Tekniikan kandidaatintyö

Syöttölietteen ominaisuuksien vaikutus hydrosyklonin erotustehokkuuteen

2019

Nea Vahter

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Engineering Science
Kemiantekniikka

Nea Vahter

Syöttölietteen ominaisuuksien vaikutus hydrosyklonin erotustehokkuuteen

Kandidaatintyö

2019

Työn ohjaaja: TkT Ritva Tuunila
Tarkastaja: TkT Ritva Tuunila

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Engineering Science
Kemiantekniikka

Nea Vahter

Syöttölietteen ominaisuuksien vaikutus hydrosyklonin erotustehokkuuteen

Kandidaatintyö
2019
48 sivua, 21 kuvaa, 3 taulukkoa ja 3 liitettä
Työn tarkastaja ja ohjaaja: TkT Ritva Tuunila
Hakusanat: hydrosykloni, erotustehokkuus, luokitustehokkuus, katkaisukoko, luokituksen terävyys, sakeutussuhde

Hydrosykloni on teollisuudessa laajasti käytetty erotus- ja luokituslaite. Optimoimalla hydrosyklonin käyttömuuttujia, voidaan sen toiminnan laatuun vaikuttaa ilman laitteen rakenteellisia muutoksia.

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää miten syöttölietteen lämpötila, keskimääräinen partikkelikoko ja kiintoainepitoisuus vaikuttavat hydrosyklonin toiminnan laatuun ja tehokkuuteen eri parametrien avulla. Valittuja parametreja olivat erotustehokkuus, luokitustehokkuus, sakeutussuhde, katkaisukoko ja luokituksen terävyys, sekä näitä vastaavat redusoidut parametrit. Erotustehokkuuden laskennassa käytettyjä eri menetelmiä vertailtiin keskenään.

Saatujen tulosten perusteella partikkelikoon ja lämpötilan kasvaessa erotustehokkuus kasvaa. Kiintoainepitoisuuden kasvattaminen laskee erotustehokkuutta. Syöttölietteen keskimääräisen partikkelikoon havaitaan vaikuttavan eniten luokituksen onnistumiseen. Partikkelikoon ollessa sopiva lämpötilan ja kiintoainepitoisuuden kasvaessa kasvaa myös luokitustehokkuus ja katkaisukoko pienenee.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ **2**

SYMBOLILUETTELO **4**

LYHENNELUETTELO **5**

I KIRJALLISUUSOSA **6**

1 JOHDANTO **6**

2 LUOKITUS **7**

2.1 Seulonta 7
2.2 Sykloni 8

3 HYDROSYKLONIN TOIMINTAPERIAATE **9**

3.1 Hydrosyklonin toiminnan hyvyyttä kuvaavat parametrit 11
3.1.1 Erotustehokkuus 11
3.1.2 Rejektio- ja sakeutussuhde 13
3.1.3 Redusoitu erotustehokkuus 13
3.1.4 Partikkelikoko ja partikkelikokojakaumat 14
3.1.5 Painehäviö 15
3.1.6 Luokitustehokkuus ja redusoitu luokitustehokkuus 16
3.1.7 Katkaisukoko ja redusoitu katkaisukoko 17
3.1.8 Luokituksen terävyys 18
3.2 Hydrosyklonin käyttömuuttujat 19
3.2.1 Syöttövirran viskositeetti, kiintoainepitoisuus ja lämpötila 19
3.2.2 Syöttöpaine 20
3.2.3 Nesteen ja kiintoaineen tiheysero 20
3.3 Hydrosykloneiden kytkemisratkaisut 20
3.4 Hydrosyklonin käyttökohteet 21

II KOKEELLINEN OSA **23**

4 MATERIAALIT JA MENETELMÄT **23**

4.1 Materiaalit 23
4.2 Kokeet 23
4.3 Lietteiden ominaisuuksien määrittäminen 25
4.4 Partikkelikokoanalyysi 27

5 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU **28**

5.1 Syöttölietteen koostumuksen vaikutus hydrosyklonin erotustehokkuuteen 29
5.2 Syöttölietteen koostumuksen vaikutus sakeutussuhteeseen 33
5.3 Syöttölietteen koostumuksen vaikutus luokitustehokkuuteen 35
5.4 Syöttölietteen koostumuksen vaikutus katkaisukokoon 39
5.5 Syöttölietteen koostumuksen vaikutus luokituksen terävyyteen 41

