiden tulona. (McGabe *et al.* 1993; Ortega-Rivas 2012; Wills & Napier-Munn 2006)

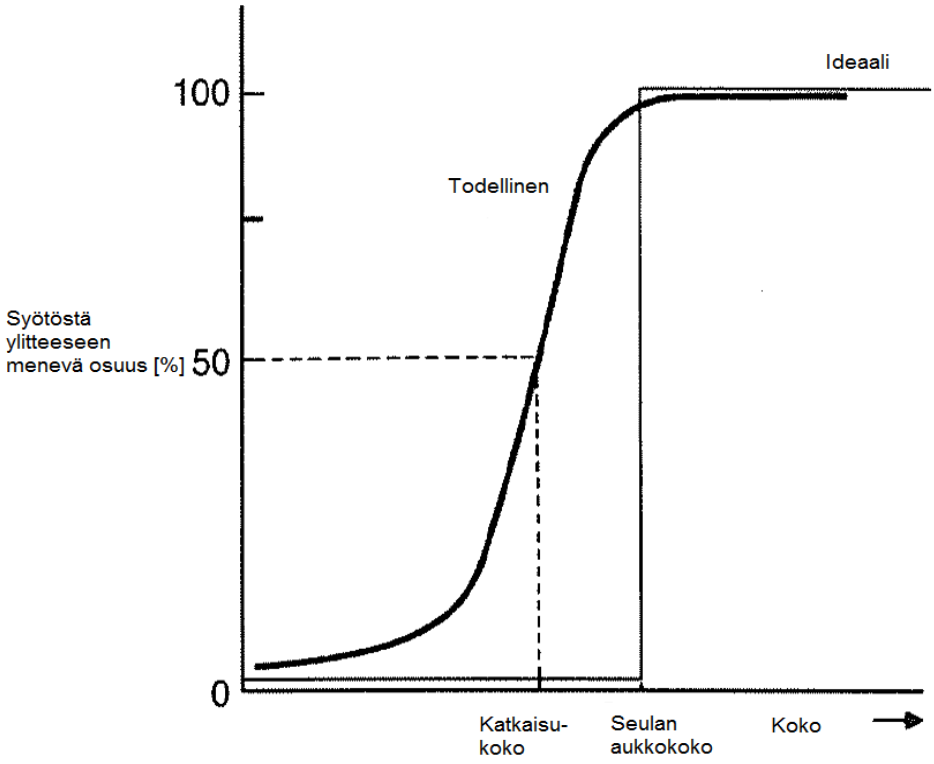
$$E = E_O \cdot E_U = \frac{OUX_O(1-X_U)}{F^2X_F(1-X_F)} \tag{5}$$

Kokonaiserotustehokkuus voidaan esittää myös pelkkien massajakeiden avulla:

$$E = \frac{(X_F-X_U)(X_O-X_F)X_O(1-X_U)}{(X_O-X_U)^2(1-X_F)X_F} \tag{6}$$

Erotustehokkuus on yksinkertaisempaa havainnollistaa partikkeleiden kokoon perustuvalla jakautumiskäyrällä (kuva 1). Jakauman y-akselilla on esitetty ylikokoon päätyvien partikkeleiden prosenttiosuus ja x-akselilla partikkeleiden geometrinen keskikoko. Kuvan 1 jakautumiskäyrältä voidaan myös lukea raekokoluokan katkaisukoko, jossa partikkeleilla on 50 %:n todennäköisyys päätyä joko ylittee-

seen tai alitteeseen. Ideaalitapauksessa jakautumiskäyrä on porrasmainen, jolloin erottuminen on terävää ja mahdollisimman tehokasta. Todellista seulontaa kuvaava käyrä on muodoltaan loivempi, jolloin erottuminen ei ole yhtä selkeää kuin ideaalitapauksessa. Tämä näkyy myös seulan erotustehokkuuden pienenemisenä, jolloin todellisuudessa seuloilla ei saavuteta 100 %:n erotustehokkuutta. (Ortega-Rivas 2012; Kuopanportti 2013; Wills & Napier-Munn 2006) Tästä johtuen teollisuusseuloilla materiaalin täydellisellä erottumisella tarkoitetaan 90 – 95 %:n erotustehokkuutta (Metso Minerals 2006).



Kuva 1. Wills & Napier-Munn (2006) mukaillen ylitteeseen päätyvän aineen osuus syötteestä eri raeluokan geometrisilla keskiarvoilla mukaillen

3.2 Seulan kapasiteetti

Seulan kapasiteetti ja erotustehokkuus ovat toistensa vastakohtia. Kun seulan erotustehokkuutta halutaan nostaa, kapasiteettia on usein pienennettävä. Jotta saavutettaisiin optimaaliset seulontaolosuhteet, joudutaan optimoimaan näiden kahden tekijän välillä. (McGabe *et al.* 1993; Ortega-Rivas 2012)

Seulan kapasiteetilla tarkoitetaan materiaalin massaa, joka syötetään aikayksikössä seulan pinta-alayksikköä kohti. Kapasiteettia voidaan säätää muuttamalla syötön nopeutta. Toisaalta todennäköisyys, jolla partikkeli läpäisee seulan, on riippuvainen seulapinnan vapaasta tilasta. Jos kapasiteetti on liian suuri, partikkelit ruuhkautuvat seulapinnalle, jolloin kontakti partikkelin ja pinnan välillä estyy. Tämä puolestaan aiheuttaa partikkeleiden kerrostumista. (McGabe *et al.* 1993; Ortega-Rivas 2012; Schmidt 2000)

Seulan kapasiteettiin vaikuttaa myös seulan aukkokoko. McGabe *et al.* (1993) määrittelee teoksessaan seulan aukkokoon yhtä suureksi kuin suurin seulan läpi kulkeva partikkeli. Partikkelin leveyttä kuvaa lyhenne D_{pc}. Kapasiteetti on suoraan verrannollinen tähän leveyteen, ja niiden suhde määritetään aina vakioksi. Seula-aukkojen lukumäärä on verrannollinen yhtälöön $1/D_{pc}^{2}$. Toisaalta seulottavan partikkelin massa on sama kuin halkaisijan leveys korotettuna kolmanteen potenssiin eli D_{pc}^{3}. Kun kapasiteetti on yhtä kuin syötetty massa aikayksikköä ja pinta-alaa kohti, saadaan leveyden ja kapasiteetin välille yhteys:

$$\frac{1}{(D_{pc})^2} * \left(D_{pc}\right)^3 = D_{pc} \qquad (7)$$

3.3 Gaudin yhtälö

Partikkelin todennäköisyyttä *p* läpäistä seula voidaan mallintaa matemaattisesti Gaudin yhtälön avulla. Yhtälössä todennäköisyys saadaan laskemalla partikkelin koon suhde seula-aukon kokoon. Seulonnan aikana partikkelit läpäisevät seulan eri todennäköisyyksillä tietyssä aikayksikössä. Gaudin yhtälö kuvaa tätä ilmiötä laskemalla pallomaisen pyöreän kappaleen todennäköisyyden läpäistä seula (yhtälö 8). (Schmidt 2000; Wills & Napier-Munn 2006)

$$p = \left(\frac{x-d}{x+w}\right)^2 \quad (8)$$

jossa d partikkelin halkaisija

x neliömäisen aukon koko

w aukkoa ympäröivän viiran halkaisija

Yhtälö 8 voidaan sieventää muotoon

$$p = f_\circ \left(1 - \frac{d}{x}\right)^2 \quad (9)$$

jossa $f_\circ$ vapaan pinnan pinta-ala

Edellä määritetyt yhtälöt esittävät pallomaisen kappaleen läpäisytodennäköisyyttä partikkelin yhdellä esiintymällä seulalla. Gaudin yhtälön avulla voidaan myös kuvata useamman peräkkäisen tapahtuman todennäköisyyttä.

$$p' = (1-p)^n \quad (10)$$

jossa p’ partikkelin todennäköisyys läpäistä seula n-lukumäärällä partikkelin esiintyvyyksiä

p partikkelin todennäköisyys läpäistä seula yhden tapahtuman aikana

n partikkelin esiintyvyys seulalla

3.4 DEM ja SHP -menetelmät seulojen matemaattisessa mallintamisessa

Partikkelien liikettä ja virtausta seulalla voidaan mallintaa matemaattisesti DEM- ja SHP-menetelmillä. Lyhenteet tulevat englanninkielisistä sanoista *The Discrete Element Method* ja *Smoothed Particle Hydrodynamics*. DEM-menetelmällä mallinnetaan numeerisesti pallomaisten partikkelien virtausta seulapinnalla ja sen tehtävänä on laskea partikkelien törmäyksiä toistensa ja seulapinnan välillä. Simulaatiossa partikkelien välillä ei oleteta olevan vuorovaikutuksia. Lisäksi kiintoainepartikkelit kuvataan joustaviksi. Menetelmällä saadut tulokset ovat yleensä

viitteellisiä, eivätkä ne välttämättä kuvaa todellista virtausprofiilia seulonnan aikana. (Li *et al.* 2003; Fernandez *et al.* 2011)

SHP-menetelmä puolestaan mallintaa monimutkaisia virtauksia avaruudessa. Sitä käytetään erityisesti mallintamaan materiaalivirtaa seulapinnan läpi banaaniseuloilla. (Fernandez *et al*. 2011)

4 Seulontaan vaikuttavat tekijät

Seulontaan vaikuttavia tekijöitä ovat: partikkelin koko, muoto, syötön nopeus, seulan kallistuskulma ja seulan vapaa pinta-ala sekä mekaaninen tärinä. Edellä mainituista partikkelin koko ja muoto vaikuttavat hiukkasen todennäköisyyteen läpäistä seula-aukko. Muut tekijät vaikuttavat materiaalin uudelleen seulottavuuteen. (Ortega-Rivas 2012; Wills & Napier-Munn 2006)

4.1 Partikkelien koko ja muoto

Seula-aukon muodon valinnassa on huomioitava partikkelin koko ja muoto. Jos partikkeli on muodoltaan pyöreä, se on helpompi seuloa. Epäsäännöllisen muotoiset, kuten kuitumaiset ja pitkät partikkelit, tukkivat seulan jäämällä kiinni seula-aukkoihin. Hankalasti seulottavia ovat myös helposti paakkuuntuvat partikkelit. Seulottaessa epäsäännöllisen muotoisia partikkeleita seulan tukkeutumista voidaan vähentää käyttämällä suorakaiteen muotoisia aukkoja. Pyöreiden partikkeleiden seulonnassa seula-aukon muodot voivat vaihdella, mutta yleensä käytetyt seula-aukot ovat neliön tai ympyrän muotoisia. (Ortega-Rivas 2012; Wills & Napier-Munn 2006)

Epäsäännöllisen muotoisten kiintoainepartikkeleiden lisäksi seulan tukkeutumista aiheuttavat halkaisijaltaan lähes seula-aukon kokoiset partikkelit. Ilmiötä on havainnollistettu taulukossa I. Mitä lähemmäksi seulan aukkokokoa partikkelin halkaisija kasvaa, sitä nopeammin todennäköisyys läpäistä seula pienenee. Partikkelin kulkureitillä on oltava siten useampi seula-aukko, jotta se läpäisisi seulan mahdollisimman suurella todennäköisyydellä. (Ortega-Rivas 2012; Wills & Napier-Munn 2006)

Taulukko I Wills & Napier-Munn (2006) taulukkoa mukaillen partikkelikoon ja aukkokoon välisen suhteen vaikutus seulan läpäisytodennäköisyyteen

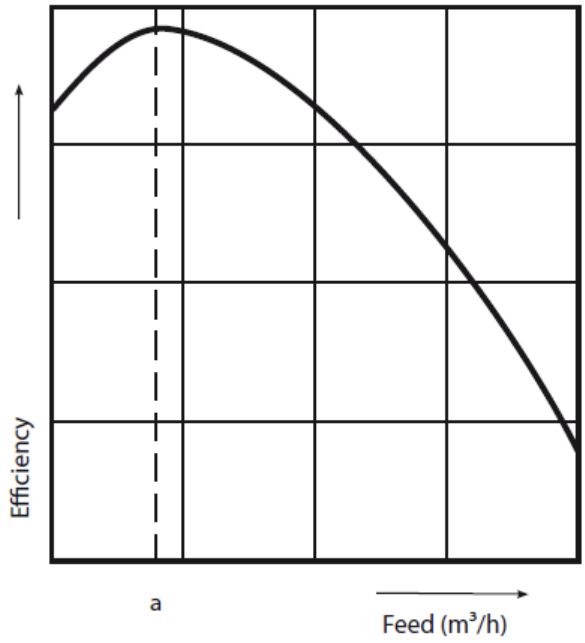
Partikkelin koon suhde seulan aukkokokoon	**Läpäisytodennäköisyys /1000 partikkelia kohden**	**Tarvittavien aukkojen lukumäärä partikkelin kulkureitillä**
0,001	998	1
0,01	980	2
0,1	810	2
0,2	640	2
0,3	490	2
0,4	360	3
0,5	250	4
0,6	140	7
0,7	82	12
0,8	40	25
0,9	9,8	100
0,95	2	500
0,99	0,1	10000
0,999	0,001	1000000

4.2 Materiaalin syöttövirta seulalle

Kiintoainevirran syöttönopeudella on merkitystä aineen seulottavuuteen. Seulalle syötettävä massavirta oletetaan yleensä matalaksi ja seulonta-aika pitkäksi, jotta materiaali erottuisi mahdollisimman täydellisesti. Tätä teoriaa hyödynnetään etenkin partikkeleiden kokoanalyyseissä. (Wills & Napier-Munn 2006)