6 JOHTOPÄÄTÖKSET **43**

7 LÄHDELUETTELO **45**

8 LIITTEET **48**

SYMBOLILUETTELO

ζ	sakeutussuhde	-
Δp	painehäviö	Pa
μ_L	nesteen viskositeetti	cP
μ_m	lietteen viskositeetti	cP
θ	kartiomaisen osan kulma	°
ρ_L	nesteen tiheys	kg/m^3
ρ_m	lietteen tiheys	kg/m^3
ρ_s	kiintoaineen tiheys	kg/m^3
C	kiintoainepitoisuus tilavuusosuutena	%
c_i	syöttölietteen kiintoainepitoisuus	kg$_s$/dm^3
c_o	ylitteen kiintoainepitoisuus	kg$_s$/dm^3
c_u	alitteen kiintoainepitoisuus	kg$_s$/dm^3
D_c	hydrosyklonin halkaisija	m
D_i	syöttöputken halkaisija	m
D_o	yliteputken halkaisija	m
D_u	aliteputken halkaisija	m
E_T	erotustehokkuus	%
E'_T	redusoitu erotustehokkuus	%
$f(x)$	differentiaalijakauma	%
$F(x)$	kumulatiivinen jakauma	%
$F_i(x)$	syöttölietteen ylikokomassajakauma	%
$F_o(x)$	ylitteen ylikokomassajakauma	%
$F_u(x)$	alitteen ylikokomassajakauma	%
$G(x)$	luokitustehokkuus	%
$G'(x)$	redusoitu luokitustehokkuus	%
m_L	nesteen massa	kg
m_s	kiintoaineen massa lietteessä	kg
m_m	lietteen kokonaismassa	kg
$\dot{m}_i$	syötön kiintoainevirta	kg$_s$/s

$\dot{m}_u$	alitteen kiintoainevirta	kg_s/s
R_f	rejektiosuhde	-
S	kiintoaineen massaosuus	m-%
T	lämpötila	°C
t	aika	s
V	tilavuus	dm^3
V_p	pyknometrin tilavuus	dm^3
Q_i	syötön tilavuusvirta	dm^3/s
Q_o	alitteen tilavuusvirta	dm^3/s
Q_u	alitteen tilavuusvirta	dm^3/s
x	partikkelikoko	µm
x_{25}	partikkelikoko 25 %:n tehokkuudessa	µm
x_{50}	katkaisukoko	µm
x_{75}	partikkelikoko 75 %:n tehokkuudessa	µm

LYHENNELUETTELO

Anammox	anaerobinen ammoniumtypen hapetus

I KIRJALLISUUSOSA

1 JOHDANTO

Kaivosteollisuuden hienonnusprosessien tarkoituksena on erottaa malmista taloudellisesti arvokas mineraali mahdollisimman puhtaasti, ja näin aikaansaada sopivan hienousasteinen ja raekokojakaumaltaan haluttu tuote. Hienonnusprosessilla tarkoitetaan yleisesti murskausta, seulontaa jauhatusta ja luokitusta yhdessä. Murskaimia käytetään silloin, kun haluttu tuotteen partikkelikoko on yli 10 mm, ja jauhatuslaitteita tätä pienempää maksimipartikkelikokoa tavoiteltaessa. (Hukki 1964.)

Hienonnusprosesseihin liittyy tavallisesti luokitus, jonka avulla voidaan säätää tuotteen hienonnusastetta. Suljetussa jauhatuspiirissä luokituslaite on asennettu murskaimen tai jauhimen jälkeen. Luokituslaitteen tehtävänä on jakaa kiintoaine eri fraktioihin, jolloin liian suuret partikkelit voidaan palauttaa takaisin hienonnusprosessiin palautusvirtana. Näin luokittimilla voidaan säätää prosessista saatavan tuotteen laatua, koska liian karkeat partikkelit palautuvat hienonnusvaiheeseen niin monta kertaa kuin niiden hienontuminen vaatii. Hydrosykloni on yksi käytetyimmistä luokittimista kaivosteollisuudessa. Optimoimalla hydrosyklonin toimintaparametreja voidaan laitteen toiminnan tehokkuutta kasvattaa. Luokittaessa kiintoainetta hydrosyklonin tehokkuutta voidaan kuvata luokituksen terävyydellä, erotuksessa taas sillä, kuinka hyvin laite palauttaa kiintoaineen alitevirtaan. (Hukki 1964; Svarovsky 1984.)

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tutkia mitkä parametrit kuvaavat hydrosyklonin toiminnan laatua ja tehokkuutta, sekä miten eri erotustehokkuuden laskentamenetelmät vaikuttavat erotustehokkuuteen. Kokeellisesti tutkitaan, kuinka syöttölietteen koostumuksen muuttaminen vaikuttaa hydrosyklonin toimintaan.

Kandidaatintyö jakautuu kirjallisuusosaan ja kokeelliseen osaan. Kirjallisuusosassa käsitellään luokitusta, hydrosyklonin toimintaperiaatetta, sekä hydrosyklonin toimintaa kuvaavia parametreja. Kirjallisuuden perusteella valitaan tarkasteltavat hydrosyklonin toimintaparametrit, sekä toiminnan hyvyyttä kuvaavat parametrit. Valittuja toiminnan hyvyyttä kuvaavia parametreja tutkitaan kokeellisesti toimintaparametreja muuttamalla.

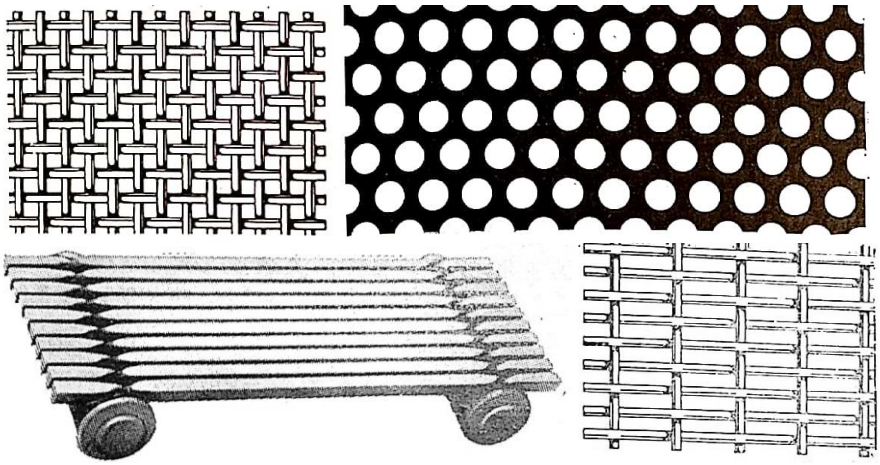
2 LUOKITUS

Luokituksella tarkoitetaan Hukin (1964) mukaan hienojakoisen materiaalin lajittelemista kahdeksi tai useammaksi jakeeksi. Luokitus perustuu tyypillisesti kiintoainepartikkeleiden eri vajoamisnopeuksiin väliaineessa (Wills & Napier-Munn 2006). Väliaineena käytetään yleisesti vettä tai ilmaa, jonka perusteella luokittimet jaetaan hydraulisiin ja pneumaatisiin luokittimiin (Hukki 1964). Luokituksen ajavana voimana on joko painovoima tai keskipakoisvoima riippuen luokittimesta.

Seulonta on luokituksen erikoistapaus. Siinä ylitteenä saadaan karkeajae ja alitteena hienojae – päinvastoin kuin vajoamisnopeuksiin perustuvissa menetelmissä. Seuloissa luokitus perustuu partikkeleiden kokoon, jolloin seulan aukkokokoa pienemmät partikkelit läpäisevät seulan ja suuremmat jäävät seulan päälle (Wills & Napier-Munn 2006).

2.1 Seulonta

Seula on rei'itetty tasopinta, jossa on suhteessa toisiinsa saman kokoisia aukkoja geometrisessa järjestyksessä (Wills & Napier-Munn 2006). Aukkokoko valitaan halutun katkaisukoon mukaan (Huusari 2013). Aukot voivat olla muodoltaan joko pyöreitä tai neliskulmaisia. Niiden lukumäärää pituustuumaa kohti ilmaisee mesh-luku. Seula valmistetaan kulutusta hyvin kestävästä materiaalista, jonka kestävyyttä voidaan lisätä entisestään päällystämällä seula esimerkiksi kumilla. Karkeaseulontaan käytetään yleensä työstettyjä reikälevyjä tai erilaisista tangoista valmistettuja seuloja. Tankoja voidaan hitsata, kutoa tai latoa määrätyllä tavalla, jolloin muodostuu erilaisia seulapintoja. Keskikarkeaan, sekä hienoseulontaan käytetään yleensä metallilangasta kudottuja seulakankaita, joita voidaan kutoa monilla eri tyyleillä. (Hukki 1964) Kuvassa 1 on esitetty esimerkkejä erilaisista seulapinnoista.



Kuva 1. Metallilangasta kudottu, levystä rei'itetty ja tangoista koottu seulapinta (mukaillen Hukki 1964).

Seulan toiminta perustuu siihen, että vain aukkokokoa pienemmän partikkelit läpäisevät seulan ja aukkokokoa suuremmat partikkelit jäävät seulan päälle. Säännöllisen muotoisia partikkeleita seulottaessa tämä oletus toteutuukin lähes täydellisesti, mikäli kiintoainekerros seulan päällä on riittävän ohut ja partikkeleiden pääsy seulapinnalle ei esty. Epäsäännöllisen muotoisia partikkeleita käsiteltäessä on kuitenkin mahdollista, että esimerkiksi pitkänomainen partikkeli läpäisee seulan, vaikka sen yksi sivu olisikin selkeästi pidempi ja keskimääräinen koko suurempi kuin seulan aukon sivun pituus. Epäsäännöllisen muotoista partikkelia voidaan kuvata sen pituuden, leveyden ja paksuuden avulla. Hukin (1964) mukaan tärkein tekijä seulottaessa on partikkelin leveys.

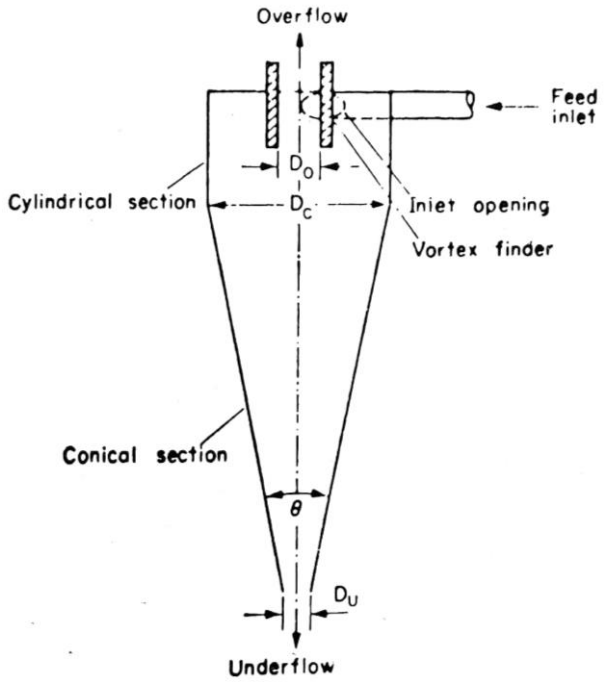
Seulonta on mahdollista suorittaa kuiva- tai märkäseulontana. Kuivaseulontaa käytetään erotusmenetelmänä tavallisesti teollisuudessa yli 5 mm kokoisille partikkeleille, kun taas märkäseulonnalla voidaan käsitellä jopa alle 250 μm kokoisia partikkeleita. Karkeaa kiintoainetta seulottaessa seulan pintaa voidaan estää tukkeutumasta ja partikkeleita tarttumasta yhteen jatkuvien vesisuihkujen avulla. (Coulson & Richardson 1991; Wills & Napier-Munn 2006.)