Syötön tilavuusvirran suhdetta erotustehokkuuteen on kuvattu kuvassa 2. Kun tilavuusvirta on alle kriittisen pisteen *a*, seulan erotustehokkuus kasvaa yhdessä syötön tilavuusvirran kanssa. Erotustehokkuuden kasvu aiheutuu materiaalivirran suurista partikkeleista, jotka muodostavat yhtenäisen bulkkivirran ja estävät hienojakoisten partikkelien hyppimisen seulapinnalla. Bulkkivirrassa olevilla partikkeleilla on siten suurempi todennäköisyys läpäistä seula-aukot. Erotustehokkuutta parantavat myös suurien partikkeleiden väliin muodostuvat kanavat, joiden läpi hienojakoiset partikkelit ohjautuvat seulapinnalle. (Li *et al.* 2003; Metso Minerals 2006)

Erotustehokkuus laskee nopeasti, kun massavirta ohittaa kriittisen pisteen. Seulan kapasiteetti ei ole riittävä käsittelemään suurentunutta materiaalivirtaa, ja partikkelit kulkeutuvat seula-aukkojen ohi. (Li *et al.* 2003; Metso Minerals 2006)

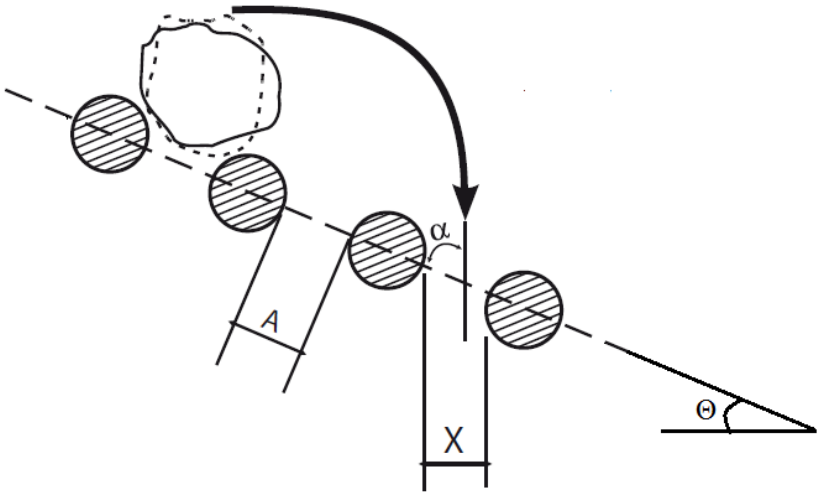


Kuva 2. Seulan erotustehokkuuden suhde syötön tilavuusvirtaan (Metso Minerals 2006, s.4-5)

Teollisuudessa matalia syötön massavirtoja ja pitkiä seulonta-aikoja ei voida noudattaa tuotannon taloudellisista syistä. Toisaalta liian suuri massavirta ja siten materiaalin liian suuri nopeus seulapinnalla aiheuttavat partikkeleiden kerrostumista. Suuret partikkelit sijoittuvat lähelle seulapintaa ja syrjäyttävät pienet partikkelit kerrostuman pinnalle, jolloin ne eivät läpäise seulaa. Korkea syöttönopeus ja siitä aiheutuva partikkelien kerrostuminen heikentävät seulan erotustehokkuutta, minkä seurauksena teollisuuden seulontaprosesseissa syötön massavirtaa joudutaan usein säätämään korkeamman erotustehokkuuden saavuttamiseksi. (Li *et al.* 2003; Wills & Napier-Munn 2006)

4.3 Seulan kallistuskulma ja seula-aukon vapaa pinta-ala

Seulan kallistuskulmalla tarkoitetaan seulapinnan ja horisontaalitason välistä kulmaa (Wang & Tong 2011). Kallistuskulmaa muuttamalla voidaan vaikuttaa seulalla kulkevan partikkelin nopeuteen ja seula-aukon vapaan alan kokoon. Gaudin todennäköisyysteorian mukaan partikkelin todennäköisyys läpäistä seula kasvaa partikkelin ja seula-aukon koon välisen eron kasvaessa. Teoria perustuu kuitenkin olettamukseen, jossa partikkeli lähestyy seula-aukkoa kohtisuorassa seulapinnan suhteen. Kun kallistuskulmaa Θ nostetaan, seulapinnan ja -aukon välinen kulma α pienenee. Tämä puolestaan pienentää seula-aukon vapaata pinta-alaa *A*. Ilmiö on esitetty kuvassa 3, jossa *X* kuvaa seulan vapaan pinta-alan projektiota horisontaalin suhteen. (Metso Minerals 2006; Wang & Tong 2011; Wills & Napier-Munn 2006)



Kuva 3. Metso Minerals (2006) käsikirjan kuvaa mukaillen seulan kallistuskulman vaikutus seula-aukon vapaaseen pinta-alaan

Kallistuskulman nostaminen lisää partikkeleiden liikettä seulapinnalla, jolloin partikkeleilla on suurempi todennäköisyys ajautua seula-aukkoihin. Ilmiö on havaittavissa etenkin perinteisillä painovoimaiseen erotteluun perustuvilla seuloilla, joilla kallistuskulman suurentaminen lisää painovoiman vaikutusta partikkeleihin aiheuttaen niiden vierinnän seulapinnalla. Seulan kallistuskulmaa ei voida kuiten-

kaan suurentaa rajattomasti, sillä liian suurella kallistuskulmalla partikkelit eivät ehdi pudota seula-aukon läpi ja erotustehokkuus pienenee. (Li *et al.* 2003)

Kallistuskulmaa muuttamalla voidaan vaikuttaa myös seulonnan tarkkuuteen. Kulman kasvaessa seula-aukon pinta-alaprojektio pienenee, mikä tehostaa hienojakoisten partikkeleiden erottumista kiintoainevirrasta. (Wang & Tong 2011; Wills & Napier-Munn 2006)

4.4 Värinä ja kosteus

Kallistuskulman lisäksi seulontaa voidaan tehostaa täryyttämällä seulaa mekaanisesti tai sähköisesti. Värinä estää tehokkaasti partikkelien kerrostumista ja seula-aukkojen tukkeutumista. Mekaaninen ravistelu aiheuttaa myös partikkelien hyppimisen seulalla, jolloin ne irtoavat seulapinnasta ja palaavat takaisin kosketuksiin sen kanssa. Tällöin partikkeleilla on korkeampi mahdollisuus ajautua seula-aukkoihin ja kiintoaineen erottuminen paranee. (Wills & Napier-Munn 2006)

Mekaaninen ravistelu tehostaa partikkelien kulkua seulalla. Värinän voimakkuus ei kuitenkaan saa olla liian suuri, jolloin partikkelien hyppivä liike kasvaa hallitsemattomaksi heikentäen erotustehokkuutta. Värinän voimakkuutta kuvataan yhtälöllä 11, joka laskee värinäliikkeen intensiteetin taajuuden ja amplitudin avulla. (Wills & Napier-Munn 2006)

$$\Gamma = \frac{a(2\pi f)^2}{9{,}81} \qquad (11)$$

jossa Γ värinän intensiteetti ilmoitettuna g-voimina

a värinäaallon amplitudi, m

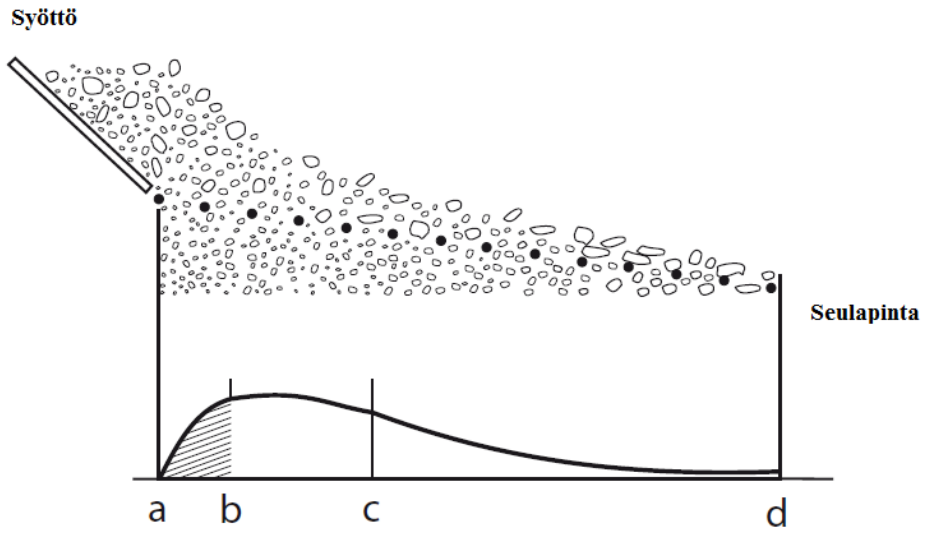
f värinäaallon taajuus, Hz

Värinän intensiteetti valitaan seulottavan aineen partikkelikoon ja seulan aukkokoon mukaan. Suuria partikkeleita seulottaessa värinän amplitudi säädetään suureksi ja taajuus matalaksi. Vastaavasti hienojakoiselle aineelle käytetään matalaa amplitudia ja suurempia taajuusarvoja. Täryseuloilla värinän voimakkuus on yleensä 3-7 G:tä. (Metso Minerals 2006; Wills & Napier-Munn 2006)

Kosteus heikentää materiaalin seulottavuutta. Nihkeät partikkelit paakkuuntuvat helposti ja tukkivat seula-aukot. Tämän vuoksi materiaali kannattaa seuloa täysin märkänä tai kuivana. Kostuttamiseen käytetään yleensä vettä ja vastaavasti seulottavasta materiaalista haihdutetaan kosteutta esimerkiksi lämmitettävien tasojen avulla. (Ortega-Rivas 2012; Wills & Napier-Munn 2006)

4.5 Seulapinnan pituus

Seulapinnan pituus parantaa seulan erotustehokkuutta, sillä mitä pidempään partikkeli on seulapinnalla, sitä suurempi todennäköisyys sillä on läpäistä se (Wills & Napier-Munn 2006). Kuvassa 4 on kuvattu materiaalin virtausnopeutta seulapinnan pituuden funktiona. Alussa partikkelit kerrostuvat ja täyttävät seulapinnan. Seulan loppua kohden partikkelien eteneminen hidastuu ja nopeuskäyrä alkaa lähestyä nollaa kuitenkaan sitä saavuttamatta. Jotta seulalla oleva materiaali erottuisi täydellisesti, seulapinnan tulisi olla äärettömän pitkä. (Metso Minerals 2006)



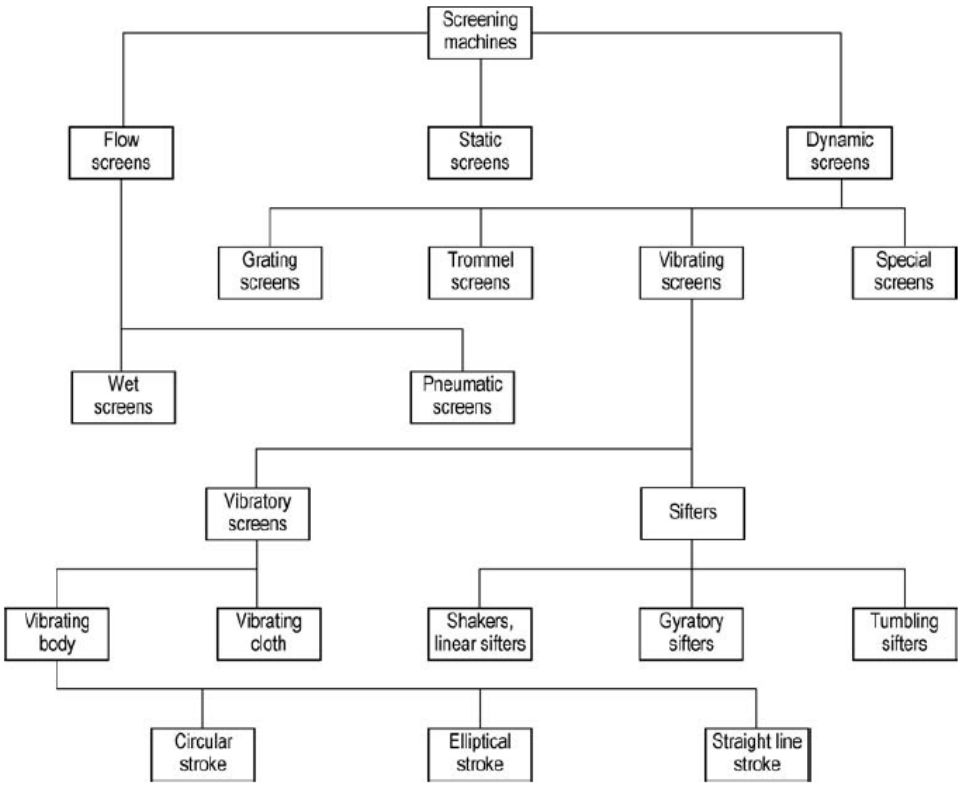
Kuva 4. Materiaalin erottuminen seulapinnan eri osissa mukaillen Metso Minerals Handbookin kuvaa. Kuvan musta käyrä kuvaa materiaalin virtausnopeutta seulapinnan pituuden suhteen. Osassa A-B: materiaalin kerrostuminen syötön jälkeen, B-C: materiaalin virtausnopeus ei kasva (kyllästynyt seulonta), C-D: Kiintoaineen erottuminen toistuvina sykleinä (Metso Minerals 2006)

Teoriaa tukee myös Wang & Tong (2011) tekemä DEM-simulaatio, jossa mallinnettiin seulapinnan pituuden vaikutusta erotustehokkuuteen kaltevalla täryseulalla. Tutkimus osoitti, että seulapinnan pituus on verrannollinen erotustehokkuuteen, kun seulan muut muuttujat (kallistuskulma, taajuus ja amplitudi) on säädetty sopivalle tasolle. Seulapinnan pituuden vaikutus erotustehokkuuteen heikkeni olennaisesti, kun muuttujat olivat liian suuria tai pieniä. (Wang & Tong 2011) Myös Grozubinsky *et al.* (1998) toteavat, että erotustehokkuutta voidaan parantaa vain seulonta-aikaa nostamalla tai seulapinnan pituutta kasvattamalla.