2.2 Sykloni

Syklonin toiminta perustuu keskipakoisvoimaan, joka aiheutetaan pumppaamalla syöttövirta ilmanpainetta korkeammassa paineessa syklonin sisälle yleensä tangentiaalisesti. Keskipakoisvoimalla nopeutetaan partikkeleiden laskeutumista väliaineessa ja se mahdollistaa myös syklonin asentamisen vapaasti haluttuun asentoon. Kokoonsa nähden syklonilla voidaan saavuttaa

suuri luokituskapasiteetti ja sillä pystytään luokittamaan tai erottamaan hyvin pieniäkin partikkelikokoja. (Purchas 1981; Coulson & Richardson 1993.)

Sykloni koostuu sylinterimäisestä syöttökammiosta ja kartiomaisesta alaosasta eli erotuskartiosta. Kaikista käytetyimmässä syklonityypissä eli käänteisen virtauksen syklonissa syöttövirta pumpataan sisään tangentiaalisesti syöttökammioon, alitteena saadaan kiintoaine ja ylitteenä puhdistunut väliaine (kuva 2). Syöttökammion yläpää on suljettu tasaisella levyllä, jonka läpi kulkee yliteputki. Yliteputki ylettyy syklonin sisälle aina syöttöputken alapuolelle asti – tätä syklonin sisällä olevaa yliteputken osaa kutsutaan pyörreputkeksi. Aliteputki on erotuskartion alapäädyssä. (Coulson & Richardson 1993; Wills & Napier-Munn 2006.)



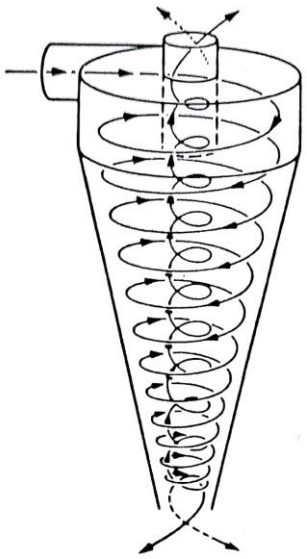
Kuva 2. Tangentiaalisen syötön hydrosyklonin rakenne ja pääparametrit: yliteputken koko D_o, syklonin halkaisija D_c, aliteputken halkaisija D_u ja erotuskartion kulma θ (Purchas 1981).

3 HYDROSYKLONIN TOIMINTAPERIAATE

Hydrosykloniin pumpattava liete päätyy laitteen sisällä pyörimisliikkeeseen lähelle hydrosyklonin seinämää (kuva 3). Tätä seinämän lähelle syntyvää pyörrettä kutsutaan primääriseksi pyörteeksi. Primäärisessä pyörteessä on suhteellisesti pieni keskipakoisvoima, jolloin karkeimmat, eli suurimman vajoamisnopeuden omaavat kiintoainepartikkelit lietteessä laskeutuvat kohti

hydrosyklonin seinämiä ja poistuvat alitteena pienen nestemäärän kanssa. Aliteputki estää koko syöttövirtauksen purkautumista suoraan alitteena primäärisen pyörteen mukana ja aiheuttaa sisemmän eli sekundaarisen pyörteen. Sekundaarisessa pyörteessä on primääristä pyörrettä suurempi kehänopeus, sekä kulmanopeus, joka aiheuttaa hienojen partikkeleiden ja suurimman osan nesteen joutumisen tähän ylitevirtana poistuvaan pyörteeseen. Keskipakoisvoiman ansiosta luokitus hydrosyklonissa perustuu partikkeleiden kokoon, muotoon ja ominaispainoon. (Hukki 1964; Purchas & Wakeman 1986; McCabe et al. 2005.)

Voimakas lietteen pyörreliike aiheuttaa hydrosyklonin sisemmän pyörteen keskelle alueen, jossa paine on matalampi. Tämän takia hydrosyklonin keskelle muodostuu ilmasydän. Ilmasydän on toivottu ilmiö ja parhaassa tapauksessa se muodostuu koko hydrosyklonin mitalle ja on mahdollisimman suora suhteessa laitteeseen. Hyvä ilmasydän on merkki pyörteiden tasaisuudesta. (Svarovsky 1984.)



Kuva 3. Tangentiaalisessa syötössä hydrosykloniin muodostuvat pyörteet (mukaillen Purchas 1981).