5 Yleisimmät seulatyypit

Seuloja on olemassa yhtä monta kuin on niiden käyttökohteitakin. Teollisuudessa seulamallin valintaan vaikuttavat seulottavan materiaalin ominaisuudet, kuten hienojakoisuus, tiheys, partikkelikoko ja -muoto. Seulan valinnassa on huomioitava myös tarvittava kapasiteetti, erotustehokkuus ja jatkokäsittelymahdollisuudet. Seulalaitteiston koko ja asennustila ovat rajoittavia tekijöitä seulan valinnassa. Lisäksi laitteen valinnassa on huomioitava seulan taloudellisuus. (McGabe *et al.* 1993; Metso Minerals 2006; Rotich *et al.* 2013)

Seulat voidaan luokitella karkeasti kahteen ryhmään: staattisiin ja dynaamisiin seuloihin (kuva 5). Staattisiin seuloihin kuuluvia painovoimaiseen erotteluun perustuvia seuloja on käytetty kauan kiintoaineen erottelussa. Painovoimainen erotus sopii etenkin karkean kiintoaineen käsittelyyn. Usein painovoiman vaikutus ei ole riittävä erottamaan kiintoainetta tehokkaasti, jolloin käytetään täryseuloja. Dynaamiseen liikkeeseen perustuvia täryseuloja käytetään myös hienojakoisen kiintoaineen erottelussa. (McGabe *et al.* 1993; Rotich *et al.* 2013)



Kuva 5. Kaaviokuva ominaisuuksiensa mukaan jaotelluista seuloista (Schmidt 2000)

Perinteisten seulamallien lisäksi seulalaitteistoja voidaan kehittää käyttökohteen mukaan muista luokittimista, kuten kartiolaskeuttimista. Tämän työn kirjallisuus-osassa on kuitenkin esitelty vain muutamia yleisimmin teollisuudessa käytettyjä seulamalleja.

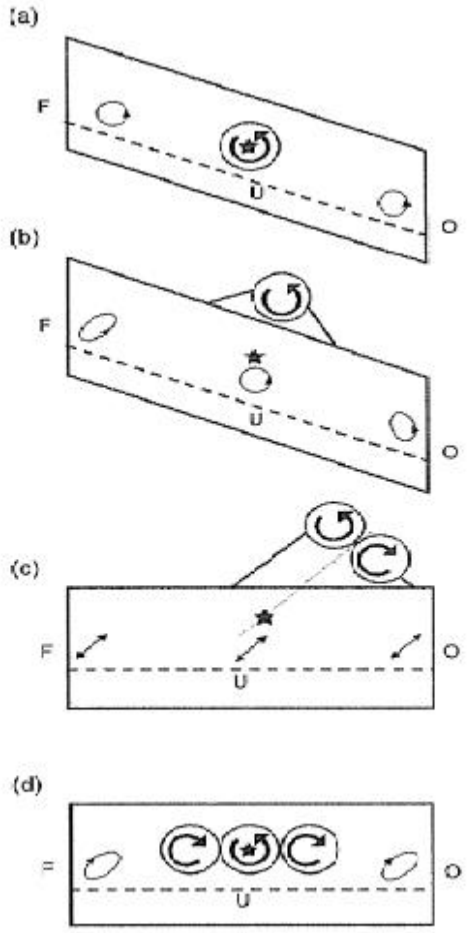
5.1 Täryseulat

Täryseulat ja niiden sovellutukset ovat yleisimmin teollisuudessa käytettyjä seuloja. Täryseulan avulla voidaan seuloa partikkeleita, joiden kokoskaala on 45 µm:n - 300 mm:n välillä. Teollisuudessa täryseulojen käyttökohteita ovat luokittelu, esiseulonta ja vedenpoisto. Kaivosteollisuudessa täryseuloilla luokitellaan materiaaleja tiettyyn tuotekokoon. Täryseuloja käytetään myös märkä- ja kuivaseulonnassa. (Wills & Napier-Munn 2006; Kuopanportti 2013)

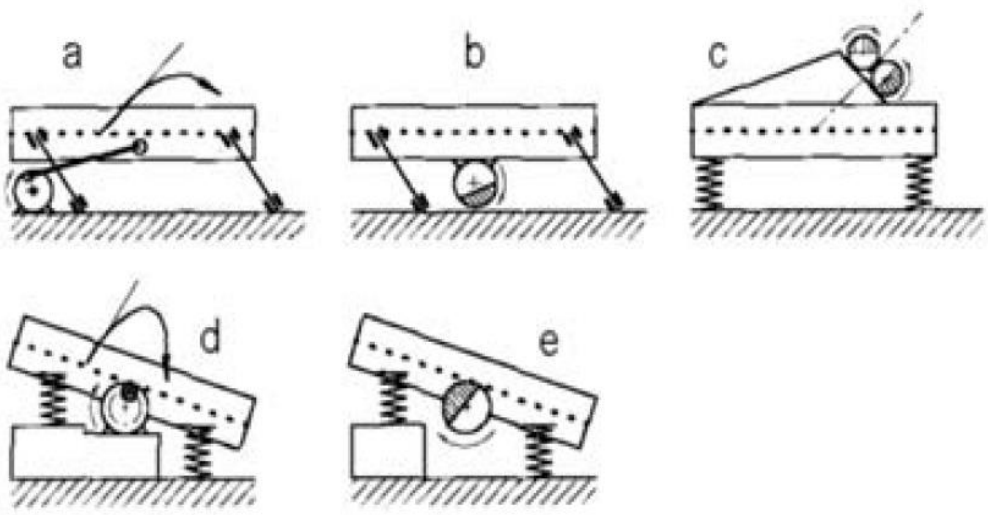
Seulat voivat olla yksi tai useampi tasoisia. Seulottavasta materiaalista riippuen värinäaallon amplitudi ja taajuus voidaan säätää sopivaksi, jotta saavutettaisiin mahdollisimman hyvä erotustehokkuus. Täryseulan värinä aiheutetaan sähköisesti tai mekaanisesti ravistelemalla seulaa taajuudella 1800 - 3600 värinää minuutissa. (McGabe *et al.* 1993; Kuopanportti 2013; Wills & Napier-Munn 2006)

Täryseulat voidaan luokitella liikeratansa mukaan lineaarisesti, ympyrä- tai elliptisellä liikkeellä väriseviin seuloihin. Seulat luokitellaan myös kuljetinhihnan pyörimissuunnan mukaan. (Schmidt 2000, Wills & Napier-Munn 2006)

Kuvissa 6a, 6b, 7d ja 7e seulat värisevät ympyräliikeradalla tai elliptisesti. Kuvassa 6a kaltevan seulan painopiste ja pyörivä epäkesko on asetettu seulan keskipisteeseen samalle akselille. Seulan liikerata on siten ympyrä painopisteensä ympäri. (Wills & Napier-Munn 2006) Vastaava tilanne on kuvattu kuvassa 7d, jossa seulan hihnapyörä on tasapainotettu seulan painopisteeseen ja samaan aikaan seula on kallistettu. (Schmidt 2000)



Kuva 6. Täryseulojen liikeradat (Wills & Napier-Munn 2006)



Kuva 7. Täryseulojen liikeradat (Schmidt 2000)

Kuvassa 6b epäkesko on asetettu seulan painopisteen yläpuolelle, mutta vastaavasti se voidaan asentaa myös painopisteen alapuolelle. Seulan liikerata on elliptinen seulan syöttö- ja loppupäässä. Keskiosassa seulan värinäliikerata on ympyrän muotoinen. Syöttöpäässä elliptinen liike vähentää partikkeleiden kerrostumista ja parantaa hienojakoisen materiaalin seuloutumista. Täryseulan keskiosassa ja loppupäässä materiaalin eteneminen seulalla hidastuu, mikä parantaa lähellä seula-aukon kokoa olevien partikkeleiden seulanläpäisevyyttä. (Wills & Napier-Munn 2006) Kuvassa 7e seulan hihnavetopyörä ei ole tasapainotettu, minkä seurauksena seulan värinäliikerata noudattaa ympyräliikerataa (Schmidt 2000).

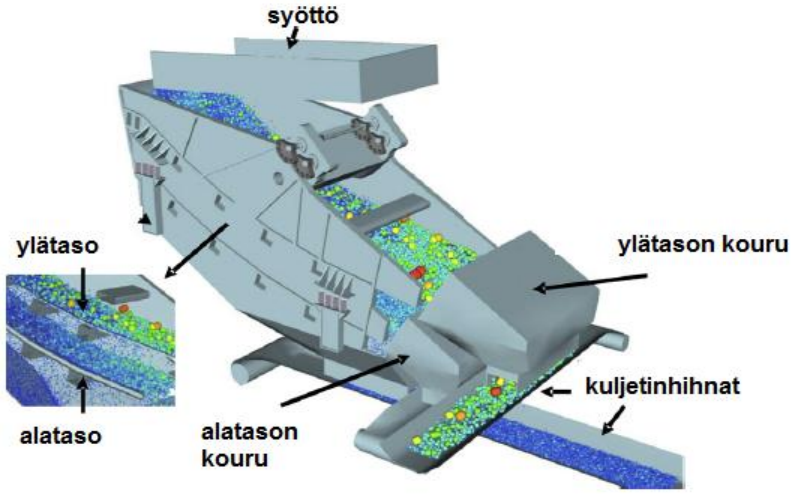
Elliptisesti värisevä seula on esitetty kuvassa 6d. Seulalla on kolme epäkeskoa, jotka saavat aikaan elliptisen liikeradan. Epäkeskot on asetettu rinnakkain samalle akselille, mikä tehostaa sekoitusta. (Wills & Napier-Munn 2006)

Kuvassa 6c ja 7c esitettyjen seulojen liikerata on lineaarinen, mikä johtuu vastakkaisiin suuntiin pyörivistä epäkeskoista. Tällainen liikerata on tyypillinen monitasoisille seuloille, kuten banaani- ja horisontaaleille tasoseuloille. Myös kuvien 7a ja b seulat ovat lineaarisesti väriseviä seuloja, jotka on varusteltu lehtijousilla tai vipuvarsilla. (Schmidt 2000, Wills & Napier-Munn 2006)

5.1.1 Banaaniseulat

Banaaniseula, jonka nimi on peräisin seulan kaarevasta muodosta, on teollisuudessa yleisesti käytetty seula. Etenkin kaivosteollisuus hyödyntää seulaa malmin, kuten raudan ja hiilen, erottelussa sen hyvän erotustehokkuuden ja kapasiteetin vuoksi. Metsäteollisuudessa banaaniseuloja käytetään keskikokoisen ja hienojakoisen kiintoaineen luokitteluun. Kooltaan eroteltavat partikkelit voivat olla 2 - 50 mm:ä tai 50 - 100 mm:ä. Tavallisiin täryseuloihin verrattuna banaaniseulojen kapasiteetit ovat jopa kolme tai neljä kertaa suurempia. (Cleary *et al.* 2009; Dong *et al.* 2009; Liu 2009; Metso Minerals 2006; Wills & Napier-Munn 2006) Metso Minerals -käsikirjan (2006) mukaan banaaniseuloilla käsiteltävät kiintoainemäärät vaihtelevat välillä 100 - 800 m^3/h:ssa.

Banaaniseulan kaareva muoto edesauttaa virtauksen säilymistä vakiona koko seulonnan ajan. Seula rakentuu yleensä kahdesta tai useammasta tasosta, joiden lävitse kuiva tai märkä kiintoaine lajitellaan yli- ja alikokoon. (Fernandez *et al.* 2011) Banaaniseulan tasot valmistetaan yleensä teräksestä tai polyuretaanista. Seulalevyt voivat olla rei'itetty erimuotoisin aukoin, mutta tyypillisiä muotoja ovat neliö tai suorakaide. (Cleary *et al.* 2009; Dong *et al.* 2009; Fernandez *et al.* 2011; Liu 2009) Kaksitasoisen banaaniseulan rakenne on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Fernandez *et al.* (2011) kuvaa mukaillen: kaksitasoisen banaaniseulan rakenne. Seula koostuu ylä- ja alatasosta sekä kuljetinhihnoista, jotka kuljettavat tasoilta kerätyt ali- ja ylikoon partikkelit jatkokäsittelyyn.

Banaaniseulassa seulottava aine syötetään seulan ylempään syöttöpäähän, josta se valuu ylätason seulalle. Ylätason seula rakentuu erillisistä, esimerkiksi 33 asteen kallistuskulmiin asennetuista levyistä. Alatason levyt on myös kallistettu, mutta kallistuskulma (esimerkiksi 10°) on ylätason levyjä pienempi. Alatason levyt ovat ylätason levyjä tiheämpireikäisiä, jotta alikoon partikkelit saadaan erotettua tarkasti. (Cleary *et al.* 2009; Fernandez *et al.* 2011)

Seulonnan edetessä seula-aukkoja pienemmät partikkelit läpäisevät ylätason ja päätyvät alatasolle. Ylikoon partikkelit ja partikkelit, jotka eivät ole onnistuneet läpäisemään seulaa, jatkavat matkaa seulan loppupäähän. Alatasolta hienojakoinen aine siirtyy alikokoon. Molempien tasojen materiaali kerätään kouruihin, josta se siirretään kuljettimille jatkokäsittelyyn viemistä varten. Yleensä ylikokoiset

materiaalit kuljetetaan seuloilta takaisin murskaimelle jauhatukseen. (Cleary *et al.* 2009; Fernandez *et al.* 2011)

Erotustehokkuuden kannalta seulonnan tärkein osa on banaaniseulan alin taso. Jos alimman tason erotus ei ole riittävä, lopputuotteen saanto laskee ja prosessin kannattavuus heikkenee. (Cleary *et al.* 2009) Banaaniseulan erotustehokkuuteen vaikuttavat materiaalin liian suuri kiihtyvyys ja nopeus seulalla. Liian suuri nopeus estää partikkelin ja seulapinnan välisen vuorovaikutuksen, jolloin partikkelin todennäköisyys läpäistä seula laskee. (Cleary *et al.* 2009; Dong *et al.* 2009)

Materiaalin erottuvuuteen vaikuttaa myös partikkeleiden kerrostuminen, minkä seurauksena suuremmat partikkelit syrjäyttävät pienemmät partikkelit kiintoainevirran pinnalle. Kerrostuminen on voimakasta etenkin banaaniseulan syöttöpäässä, jossa erillinen syöttölaite syöttää kiintoainetta seulalle vastavirtaperiaatteella. (Cleary *et al.* 2009)

Muita partikkelin kulkuun seulalla vaikuttavia tekijöitä ovat värinän amplitudi ja taajuus. Banaaniseuloissa käytetään usein värinän lähteenä lineaarista tärytintä. Dong *et al.* (2009) toteavat tutkimuksessaan, että värinäaallon amplitudin ja taajuuden pienentäminen parantavat partikkelin erottumista. Syynä tähän on partikkelin rauhallisempi liike seulapinnalla. Partikkelien erottumista voidaan myös tehostaa vastapäivään pyörivällä värinäaallon ympyräliikkeellä, lisäämällä banaaniseulaan tasoja ja pienentämällä niiden kallistuskulmaa. (Dong *et al.* 2009; Liu *et al.* 2013; Wills & Napier-Munn 2006) Lisäksi Liu *et al.* (2013) osoittivat tutkimuksessaan yksitasoisella banaaniseulalla, että seulapinnan pituuden lisääminen parantaa seulan erotustehokkuutta.