Monista käyttötarkoituksista huolimatta hydrosyklonilla ei voida samanaikaisesti saavuttaa täydellisesti erottunutta kiintoaine- ja nestefaasia. Jotta esimerkiksi ylitteenä saataisiin puhdas nestefaasi, tulisi alitteen kiintoainepitoisuuden olla vain 12 %, jolloin suuri osa nesteestä päätyisi alitteeseen. Tavallisesti alitteen kiintoainepitoisuus on parhaimmillaan 45 – 50 %. (Svarovsky 1984; McCabe et al. 2005.)

Hydrosyklonin haluttu käyttötarkoitus vaikuttaa laitteen mittasuhteisiin. Luokitukseen käytettävän hydrosyklonin sylinterimäinen osa on pitkä suhteessa kartiomaiseen osaan, kun taas syöttölietettä sakeutettaessa kartiomainen osa on suhteellisesti pidempi kuin sylinterimäinen osa. (McCabe et al. 2005.)

Hydrosyklonilla käsiteltävä partikkelikokoalue on tyypillisesti 4-500 μm, mutta pienen halkaisijan hydrosyklonilla voidaan käsitellä tätäkin pienempiä partikkeleita sisältäviä suspensioita. Pienentämällä hydrosyklonin halkaisijaa pienenee saavutettava katkaisukoko ja samalla tehokkuus kasvaa. Verrattuna muihin yksittäisiin erotus- ja luokituslaitteisiin hydrosyklonia voidaan käyttää monipuolisesti eri tarkoituksiin. Se soveltuu kiintoaineen ja nesteen erottamisen ja kiintoaineen luokittamisen lisäksi nesteiden selkeyttämiseen, lietteiden sakeuttamiseen, sekoittumattomien nesteiden erottamiseen, kiintoaineiden pesuun ja kaasunpoistoon nesteistä. Hydrosyklonin tehokkuus on kuitenkin parempi kiintoaine-neste -suspensiota käsitellessä, kuin neste-neste -erotuksessa. (Svarovsky 1984; Coulson & Richardson 1993.)

3.1 Hydrosyklonin toiminnan hyvyyttä kuvaavat parametrit

Riippuen onko hydrosyklonilla tarkoitus erottaa kiintoaine syöttölietteestä vai luokittaa syöttölietteen kiintoaine omiin fraktioihinsa, kuvataan erotustehokkuutta eri tavoin. Erotuksen tehokkuutta kuvaa hydrosyklonin kyky palauttaa kiintoaine alitevirtaan. Luokituksen tehokkuutta taas luokituksen terävyys. (Purchas 1981.)

3.1.1 Erotustehokkuus

Erotustehokkuuteen vaikuttavat lietteessä olevien partikkeleiden tiheys ja koko, sekä väliaineen tiheys ja viskositeetti. Yksinkertaisimmillaan erotustehokkuus voidaan esittää kiintoaineen massavirtojen suhteena alitteen ja syötön välillä. Yhtälön (1) mukaan erotustehokkuus kuvaa kuinka suuri osa syötetystä massavirrasta päätyy alitteeseen. (Purchas 1981; Svarovsky 1984.)

$$E_T = \frac{\dot{m}_u}{\dot{m}_i} \quad (1)$$

jossa E_T erotustehokkuus
$\dot{m}_u$ alitteen kiintoainevirta
$\dot{m}_i$ syötön kiintoainevirta

Yhtälö (1) on voimassa ja voidaan esittää hydrosyklonin kolmesta virrasta minkä tahansa suhteen, kun oletetaan ettei hydrosykloniin kerry kiintoainetta toiminnan aikana. Erotustehokkuus voidaan määrittää myös mitattujen partikkelikokojakaumien avulla yhtälön (2) osoittamalla tavalla, mutta silloin virheet ovat yleensä suurempia. (Svarovsky 1984.)

$$F_i(x) = E_T \cdot F_u(x) + (1 - E_T) \cdot F_o(x) \quad (2)$$

jossa x partikkelikoko
$F_i(x)$ syöttölietteen ylikokomassajakauma
$F_o(x)$ ylitteen ylikokomassajakauma
$F_u(x)$ alitteen ylikokomassajakauma

Yhtälöstä (2) voidaan ratkaista erotustehokkuus yhtälön (3) muotoon (Svarovsky 1984).

$$E_T = \frac{F_i(x) - F_o(x)}{F_U(x) - F_o(x)} \quad (3)$$

Toinen vaihtoehto erotustehokkuuden määrittämiseksi, on ylitteen, alitteen ja syöttölietteen kiintoainepitoisuuksien ja käytetyn kiintoaineen tiheyden avulla (Purchas & Wakeman 1986). Yhtälön (4) avulla voidaan määrittää hydrosyklonin erotustehokkuus ilman, että määritetään partikkelikokojakaumia.

$$E_T = \frac{[(c_i - c_o)(c_u - c_i)\rho_s]}{[c_i(c_u - c_o)(\rho_s - c_i)]} \quad (4)$$

jossa c_i syöttölietteen kiintoainepitoisuus
c_o ylitteen kiintoainepitoisuus
c_u alitteen kiintoainepitoisuus
ρ_s kiintoaineen tiheys

3.1.2 Rejektio- ja sakeutussuhde

Rejektiosuhde kuvaa alitevirtauksen ja syöttövirtauksen tilavuusvirtauksien suhdetta yhtälön (5) mukaisesti (Svarovsky 1984).

$$R_f = \frac{Q_u}{Q_i} \quad (5)$$

jossa Q_i syötön tilavuusvirta
Q_u alitteen tilavuusvirta

Pelkkiä syöttö- ja alitevirtojen kiintoainepitoisuuksia tarkastelemalla, voidaan rejektiosuhteen yhtälöstä (5) määrittää hydrosyklonin sakeutussuhde yhtälön (6) mukaisesti (Cilliers & Harrison 1997).

$$\zeta = \frac{c_u}{c_i} \quad (6)$$

3.1.3 Redusoitu erotustehokkuus

Redusoitu erotustehokkuus on verrattuna yhtälössä (1) esitettyyn erotustehokkuuden määritelmään huomattavasti parempi ja laajemmin käytetty. Redusoitu erotustehokkuus minimoi ns. dead flux -ilmiön vaikutuksen erotustehokkuuteen. Dead flux -ilmiö aiheutuu, kun alitteen kiintoainepitoisuus on liian suuri tai pieni, jolloin alitteeseen päätyy pieniä partikkeleita, joiden kuuluisi kulkeutua ylitevirtaan. Yhtälöllä (7) voidaan ratkaista redusoitu erotustehokkuus. (Svarovsky 1984; Endres et al. 2012.)

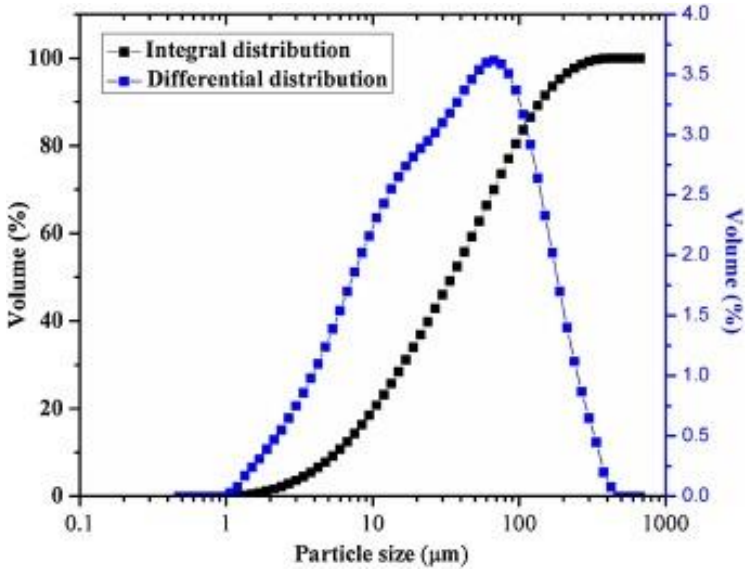
$$E_T' = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \quad (7)$$

3.1.4 Partikkelikoko ja partikkelikokojakaumat

Jauhettu kiintoaine koostuu eri kokoisista partikkeleista. Tällaisen aineen koostumusta voidaan kuvata partikkelikokojakaumalla, joka esittää tietyn kokoisten partikkeleiden määrän jauheessa. Epäsäännöllisen muotoisia partikkeleita käsitellessä partikkelikoko ei ole kuitenkaan yksiselitteinen käsite, vaan riippuen tavasta määrittää partikkelikoko saadaan toisistaan eroavia tuloksia. Esimerkiksi seula-analyyseistä saatavat tulokset ovat massaan perustuvia ja mikroskoopilla suoritettavat partikkelikokoanalyysit lukumäärään perustuvia. Eroavaisuudet menetelmien välillä kasvavat sitä suuremmiksi, mitä pienempiä partikkeleita käsitellään. (Purchas 1981.)

Yleinen tapa esittää epäsäännöllisen muotoisen kokoisen partikkelin koko on määrittää sen toiseksi pisimmän sivun pituus tai käyttää ekvivalenttipallon- tai ympyrän halkaisijaa. Partikkeleiden vertaaminen palloon voidaan tehdä projektiopinta-alan, tilavuuden, laskeutumisnopeuden, massan, ominaispinta-alan ja lukuisten muiden ominaisuuksien suhteen. Etenkin erittäin pienten partikkeleiden määrittämiseksi käytetään pinta-alan suhdetta massaan. (Coulson & Richardson 1991; McCabe et al. 2005.)

Partikkelikokojakauma voidaan esittää joko tiheysjakaumana tai kumulatiivisena jakaumana. Tiheys- eli differentiaalijakauma esittää kuinka suuri osuus partikkeleista on tiettyä partikkelikokoa. Muodostuvan jakauman leveyden perusteella voidaan päätellä mitä partikkelikokoa jauheessa on eniten ja mikä on suurin, sekä pienin esiintyvä partikkelikoko. Kumulatiivinen jakauma on integraali tiheysjakaumasta. Sen perusteella voidaan päätellä, kuinka monta prosenttia jauheen partikkeleista on jotakin tiettyä kokoa suurempia tai pienempiä. Esimerkit molemmista jakaumista on esitetty kuvassa 4. (McCabe et al. 2005.)



Kuva 4. Sininen käyrä kuvassa esittää differentiaalijakaumaa ja musta integraalijakaumaa (Patra et al. 2018).

Kumulatiivisen jakauman funktio on esitetty yhtälössä (8) (Bernhardt 1994).