5.1.2 Rakoseulat, moduuliseulat ja lineaariset täryseulat

Banaaniseulan lisäksi muita täryseuloja ovat rakoseula, moduuliseula ja horisontaali tasoseula. Rakoseulat rakentuvat samansuuntaisista metallitangoista, joiden väliin jäävien rakojen leveys vaihtelee 50 - 300 mm:n välillä. Tangoissa käytetty metalli on mangaaniterästä. Leveiden rakojen vuoksi seulaa käytetään erityisesti karkeiden materiaalien, kuten murskaimelta tulleen malmin, erottamisessa. Kooltaan seulottavat partikkelit ovat suurempia kuin 25 mm:ä. Yleensä seulottavan

kiintoaineen partikkelikoko on 100 - 250 mm:ä. Seulan tukkeutumisen estämiseksi rakoseulan tangot on muotoiltu kartiomaisiksi, jolloin tangon muoto kapenee seulan loppupäätä kohden parantaen hienojakoisen aineen seulanläpäisyä. (Kuopanportti 2013; McGabe *et al.* 1993; Metso Minerals 2006; Ortega-Rivas 2012; Wills & Napier-Munn 2006)

Rakoseulat voivat olla asetettu tasoon tai enintään 60°:een kallistuskulmaan. Usein käytetty kallistuskulma rakoseuloilla on 20°:tta. Erotustehokkuutta voidaan parantaa värinällä, joka on usein ympyräliikettä. Rakoseulojen käyttökapasiteetti voi vaihdella 150 - 3000 m^3/h välillä. Suurimmilla rakoseuloilla kapasiteetti voi olla jopa 5000 tonnia kiintoainetta päivässä. (McGabe *et al.* 1993; Metso Minerals 2006; Ortega-Rivas 2012; Wills & Napier-Munn 2006)

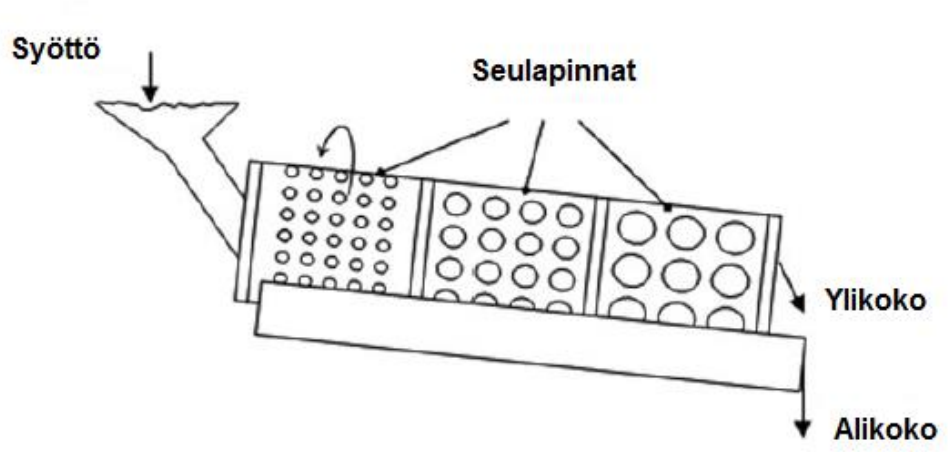
Moduuliseulat rakentuvat yhteen liitetyistä paloista eli moduuleista, joista jokaisella voi olla eri kallistuskulma ja erilainen seulapinta. Niiden rakenne muistuttaa läheisesti banaaniseulaa, sillä ne voidaan asettaa tasoihin ja varustaa tärinällä. Moduuliseula on rakenteeltaan kevyt ja joustava. Moduulien ansiosta seulonta-olosuhteita on mahdollista säätää prosessista riippuen, mikä lisää seulan turvallisuutta ja taloudellisuutta. (Metso Minerals 2006; Wills & Napier-Munn 2006)

Tasoseula on asetettu nimensä mukaisesti horisontaalisesti tasoon. Seulan seulontaprosessia tehostetaan täryyttämällä lineaarisesti tai elliptisesti. Lisäksi seulonnassa voidaan hyödyntää seulan resonoivaa rakennetta, jolloin seulan energiatehokkuus paranee. Tasoseulojen kapasiteetti on pienempi kuin muilla seuloilla, minkä seurauksena niitä käytetään tarkkaa luokittelua ja erotustehokkuutta vaativiin seulontoihin. (Metso Minerals 2006; Wills & Napier-Munn 2006)

5.3 Trommel – seula

Trommel-seulaa on yleisesti käytetty kokoerotteluun ja luokitteluun. Seulan käyttökohteita ovat olleet esimerkiksi soran pesu ja roskien erottelu uusiomassalaitoksilla (Schmidt 2012). Trommel-seula rakentuu sylinterimäisestä rummusta, jonka pinnat ovat seulapintoja. Tavallisesti seularumpu on asetettu matalaan kallistuskulmaan (2-5°) erottumisen parantamiseksi. Seulottava materiaali syötetään rummun yläpäähän. Rumpu pyörii hitaasti vaaka-akselinsa ympäri, jolloin hienojakoi-

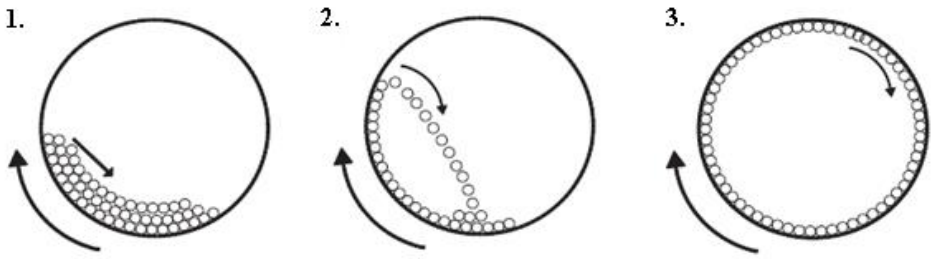
nen materiaali valuu alas rummun pituussuuntaa pitkin ja läpäisee seula-aukot pyörimisliikkeen seurauksena. Karkea ylikoon aines kulkeutuu rummun läpi jatkokäsittelyyn. Kuten muissakin seuloissa, trommel-seulan aukkokoko kasvaa seulan loppupäätä kohden. (Chen *et al.* 2010; Coulson & Richardson 1991) Trommel-seulan periaatekuva on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Trommel-seulan periaate kuva. (Ortega-Rivas 2012)

Trommel -seulan erotustehokkuuteen voidaan vaikuttaa säätämällä rummun pyörimisnopeutta. Yleisesti käytetty pyörimisnopeus on noin 1/3 - 1/2 seulan kriittisestä pyörimisnopeudesta (Coulson & Richardson 1991). Chen *et al.* (2010) tutkimuksessa kuvataan eri nopeuksien vaikutusta seulottavan materiaalin liikkeeseen pyörivässä rummussa (kuva 10). Kun pyörimisliike on hidas, seulottava kiintoaine pysyy kerrostuneena seularummun pinnalla ja vierii laitteen liikkeen mukana. Tällöin kiintoainekerrostuman pinnalla olevat hienojakoiset partikkelit eivät pääse kulkeutumaan seulapinnan aukkojen läpi ja seulan erotustehokkuus pienenee.

Nopeuden kasvaessa osa seulottavasta aineesta irtoaa sylinterin pinnalta, minkä seurauksena aineen virtaus seulassa muuttuu turbulenttiseksi, mikä puolestaan parantaa erotustehokkuutta. Jos pyörimisnopeus kiihtyy liian suureksi, pyörimisliikkeestä johtuva keskipakoisvoima aiheuttaa materiaalin adheesion sylinterin pinnalle. Ilmiö on sama kuin linkouksessa. Liian suuri nopeus heikentää aineen erottumista ja vaikuttaa siten erotustehokkuuteen.

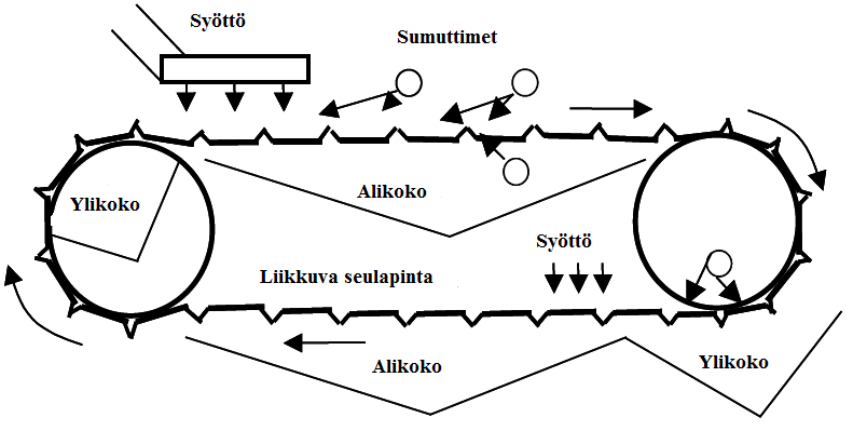


Kuva 10. Chen *et al*. (2010) tutkimuksen kuvaa mukaillen Trommel-seulan pyörimisnopeuden muutoksen vaikutus seulottavan materiaalin liikkeeseen rummussa: 1. Hitaalla pyörimisnopeudella materiaali kerrostuu ja alkaa vieriä; 2. Nopeuden kasvaessa osa materiaalista irtoaa rummun seinältä; 3. Korkealla nopeudella materiaali alkaa linkoutua keskipakoisvoiman vaikutuksesta.

Trommel-seulojen etuina ovat yksinkertaisuus ja taloudellisuus, sillä seulan käyttö ei vaadi suuria ylläpitokustannuksia muihin seuloihin verrattuna. Lisäksi seulontaolosuhteita voidaan helposti säätää muuttamalla pyörimisnopeutta ja rummun kallistuskulmaa. Seulan pyörimisliike estää myös aineen paakkuuntumista ja mahdollistaa erikokoisten partikkeleiden käsittelyn. Erotustehokkuuteen voidaan vaikuttaa pidentämällä rumpua pituussuunnassa. (Chen *et al.* 2010) Trommel-seulan kapasiteettia rajoittaa pieni seulontapinta-ala, sillä pyörimisliikkeen aikana vain murto-osa seulan pinta-alasta voidaan hyödyntää (Coulson & Richardson 1991).

5.4 Pansep-seula

Pansep-seulan erotusprosessi perustuu painovoimaiseen erotteluun. Seulapinta on rakennettu yhteen liitetyistä paloista, jotka muodostavat telojen ympäri kulkevan kuljetinhihnan. Kuvassa 11 esitetyssä Pansep-seulan periaatekuvassa kiintoainetta seulotaan kahdessa tasossa: kuljettimen ylä- ja alaosassa, mikä lisää seulan kapasiteettia. (Mohanty 2003; Wills & Napier-Munn 2006)



Kuva 11. Mohantyn (2003) kuvaa mukaillen: Pansep-seulan periaatekuva

Seulottava kiintoaine putoaa syöttölaitteesta painovoiman vaikutuksesta liikkuvalle seulapinnalle, minkä jälkeen se alkaa liikkua kuljetinhihnan mukana. Seulahihnan molemmin puolin on asennettu kostutinlaitteistoja, jotka sumuttavat vettä kiintoaineen päälle. Kostuttaminen lisää partikkelien liettymistä ja kerrostumista, jolloin materiaalin seulanläpäisy helpottuu. Seulan tukkeutumisen vähentämiseksi seula-aukot ovat muodoltaan suorakulmaisia. (Mohanty 2003; Wills & Napier-Munn 2006)

Seulonnan aikana alikoon partikkelit läpäisevät ylemmän hihnan ja päätyvät uudelleen seulottavaksi alemmalle hihnalle. Seulonnan jälkeen hienojakoinen alikoon liete kerätään seulan alapuolella oleviin keräimiin. Ylikoon liete seuloutuu hihnalta seulan päissä oleviin keräimiin. (Mohanty 2003; Wills & Napier-Munn 2006)

Rakenteensa ansiosta Pansep-seulat soveltuvat erityisesti hienojakoisen materiaalin märkäseulontaan. Seulottavien partikkelien koko voi vaihdella 45 - 600 µm:n välillä. Tyypillisiä Pansep-seulojen käyttökohteita teollisuudessa ovat hienojakoisen hiilen talteenotto ja karkean materiaalin erottaminen hydrosyklonin ylitteestä jauhatuspiirissä. (Mohanty 2003; Wills & Napier-Munn 2006)

5.5 Kaariseulat

Kaariseuloja käytetään hiilen märkäseulonnassa. Seulan kaarimainen muoto soveltuu hyvin hienojakoisen aineen seulontaan ja veden poistoon kiintoaineesta. Kuvassa 12 on esitetty kaariseulan periaatekuva.

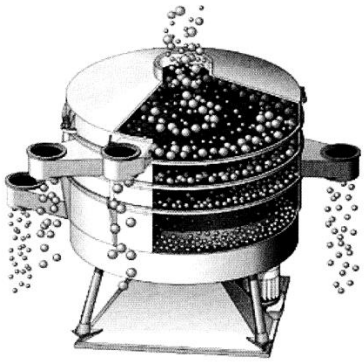
Kuva 12. Kaariseulan periaate kuva mukaillen Dong & Yu (2012) simulaation kuvaa

Seulottava kiintoaineliete syötetään seulan yläpäähän, josta se valuu painovoiman vaikutuksesta alas. Samaan aikaan lietettä kastellaan seulan yläosasta käsin, jolloin kiintoaineen seulanläpäisykyky paranee. Kaariseula muodostuu yleensä polyuretaanipaneeleista ja virtauksen suhteen kohtisuorassa olevista viiroista. Kun liete valuu pitkin seulapintaa, viirat erottavat bulkkivirrasta ohuita kerroksia alitteeseen. Viiran koko määrittelee erotettavan kiintoaineen katkaisukoon. Kaariseuloilla voidaan erottaa kooltaan 50 µm:n partikkeleita ja käsitellä 180 m^3/h lietettä. (Dong & Yu 2012; Jhonson screens 2013; Wills & Napier-Munn 2006)

5.6 Pyöröseulat

Pyöröseulojen toimintamekanismi perustuu pyörivään ja pystysuuntaiseen liikkeeseen. Niitä käytetään märän tai kuivan kiintoaineen hienoseulonnassa, jolloin niillä voidaan erottaa halkaisijaltaan 40 µm:n partikkeleita. (Schmidt 2000; Wills & Napier-Munn 2006)

Tavallisesti pyöröseula koostuu toistensa päälle asetetuista ympyrän muotoisista seuloista, jotka voivat olla halkaisijaltaan 2,7 metriä. Seula on asetettu tasolle jousien varaan. Ympyrä- ja pystysuuntainen liike saadaan aikaan tason alla olevalla moottorilla. (Wills & Napier-Munn 2006) Erisuuntiin tapahtuvan liikkeen seurauksena alitteet ajautuvat ympyrän muotoisen seulan ulkoreunalle ja tulevat tangentiaalisesti ulos seulasta. (Schmidt 2000) Kuvassa 13 materiaali syötetään pyöröseulalle laitteen päältä ja seula-aukkojen koot pienevät seulan pohjalle edettäessä. (Wills & Napier-Munn 2006)



Kuva 13. Pyöröseulan periaatekuva (Wills & Napier-Munn 2006)

Liikkeensä vuoksi pyöröseulat eivät tukkeudu helposti, eikä partikkeleiden muodolla ole yhtä suurta vaikutusta seulottavuuteen kuin muilla seuloilla. Pitkät ja litteät partikkelit, jotka eivät läpäise seulaa helposti, suuntautuvat seulalla horisontaalisesti. Tämän seurauksena seulan tukkeutuminen vähenee. Lisäksi pyöröseuloissa voidaan käyttää tukkeutumisen estämiseksi ultraäänilaitteita ja pallokouruja. (Schmidt 2000; Wills & Napier-Munn 2006)

Pyöröseulan toimivuuden kannalta on tärkeää huomioida, että materiaalin virtaus seulalla ja pystysuuntainen paine ovat vakioita sekä materiaalikerros säilyy riittävän paksuna. Jos materiaalikerros ohenee liikaa, partikkelien liike häiriintyy ja ne alkavat hyppiä seulalla. Seulontaa voidaan parantaa säätelemällä syöttöaikaa ylimmällä seulalla ja asettamalla värinäaallon amplitudi korkeaksi sekä taajuus matalaksi. Lisäksi seulontaan voidaan vaikuttaa säätämällä seulan kallistuskulmaa ja pyörimisnopeutta. (Schmidt 2000)

II Kokeellinen osa

6 Työn tarkoitus

Tässä työssä mallinnettiin käytännön kokein Rotich *et al.* (2013) simulaatiossa käytettyä Reichertin kartioseulaa ja määritettiin sen erotustehokkuus kolmella eri kallistuskulmalla. Lisäksi selvitettiin seulan erotustehokkuuden kannalta optimaalinen kallistuskulma ja massapanos.

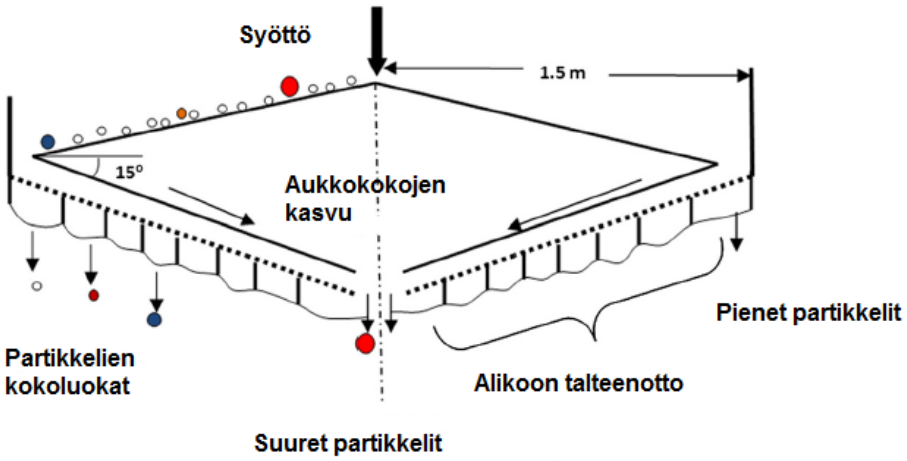
7 Työn taustaa - Reichertin kartioseula

Alun perin Reichertin kartio on ollut painovoimalaskeutin, jota on käytetty suurien kiintoainemäärien erottamiseen (Richards & Palmer 1997; Rotich *et al.* 2013; Wills & Napier-Munn 2006). Menetelmää on käytetty 1960-luvulta lähtien kaivosteollisuudessa malmien talteenottoon (Richards & Palmer 1997).

Laskeutin rakentuu useista päällekkäin asetetuista kartionmuotoisista osista, joissa ei ole liikkuvia osia. Partikkelit erottuvat vapaasti laskeutumalla painovoiman vaikutuksesta. Kun materiaali syötetään kartiotornin huipulle, se alkaa virrata kohti laskeuttimen keskustaa. Virtaus aiheuttaa kartion pinnalle partikkelien kerrostuman, jossa hienojakoiset hiukkaset ovat sijoittuneet lähelle erottimen pintaa. Virtauksen pohjalla olevat partikkelit päätyvät lopulta kartiotornin pohjalle, josta ne ohjataan keskellä olevaan kuiluun. (Richards & Palmer 1997; Wills & Napier-Munn 2006)

Erotusmenetelmänä Reichertin kartio ei ole tehokas, minkä vuoksi huonoa erotustehokkuutta parannetaan kierrättämällä prosessia. Laskeuttimella käsiteltävät kapasiteetit ovat suuria, jopa 50 - 90 tonnia kiintoainetta tunnissa. Reichertin kartiolla käsiteltävät partikkelit ovat halkaisijaltaan alle 2 mm:ä. Prosessin alitteen partikkelit voivat puolestaan olla halkaisijaltaan 30 µm:ä. (Richards & Palmer 1997)

Rotich *et al.* (2013) mallinsivat Reichertin kartiosta kehitettyä seulaa ja tutkivat sen soveltuvuutta kuivan kiintoaineen erotteluun. Reichertin kartioseulan erotusperiaate perustuu alkuperäiseen kartioon, ja sitä käytetään kiinteiden aineiden erottamiseen painovoiman avulla. Kartioseulan alapinnat on rakennettu pyöreäaukkoisista seulapinnoista, joiden aukkokoko kasvaa seulan keskustaa kohti. Kiintoaine syötetään seulalle kartion huipulta, minkä jälkeen materiaali virtaa alas seulapintaa pitkin ja alikokoiset partikkelit läpäisevät seula-aukot. Kuten Reichertin laskeuttimella, ylikokoinen kiintoaine ohjautuu kartion keskellä olevaan kuiluun, josta se kerätään talteen. (Rotich *et al.* 2013) Kuvassa 14 on esitetty kartioseulan periaatekuva.



Kuva 14. Reichertin kartioseulan periaatekuva mukaillen Rotich *et al.* (2013) simulaatioseulan kuvaa

Rotich *et al.* (2013) mukaan kartioseulan erotustehokkuus on 60 %:a. Samoin kuin esikuvallaan Reichertin kartiolla, seulan erotustehokkuus jää alhaiseksi. Erotustehokkuuden parantamiseksi seula on kallistettu 15 asteen kallistuskulmaan. Lisäksi seulapinnan aukot ovat 60 asteen kulmassa suhteessa toisiinsa, mikä parantaa partikkelien todennäköisyyttä läpäistä seula. (Rotich *et al.* 2013)

7 Koelaitteisto ja mittausten suoritus

Mittauksissa käytettiin painovoimaiseen erotteluun perustuvaa seulaa, jonka taso kuvaa yhtä Reichertin kartioseulan seulapintaa. Koelaitteisto on esitetty kuvassa 15. Seulan kallistuskulmaa säädettiin jalkojen korkeutta säätämällä. Mittaukset tehtiin kolmessa eri kallistuskulmassa: 10, 12,5 ja 15°:ssa. Teräksestä valmistetun seulalevyn pinta-ala oli 0,14 m^2:ä (443 mm x 320 mm), ja se oli jaettu neljään 100 mm:n levyiseen pyöreillä aukoilla rei'itettyyn osaan. Pyöreiden seula-aukkojen koot olivat 1, 2, 3, 4 mm:ä. Seulan aukkokoko kasvoi korkeammasta eli syöttöpäästä matalampaan päähän. Jokaisen erottelualueen alle oli asennettu keräyslaatikot, jotta erottunut kiintoaine voitiin punnita tietojen keräämistä ja erotustehokkuuden määrittämistä varten. Ylikokoiset ja seulapinnan läpi erottumattomana kulkeutunut kiintoaine kerättiin seulan loppupäähän asetettuun laatikkoon.

Kuva 15. Seulan erotustehokkuuden määrittämisessä käytetty painovoimaiseen erottumiseen perustuva seula. Yli- ja alikokoiset partikkelit kerättiin seulan alle ja loppupäähän asetettuihin laatikoihin.

Seulottavana kiintoaineena käytettiin lasihelmiä, joiden koot olivat: 0,75, 1, 2 ja 3 mm:ä. Helmistä valmistettiin seos, jossa jokaista kokoa oli massatilavuudeltaan saman verran. Alkuperäisen seoksen syöttöastiasta punnittiin käsin satunnaisotolla massapanos 10 g:sta 160 g:aan 10 gramman välein, minkä jälkeen massapanos asetettiin tasaisesti seulan syöttöalueelle. Helmien vierimisen estämiseksi seula-alueen eteen asetettiin styroksista valmistettu virtauksenestolevy. Koe suoritettiin siten, että massapanos vapautettiin vierimään seulalle poistamalla virtauksenesto-levy. Samaan aikaan aloitettiin käsiajanmittaus sekuntikellon avulla. Ajanmittaus lopetettiin, kun viimeiset lasihelmet poistuivat seulalta ylikokolaatikkoon. Kokei-den jälkeen punnittiin alikoko- ja ylikokolaatikoihin kerätyt massat ana-lyysivaa'alla. Koe toistettiin jokaisella massapanoksella neljästi mittausvirheen pienentämiseksi.

Aluksi seulan syöttöalue oli pinnoitettu ilmastointiteipillä, mutta teipin tahmea muovinen pinta aiheutti lasihelmien juuttumista syöttöalueelle. Ongelma korjattiin ensimmäisten mittausten jälkeen asentamalla seulan lähtöalueelle teräslevy, joka vähensi kitkaa lasihelmien ja pinnan välillä. Tämän ansiosta helmet liukuivat ta-saisesti seulapinnalla.

8 Mittaustulosten käsittely ja tulokset

Seulonnan rinnakkaisista mittaustuloksista laskettiin keskiarvot, minkä jälkeen arvoista määritettiin laskennallisesti seulalle syötettyjen lasihelmien alikoon ja ylikoon kokonaismassa. Lisäksi laskettiin seulan erotustehokkuus ja lasihelmien vierintänopeudet sekä kiihtyvyydet. Tuloksista määritettiin myös massaosuudet seulan eri kallistuskulmissa. Kokeellisen osan eri parametrien matemaattinen määritys perustuu Rotich *et al.* (2013) pyöreän kappaleen liikkeen mallinnukseen seulapinnalla ja tutkimuksessa käytettyihin yhtälöihin.