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \tag{8}$$

jossa $f(x)$ differentiaalijakauma

3.1.5 Painehäviö

Painehäviö hydrosyklonissa aiheutuu kitkavoimista, jotka hidastavat lietteen kulkua syklonissa. Painehäviölle on esitetty yksinkertaistettu, vain hydrosyklonin mittasuhteet huomioon ottava yhtälö (9) (Purchas 1981).

$$\Delta p = 5{,}95 \cdot 10^7 \left(\frac{Q_i^2}{D_c^4}\right) \tag{9}$$

jossa Δp painehäviö

D_c syklonin halkaisija

Yhtälön (9) perusteella painehäviö kasvaa syötön tilavuusvirtaa kasvatettaessa ja pienenee syklonin halkaisijaa suurennettaessa. Tyypillisesti painehäviö hydrosyklonille on suuruudeltaan

noin 1 atm, mutta hydrosyklonin halkaisijan pienentyessä myös painehäviö kasvaa. Tyypillisesti hydrosyklonit ovat halkaisijaltaan 10 mm – 1,2 m. (McCabe et al. 2005.)

3.1.6 Luokitustehokkuus ja redusoitu luokitustehokkuus

Luokitustehokkuus kuvaa todennäköisyyttä, jolla tietyn kokoinen partikkeli erottuu hydrosyklonissa alitteeseen. Luokitustehokkuus määritellään periaatteessa samalla tavoin kuten erotustehokkuus yhtälössä (2), mutta yksittäinen luokitustehokkuuden arvo vastaa vain yhtä partikkelikokoluokkaa kerrallaan. Kuten myös erotustehokkuus, luokitustehokkuus voidaan ratkaista minkä tahansa kahden tunnetun virran kokojakauman suhteen. Tällöin ratkaisuvaihtoehtoja on kolme erilaista, jotka ovat esitetty yhtälöissä (10), (11) ja (12). (Svarovsky 1984.)

$$G(x) = E_T \cdot \frac{dF_u(x)}{dF_i(x)} \tag{10}$$

$$G(x) = 1 - (1 - E_T) \cdot \frac{dF_o(x)}{dF_i(x)} \tag{11}$$

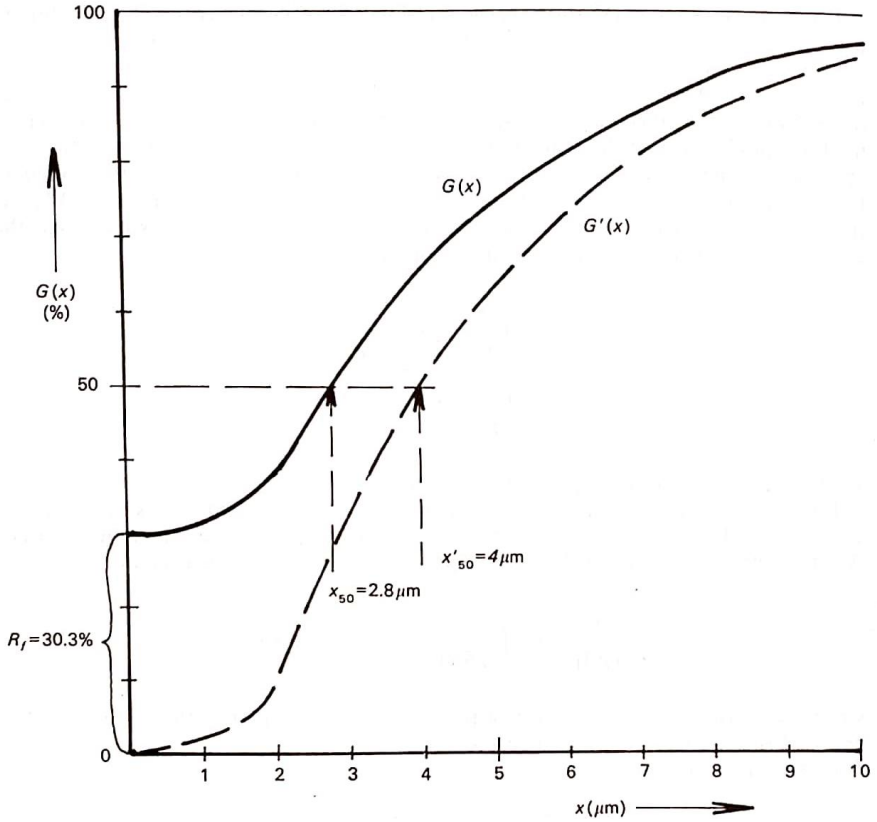
$$\frac{1}{G(x)} = 1 + \left(\frac{1}{E_T} - 1\right) \cdot \frac{dF_o(x)}{dF_u(x)} \tag{12}$$

Luokitustehokkuus voidaan esittää redusoituna samalla tavoin, kuten erotustehokkuuskin, jolloin dead flux -ilmiön vaikutus minimoituu. Redusoidun luokitustehokkuuden kuvaaja leikkaa y-akselin origossa, kun taas luokitustehokkuuden kuvaaja pisteessä R_f. Kuten kuvasta 5 voidaan nähdä, redusoitu luokitustehokkuus saa aina luokitustehokkuutta pienempiä arvoja korjauksen takia. Luokitustehokkuus ei voi saada koskaan myöskään pienempiä arvoja kuin R_f. Redusoitu luokitustehokkuus voidaan laskea yhtälöllä (13). (Svarovsky 1984.)

$$G'(x) = \frac{G(x) - R_f}{1 - R_f} \tag{13}$$

Ratkaistaessa luokitustehokkuus useille eri partikkelikokoluokille, voidaan luokitustehokkuus esittää jatkuvana funktiona partikkelikoolle *x*. Hydrosyklonin tapauksessa luokitustehokkuutta

kuvaava käyrä on tavallisesti S-kirjaimen muotoinen. Esimerkki luokitustehokkuuden sekä redusoidun luokitustehokkuuden kuvaajista on esitetty kuvassa 5. (Svarovsky 1984.)