Seulan erotustehokkuudet laskettiin jokaiselle massapanokselle eri kallistuskul-missa alikoon massan ja kokonaismassan suhteena. Erotustehokkuuden yhtälö on esitetty yhtälössä 12.

$$\eta = \frac{1-(M_O-M)}{M_T} \cdot 100\% = \frac{M_U}{M_T} \cdot 100\% \quad (12)$$

jossa η seulan erotustehokkuus, %

M_U alikoon kokonaismassa, g

M_T syötön massapanos, g

M_O ylikoon kokonaismassa, g

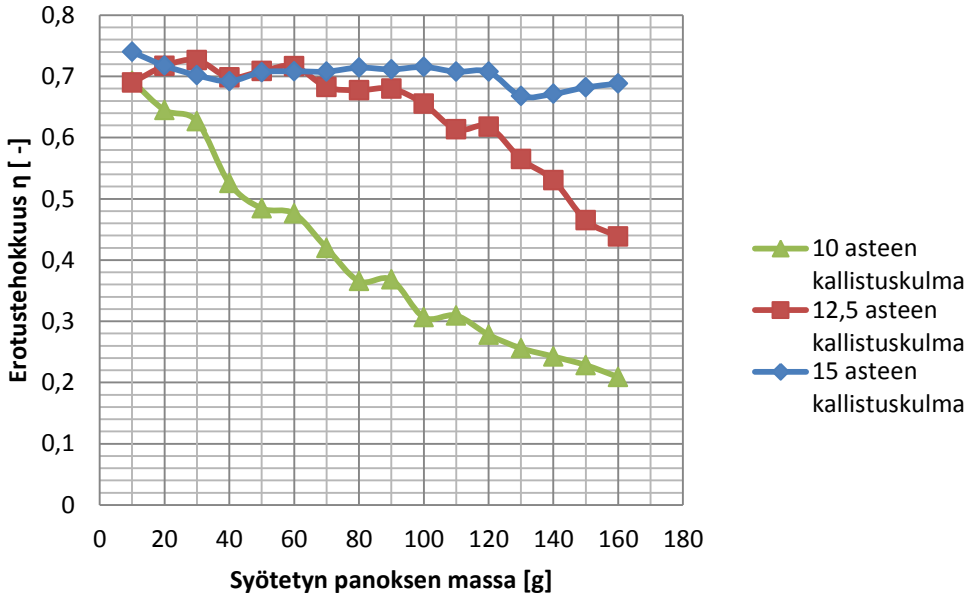
M seulaan tarttuneiden tai hukkaan joutuneiden helmien massa, g

Taulukossa II on esitetty seulan erotustehokkuudet prosentteina 10, 12,5 ja 15 asteen kallistuskulmissa.

Taulukko II Seulan erotustehokkuudet 10, 12,5, 15 asteen kallistuskulmassa

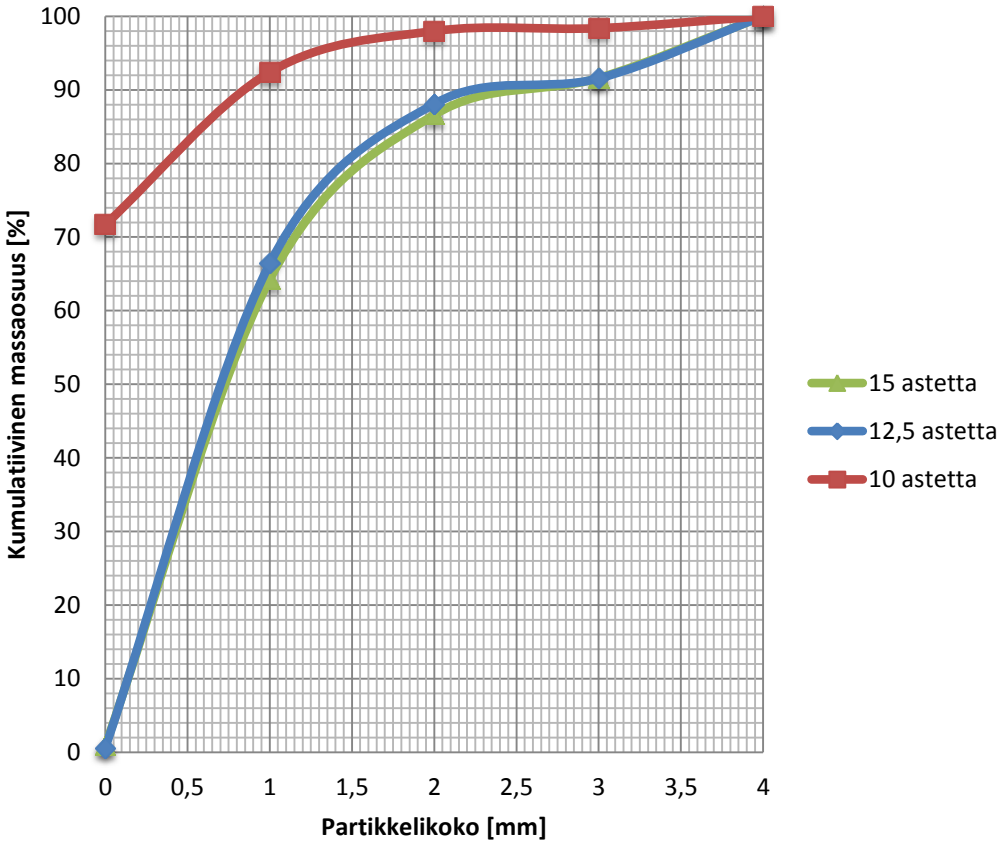
Syötön massa-panos M_T [g]	**Erotustehokkuus η 10° kallistuskul-massa [%]**	**Erotustehokkuus η 12,5° kallistus-kulmassa [%]**	**Erotustehokkuus η 15° kallistuskul-massa [%]**
10	69,3	69,0	74,0
20	64,5	71,7	71,8
30	62,7	72,7	70,2
40	52,6	69,8	69,2
50	48,5	70,9	70,7
60	47,6	71,7	70,8
70	42,0	68,3	70,8
80	36,6	67,7	71,4
90	36,8	68,0	71,1
100	30,7	65,5	71,6
110	30,9	61,3	70,8
120	27,8	61,8	70,8
130	25,6	56,5	66,8
140	24,3	53,0	67,1
150	22,8	46,5	68,2
160	20,9	43,8	68,8
Keskiarvo KA	**40,2**	**63,6**	**70,3**

Taulukon II erotustehokkuuden arvoista on laskettu jokaiselle kallistuskulmalle keskiarvo. Näin ollen seulan erotustehokkuuden keskiarvoksi saadaan järjestyksessä pienimmästä kulmasta suurimpaan: 40,2 %, 63,6 % ja 70,3 %:a. Taulukon II tulokset on esitetty kuvassa 16. Erotustehokkuus säilyy 12,5 ja 15 asteen kallistuskulmilla tasaisena alle 80 gramman massapanoksilla. Tämän jälkeen erotustehokkuus alkaa laskea molemmilla kulmilla. 10 asteen kallistuskulman erotustehokkuuden arvot poikkeavat suuremmista kulmista ja laskevat tasaisesti koko mittauksen ajan.



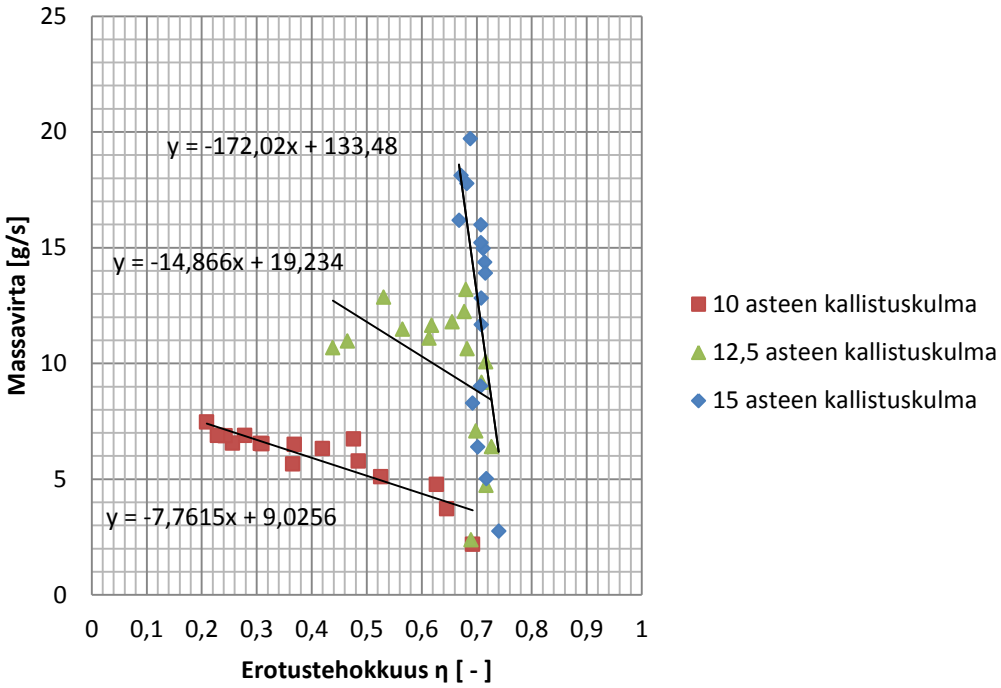
Kuva 16. Seulan erotustehokkuuden muutos massapanoksen kasvaessa 10 grammasta 160 grammaan.

Mittaustuloksista laadittiin kumulatiiviset massaosuudet suhteessa syöttöön, jotka on esitetty kuvassa 17. Massaosuuskäyristä saadaan määritettyä seulan mediaanikoko D_{50} eri kallistuskulmissa. Mediaanilla tarkoitetaan kumulatiivisen jakauman 50 %:n massaosuutta, jota pienempiä ja suurempia alikokoisia partikkeleita on puolet jakaumasta. 10 asteen kallistuskulmalle ei tulosten hajonnan vuoksi voitu määrittää todellista mediaanikokoa. 15 ja 12,5 asteen kallistuskulmissa seulan mediaani on kuvaajasta luettuna 0,70 mm:ä.



Kuva 17. Alikoon massoista lasketut kumulatiiviset massaosuudet kallistuskulmille 10, 12,5 ja 15 astetta

Lasihelmien massavirran vaikutusta seulan erotustehokkuuteen on kuvattu kuvassa 18. Erotustehokkuus pienenee massavirran kasvaessa. Muutos on suurin 15 asteen kallistuskulmalla. 12,5 asteen kallistuskulman tuloksissa on hajontaa, mikä viittaa poikkeamaan mittaustuloksissa. 10 asteen kulmalla muutos on hitaampi, mutta samansuuntainen kuin 15 asteen kulmalla.



Kuva 18. Lasihelmien massavirran vaikutus seulan erotustehokkuuteen kallistuskulmissa 10, 12,5 ja 15 astetta.

Lasihelmien nopeus seulapinnalla on määritetty Rotich *et al.* (2014) yhtälön perusteella. Yhtälö perustuu Newtonin II lakiin ja Galilean suhteellisuus teoriaan.

$$\bar{v}(t) = v_0 + \frac{g(t-t_0)\left(\sin\theta - \sin\theta \cdot \ln\left(\frac{m_i(t)}{M_T}\right) - \mu\cos\theta\right)}{1-\ln\left(\frac{m_i(t)}{M_T}\right)} \quad (13)$$

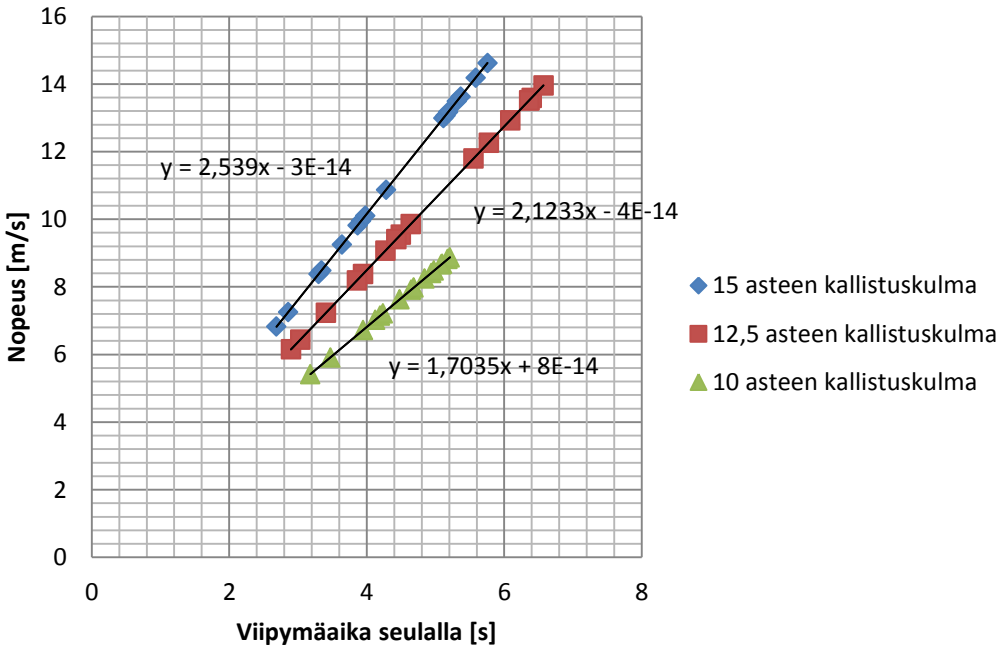
jossa

$m_i(t)$	ylikoon massa ajan hetkellä t, g
M_T	alkuperäinen massapanos, g
v_0	alkunopeus, m/s
g	painovoimakiihtyvyys, m/s^2
t	viipymäaika seulapinnalla, s
t_0	aika kokeen alussa, s
μ	kitkakerroin, -
θ	seulan kallistuskulma, rad

Lasihelmien nopeuksia laskettaessa yhtälön 13 avulla alkunopeus v_0 ja aika t_0 oletetaan nollaksi. Ideaalisten lasihelmien oletetaan liikkuvan pinnalla kitkattomasti, joten kitkakerroin μ oletetaan nollaksi. Lopulta yhtälö 13 sievenee muotoon:

$$\bar{v}(t) = \frac{g \cdot t \cdot \left[\sin\theta - \sin\theta \cdot \ln\left(\frac{m_i(t)}{M_T}\right)\right]}{1 - \ln\left(\frac{m_i(t)}{M_T}\right)} \tag{14}$$

Kuvassa 19 on esitetty lasihelmien kiihtyvyyden muutos ajan funktiona. Kuvasta 19 havaitaan, että kiihtyvyys seulapinnalla pysyy vakiona kaikilla kolmella kallistuskulmalla. Nopeus kasvaa tasaisesti ajan funktiona, jolloin suorat ovat lähes yhdensuuntaiset.



Kuva 19. Lasihelmien kiihtyvyys seulan pinnalla kallistuskulmilla 10, 12,5 ja 15 astetta

9 Seulan erotustehokkuus optimoimalla

Seulan optimaalisen erotustehokkuuden, kallistuskulman ja massan löytämiseksi tehtiin numeerinen mallinnus käyttäen neljää eri MATLAB-ohjelman pinta-alamallia (response surface model), jotka olivat *Linear, Pure Quadratic, Full Quadratic* ja *Interactions*. Mallit perustuvat pinta-alavaste eli RSM-menetelmään, jossa tilastomatematiikan keinoja hyödynnetään prosessien kokeellisten mallien ja yhtälöiden luomiseen. Menetelmän avulla etsitään esimerkiksi seulonnassa vaikuttavien muuttujien, kuten massan, kallistuskulman ja erotustehokkuuden, välistä suhdetta. (Box & Draper 1987)

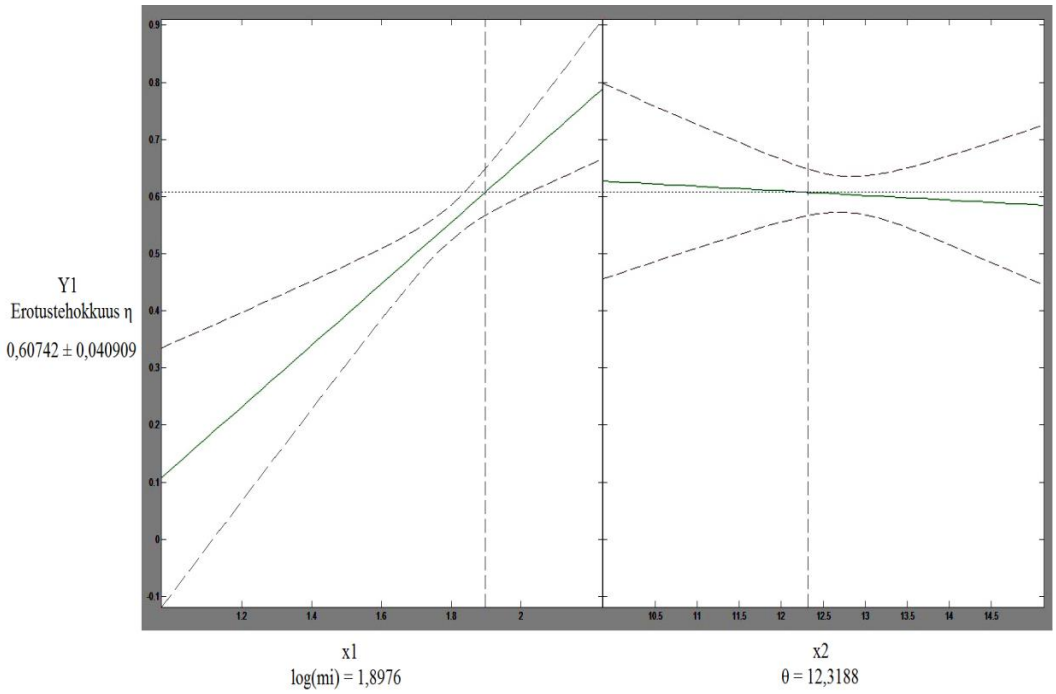
Simulaatiossa käytetyt pinta-alamallit eroavat toisistaan siten, että lineaarinen malli sisältää vain vakio ja lineaariset termit. Pure Quadratic -mallissa huomioidaan vakio, lineaariset ja toisen asteen termit. Interactions-malli vastaavasti sisältää vakio, lineaariset ja interaktiiviset termit eli muuttujien väliset yhteisvaikutukset. Full Quadratic -pinta-alamalli ottaa huomioon kaikki termit. (MathWorks 2010)

Mallien tarkoituksena on optimoida oletusarvoksi asetettu muuttuja, joka on kuvan y-akselilla. Kuvan x-akselilla on esitetty muuttuvat parametrit. Kuvissa 20 - 23 on esitetty seulan optimaalinen erotustehokkuus massapanoksen kymmenkantaisen logaritmin ja seulan kallistuskulman suhteen.

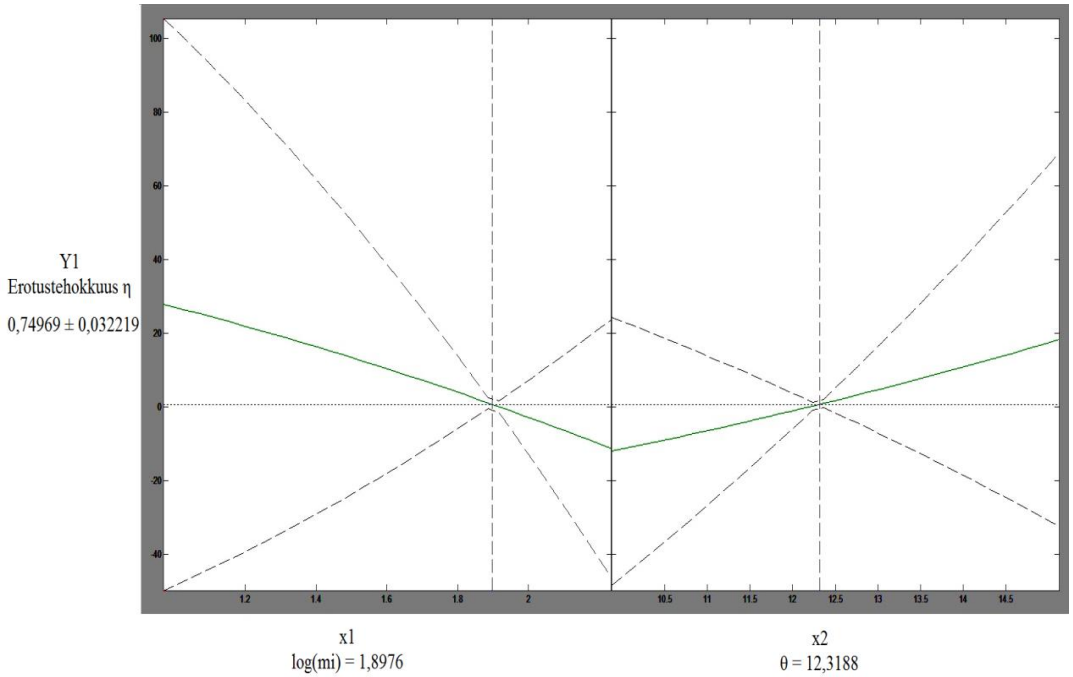
Mallin optimaaliset arvot määritettiin siten, että muuttamalla massan ja kallistuskulman arvoa, erotustehokkuus saatiin määritettyä mahdollisimman korkeaksi. Lineaarisessa pinta-alamallissa kuvassa 20 erotustehokkuus kasvaa massapanoksen kasvaessa. Toisaalta samaan aikaan kallistuskulman suurentaminen pienentää erotustehokkuutta. Vastaava ilmiö on havaittavissa kuvassa 22, jossa pinta-alamallina on Pure Quadratic. Full Quadratic ja Interactions -pinta-alamalleilla kuvissa 21 ja 23 erotustehokkuus pienenee, kun massapanosta kasvatetaan. Kallistuskulman suurentaminen puolestaan parantaa erotustehokkuutta. Simuloinnin tulokset on esitetty taulukossa III.

Taulukko III MATLAB-simuloinnilla määritetyt optimaalinen massapanos, kallistuskulma ja erotustehokkuus eri pinta-alamalleilla

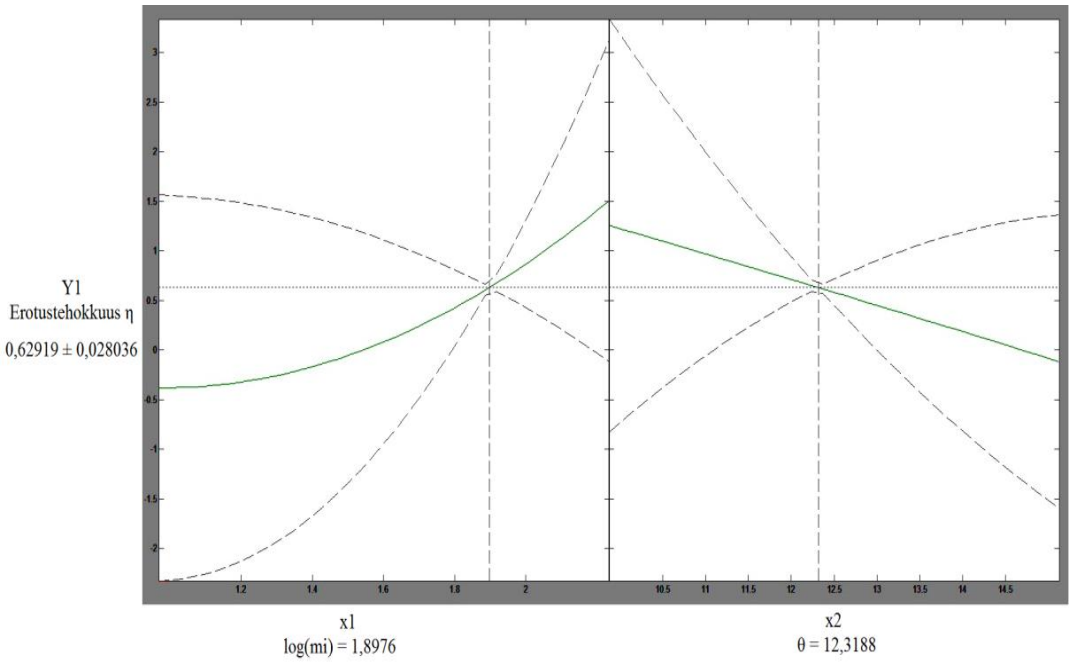
Pinta-alamalli	x_1 $\log(m_i)$ [-]	Seulalle asetettu massapanos m_i [g]	x_2 Seulan kallis-tuskulma Θ [°]	Y_1 Erotustehokkuus η [%]
Linear	1,8976	78,995	12,3188	60,742 ± 4,0909
Pure Quadratic	1,8976	78,995	12,3188	62,919 ± 2,8036
Full Quadratic	1,8976	78,995	12,3188	74,969 ± 3,2219
Interactions	1,8976	78,995	12,3188	64,194 ± 2,8029



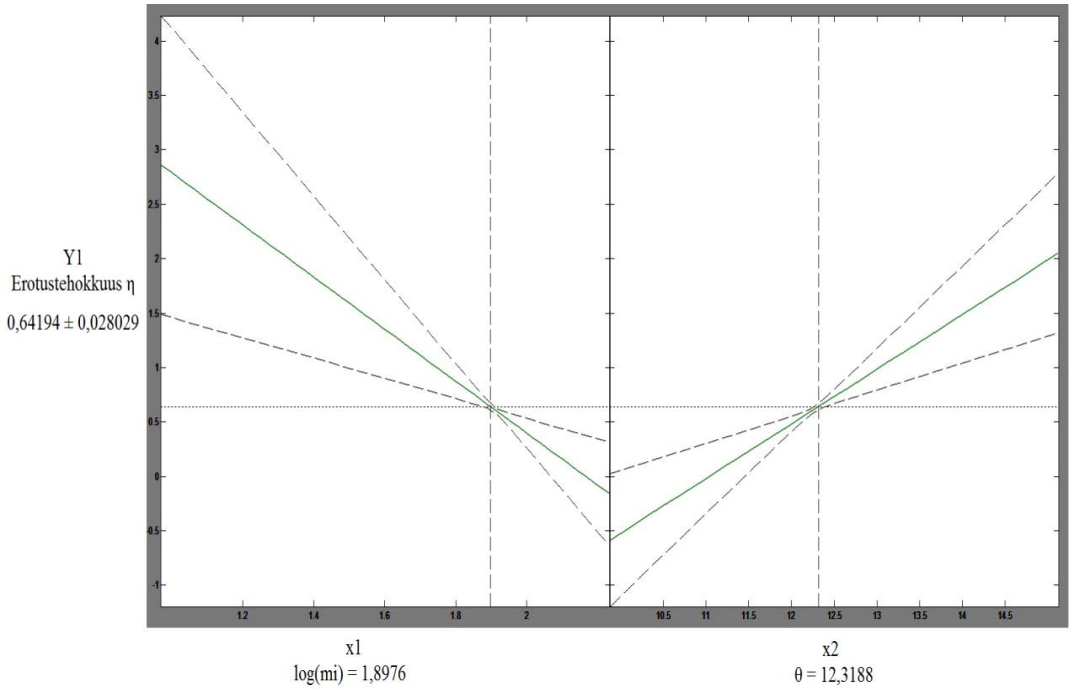
Kuva 20. Massapanoksen ja kallistuskulman suhde erotustehokkuuteen. Kuvassa y-akselin muuttuja Y1 on erotustehokkuus η ja x-akselilla vasemman puoleinen muuttuja x1 on massapanos $log(m_i)$ ja oikean puoleinen muuttuja x2 on seulan kallistuskulma Θ. Kuvaajan malli on *Linear*.



Kuva 21. Massapanoksen ja kallistuskulman suhde erotustehokkuuteen. Kuvassa y-akselin muuttuja Y1 on erotustehokkuus η ja x-akselilla vasemman puoleinen muuttuja x1 on massapanos log(mi) ja oikean puoleinen muuttuja x2 on seulan kallistuskulma Θ. Kuvaajan malli on Full Quadratic.



Kuva 22. Massapanoksen ja kallistuskulman suhde erotustehokkuuteen. Kuvassa y-akselin muuttuja Y1 on erotustehokkuus η ja x-akselilla vasemman puoleinen muuttuja x1 on massapanos $log(m_i)$ ja oikean puoleinen muuttuja x2 on seulan kallistuskulma Θ. Kuvaajan malli on *Pure Quadratic*.



Kuva 23. Massapanoksen ja kallistuskulman suhde erotustehokkuuteen. Kuvassa y-akselin muuttuja Y1 on erotustehokkuus η ja x-akselilla vasemman puoleinen muuttuja x1 on massapanos $log(m_i)$ ja oikean puoleinen muuttuja x2 on seulan kallistuskulma Θ. Kuvaajan malli on *Interactions*.

10 Johtopäätökset ja tulosten tarkastelu

Kokeellisen osan tarkoituksena oli selvittää pyöreiden partikkeleiden erottumista painovoiman vaikutuksesta Reichertin kartioseulalla. Tutkimuksessa selvitettiin, miten kallistuskulman ja syötetyn kiintoainemassan muutos vaikutti seulan erotustehokkuuteen. Mittauksissa käytetty koeseula on esitetty aikaisemmin tämän työn kappaleessa 7 kuvassa 15.

Mittaukset suoritettiin 0,75, 1, 2 ja 3 mm:n lasihelmillä ja 10 - 160 g:n massapanoksilla. Kokeessa tutkittiin seulontaa 10, 12,5 ja 15 asteen kallistuskulmissa. Jokaisen massapanoksen viipymäaika seulalla mitattiin ja erottuneet alikoon sekä ylikoon helmet punnittiin erotustehokkuuden, massavirtojen ja nopeuksien määrittämiseksi.

Koeseulan erotustehokkuudet vaihtelivat kallistuskulman mukaan, mikä voidaan havaita sekä taulukosta II että kuvasta 16. Huonoin erotustehokkuus saavutettiin 10 asteen kallistuskulmalla, jolla erotustehokkuuden keskiarvo oli 40,2 %:a. Seu-

lan erotustehokkuus kasvoi yli 20 - 30 prosenttiyksiköllä, kun kallistuskulmaa nostettiin 10 asteesta 12,5 ja 15 asteeseen. 12,5 ja 15 asteen erotustehokkuuden keskiarvot olivat 63,6 ja 70,3 %:a. Mittauksissa määritetyt erotustehokkuuden arvot noudattavat pääosin Rotich *et al.* (2013) simulaation tuloksia, minkä mukaan Reichertin kartioseulan erotustehokkuudeksi saatiin 60 %:a.

Yleinen trendi oli, että seulan erotustehokkuus säilyi lähes vakiona alle 80 gramman massapanoksilla lukuun ottamatta 10 asteen kallistuskulman tuloksia. Kun seulalle syötettiin suuria massapanoksia, erotustehokkuus alkoi laskea jokaisella kallistuskulmalla. Ongelma korostui etenkin pienimmällä kallistuskulmalla. 10 asteen kulmassa erotustehokkuus laski jyrkästi koko mittauksen ajan, mikä johtui lasihelmien juuttumisesta seulapinnalle ja syöttöalueelle (kuva 24). Tasaisin seulonta saavutettiin 15 asteen kulmassa, jossa erotustehokkuus säilyi lähes vakiona koko seulonnan ajan.

Kuva 24. Kokeen aikana suuret massapanokset (yli 80 g) jäivät kiinni seulan syöttöalueelle, ja osa lasihelmistä tukki seulan aukot. Ilmiö oli havaittavissa 10 ja 12,5 asteen kallistuskulmilla.

Liian suuren massapanoksen lisäksi seulan tukkeutumiseen saattoivat vaikuttaa liian pieni kallistuskulma ja partikkelin sekä seulapinnan väliset vuorovaikutukset. Seulalevy oli valmistettu teräksestä, johon kerääntyneet staattiset varaukset loivat kitkaa ja vastustivat siten lasihelmien vierimistä seulapinnalla.

Kuvan 17 massaosuuksien perusteella 12,5 ja 15 asteen kallistuskulmissa seulan mediaanit olivat 0,70 mm:ä. 10 asteen kallistuskulmassa massaosuuskäyrä poikkesi oletetusta s-mallisesta käyrästä, minkä vuoksi mediaania ei voitu määrittää luotettavasti.

Kokeen aikana havaittiin, että syötetty massavirta ja seulan kallistuskulma vaikuttavat erotustehokkuuteen (kuva 18). Kun kallistuskulma oli riittävän suuri, massavirran muutoksen vaikutus seulan erotustehokkuuteen väheni. 15 asteen kallistuskulmassa erotustehokkuus oli noin 70 %:a, vaikka massavirta seulalla kasvoi. Pienemmillä kallistuskulmilla erotustehokkuus laski, kun partikkelien liike hidastui ja suuret massat jäivät kiinni seulalle. 12,5 asteen kallistuskulmassa seulan erotustehokkuus oli aluksi lähes 70 %:a, mutta yli 80 gramman massapanoksilla erotustehokkuus alkoi laskea. Vastaavasti 10 asteen kulmassa erotustehokkuus laski tasaisesti massavirran kasvaessa, mikä viittaa siihen, että kallistuskulma on liian matala, eikä helmiin kohdistuva painovoima ole riittävän suuri niiden liikkeelle saamiseen.

Kallistuskulman nosto lisäsi lasihelmien nopeutta seulapinnalla (kuva 19). Nopeus kasvoi tasaisesti viipymäajan suhteen jokaisella kallistuskulmalla. Kuvaajasta saadaan luettua lasihelmien kiihtyvyydet eri kallistuskulmissa; 10 asteen kallistuskulmassa kiihtyvyys oli 1,70 m/s^2, 12,5 asteessa 2,12 m/s^2 ja 15 asteessa 2,54 m/s^2. 10 asteen kallistuskulmalla nopeus säilyi lähes vakiona, kun seulottiin yli 80 gramman massapanoksia. Tulokset selittyvät osittain lasihelmien juuttumisella seulapinnalle.

Painovoimaan perustuvan seulonnan etu on sen yksinkertainen toimintamekanismi, jota voidaan tehostaa helposti optimoimalla seulontaolosuhteita. Mittaustulosten perusteella suoritettiin MATLAB-simulointi, minkä mukaan seulalle syötettävä optimaalinen massapanos on 78,995 grammaa ja kallistuskulma 12,3188 astetta

(taulukko III). Optimoinnin tulokset ovat samansuuntaiset kuin kokeellisissa mittauksissa saadut tulokset. Simulaation muuttujilla saavutettiin 60 - 75 %:n erotustehokkuudet.

Simulaation ja kokeellisten mittausten perusteella voidaan olettaa, että painovoimaiseen erotteluun perustuva seulonta on potentiaalinen vaihtoehto kuivan kiintoaineen luokitteluun ja erotukseen. Erotustehokkuutta voidaan parantaa helposti nostamalla kallistuskulmaa ja säätämällä kiintoaineen massavirtaa sopivaksi. Tosin tämän työn tuloksia arvioitaessa on huomioitava, että mittaukset on tehty pyöreille, ideaaleille partikkeleille, jotka eivät vastaa todellisuudessa seulottavaa materiaalia. Epäsäännöllisen muotoisten partikkeleiden ja seulapinnan välillä voi syntyä enemmän vuorovaikutuksia, minkä seurauksena partikkeleiden liike hidastuu ja partikkelit jäävät helposti kiinni seulaan. Näin ollen seulottaessa karheampia partikkeleita, kuten hiekkaa, 15 asteen kallistuskulma voi osoittautua liian matalaksi. Seulontaolosuhteet vaikuttavat myös optimoinnin tuloksiin. Simuloinnin tulokset ovat voimassa pyöreille partikkeleille 10 - 15 asteen kallistuskulmassa, mutta voivat muuttua seulottavan materiaalin vaihtuessa tai kallistuskulman suurentuessa.

Tulevaisuudessa mittausolosuhteita voidaan parantaa vaikuttamalla seulontaolosuhteisiin. Kokeen seulontaolosuhteet eivät olleet ideaaliset, sillä mittaukset suoritettiin käsiajanotolla ja massapanos syötettiin käsin seulalle, mikä näkyi mittaustulosten hajontana. Syötön tasaamiseksi seulan alkupäähän tulisi kehittää erillinen syöttölaitteisto. Lisäksi kiintoainevirtaa seulalla tulisi mitata esimerkiksi seulaan asennettavilla virtausantureilla, joiden ansiosta ajanmittausvirheiden osuus tuloksissa vähentyisi. Sopivalla seulan pintamateriaalin valinnalla voidaan myös vähentää materiaalin ja seulapinnan välisiä vuorovaikutuksia.

Tutkimuksia muilla kallistuskulmilla ja materiaaleilla tarvitaan referenssitulosten saamiseksi. Koska Reichertin kartioseula on luokitinsovellus, kirjallisuudessa ei ole saatavilla teoriaa eikä valmiita matemaattisia malleja. Puuttuva vertailupohja voi siten vaikuttaa tulosten tarkistettavuuteen.

Lisätutkimuksia tarvitaan myös tulosten luotettavuuden todentamiseksi. Kokeellisten tuloksien perusteella voidaan kuitenkin todeta, että muihin seuloihin verrattuna Reichertin kartioseulan etuja ovat energiatehokkuus ja yksinkertainen prosessi. Lisäksi teollisuuden näkökulmasta Reichertin kartioseulan olennaisia ominaisuuksia ovat prosessin helppo säädettävyys erilaisille materiaaleille ja mekaanisen ravistelun tarpeen väheneminen. Seulan energiatehokkuuteen voidaan myös vaikuttaa kallistuskulmaa säätämällä.

11 Lähteet

1. Box, G. E. P., Draper, N. R., Empirical Model-Building and Response Surfaces, John Wiley & Sons, New York, 1987, p.1
2. Chen, Y-S., Hsiau, S-S., Lee, H-Y., Chyou, Y-P., Hsu, C-J., Size separation of particulates in a trommel screen system, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(2010), p. 1214-1221
3. Cleary, P.W., Sinnott, M.D., Morrison, R.D., Separation performance of double deck banana screens – Part 1: Flow and separation for different accelerations, *Minerals Engineering*, 22(2009), p. 1218-1229
4. Coulson, J.M., Richardson, J.F., *Chemical Engineering*. 4th ed. Vol. 2, Particle Technology and Separation Processes, 1991, Pergamon Press, Oxford, p. 25 - 45
5. Dong K. J., Yu, A.B., Numerical simulation of the particle flow and sieving behaviour on sieve bend/low head screen combination, *Minerals Engineering*, 31(2012), p. 2-9
6. Dong, K.J., Yu, A.B., Brake, I., DEM simulation of particle flow on a multi-deck banana screen, *Minerals Engineering*, 22(2009), p. 910-920
7. Fernandez, J.W., Cleary, P.W., Sinnott, M.D., Morrison, R.D., Using SHP one-way coupled to DEM to model wet industrial banana screens, *Minerals Engineering*, 24(2011), p. 741-753
8. Grozubinsky, V., Efficiency of solid particle screening as a function of screen slot size, particle size, and duration of screening - The theoretical approach, *International Journal of Mineral Processing*, 52(1998), p. 261-272
9. Holdich, R.G., *Fundamentals of Particle Technology,* Midland Information Technology and Publishing, Leicestershire, U.K., 2002, p. 80-83, 120-121
10. Johnson screens, Sieve Bends, [online], http://www.johnsonscreens.com/content/sieve-bends, viitattu 30.12.2013
11. Kuopanportti, H., Partikkelitekniikka: Hienoainesten käsittely ja hyödyntäminen metallurgisessa teollisuudessa, 10.–11.4.2013, POHTO, Oulu
12. Li, J., Webb, C., Pandiella, S.S., Gampbell, G.M., Discrete particle motion on sieves – numerical study using the DEM simulation, *Powder Technology*, 133(2003), p. 190-202

13. Liu, C., Wang, H., Zhao, Y., Zhao, L., Dong, H., DEM simulation on a single deck banana screen, *International Journal of Mining Science and Technology*, 23(2013), p. 273-277
14. Liu, K., Some factors affecting sieving performance and efficiency, *Powder Technology*, 193(2009), p. 208-213
15. MathWorks, MATLAB version 7.11.0.584 (R2010b), The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, 2010
16. McGabe, W.L., Smith, J.S., Harriott, P., *Unit Operations of Chemical Engineering*, 5th ed., R.R Donnelley & Sons Co, 1993, p. 994-1002, 1048-1049, 1060-1061
17. Metso Minerals, *Crushing and screening Handbook*, Hermes, Tampere, 2006
18. Mohanty, M.K., Fine coal screening performance enhancement using Pansep screen, *International Journal of Mineral Processing*, 69(2003), p. 205-220
19. Ortega-Rivas, E. 2007. Hydrocyclones. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Vol. 18, p. 208-233
20. Ortega-Rivas, E., *Non-Thermal Food Engineering Operations*, Springer, New York, 2012, p. 131-141
21. Richards, R.G., Palmer, M.K., High capacity gravity separators – a review of current status, *Minerals Engineering*, 10(1997):9, 973-982
22. Rotich, N., Tuunila R., Louhi-Kultanen M., Modeling and simulation of gravitational solid-solid separation for optimum performance, *Powder Technology*, 239(2013), p. 337-347
23. Rotich, N., Tuunila R., Louhi-Kultanen M., Empirical study and simulation of gravity solids classification based on Newton's second law, sent to *Minerals Engineering*, 2014
24. Schmidt, P., 2000. Screening, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Vol. 32, p. 226-249
25. Soldinger, M. Interralation of stratification and passage in the screening process, *Minerals Engineering*, 12(1999), 5, p. 497-516
26. Wang, G., Tong, X., Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation, *Mining Science and Technology (China)*, 21(2011), p. 451-455

27. Wills, B.A., Napier-Munn, T.J., *Wills' Mineral Processing Technology*, 7th ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2006, p. 186-202