Kuva 5. Hydrosyklonin luokitustehokkuuden *G(x)*, sekä redusoidun luokitustehokkuuden *G'(x)* kuvaajat. Kuvassa on merkittyinä, kuinka katkaisukoon x_{50} ja redusoidun katkaisukoon x'_{50} arvot luetaan kuvaajasta. (Svarovsky 1984.)

3.1.7 Katkaisukoko ja redusoitu katkaisukoko

Katkaisukoolla x_{50} tarkoitetaan sitä syöttölietteen teoreettista partikkelikokoa, joka päätyy yhtä todennäköisesti ylitteeseen tai alitteeseen. Tätä pienemmät partikkelit päätyvät todennäköisemmin ylitevirtaan ja suuremmat alitevirtaan. Katkaisukoko määritetään luokitustehokkuuden kuvaajasta, jolloin tarkin tulos saavutetaan derivoimalla. Kun hydrosyklonin halkaisijaa, yliteputken halkaisijaa, syöttölietteen konsentraatiota tai viskositeettia pienennetään, pienenee myös katkaisukoko. Katkaisukokoa voidaan pienentää myös aliteaukkoa suurentamalla tai kasvattamalla syöttövirtaa. Kuvassa 5 on esitetty esimerkki todellisen ja ideaalisen hydrosyklonin katkaisukoosta. (Svarovsky 1984; Wills & Napier-Munn 2006.)

Purchas on vuonna 1981 esittänyt katkaisukoolle myös yhtälön (14), jolla voidaan matemaattisesti arvioida käyttömuuttujien vaikutusta katkaisukokoon. (Purchas 1981; Wills & Napier-Munn 2006.)

$$x_{50} = 0{,}017 \left(\frac{D_c^3 \mu_L}{Q_i(\rho_s - \rho_L)}\right)^{0{,}5} \tag{14}$$

jossa x_{50} katkaisukoko

ρ_L nesteen tiheys

μ_L nesteen viskositeetti

Yhtälöstä (14) nähdään, että hydrosyklonin halkaisijan pienentäminen pienentää merkittävästi katkaisukokoa. Myös syöttövirran kasvattaminen pienentää katkaisukokoa, mutta sen merkitys verrattuna hydrosyklonin halkaisijaan on pieni. Katkaisukoon x_{50} lisäksi tutkitaan usein x_{95} kokoa, joka kuvaa partikkelikokoa, jota pienempiä partikkeleita seoksessa on 95% (Purchas 1981).

Redusoitu katkaisukoko x'_{50} voidaan vastaavasti määrittää redusoidun luokitustehokkuuden kuvaajasta. Määritys tapahtuu samalla tavalla, kuten katkaisukoonkin. (Svarovsky 1984.)

3.1.8 Luokituksen terävyys

Luokituksen terävyydellä voidaan tutkia sitä, kuinka tarkasti katkaisukokoa karkeampi kiintoaine päätyy alitteeseen ja katkaisukokoa hienompi kiintoaine ylitteeseen. Vain ideaalisessa tilanteessa katkaisukoko on raja, jota karkeampi kiintoaine päätyy aina alitteeseen ja hienompi ylitteeseen. Todellisessa tapauksessa raja ei ole kuitenkaan terävä. Luokituksen terävyys riippuu suoraan luokitustehokkuuden käyrän jyrkkyydestä eli tangentin kulmakertoimesta. Mitä jyrkempi käyrä on, sitä terävämpää luokitus on. (Svarovsky 1984.)

Svarovsky (1984) on esittänyt myös yhtälön (15), jossa symmetrisesti katkaisukoon, eli x_{50} koon molemmilta puolilta otetaan kaksi partikkelikokoa, joiden suhde kuvaa luokituksen terävyyttä. Koot voivat olla esimerkiksi x_{25} ja x_{75}.

$$H\left(\frac{25}{75}\right) = \frac{x_{25}}{x_{75}} \tag{15}$$

jossa x_{25} partikkelikoko 25%:n tehokkuudessa

x_{75} partikkelikoko 75%:n tehokkuudessa

3.2 Hydrosyklonin käyttömuuttujat

Hydrosyklonin käyttömuuttujilla tarkoitetaan syöttölietteen virtausnopeutta, syöttöpainetta, syöttölietteen nesteen ja kiintoaineen tiheyseroa, kiintoaineen parametreja ja fluidin parametreja. Kiintoaineen parametreihin lukeutuvat lietteen kiintoainepitoisuus, partikkelikoko, partikkelin muoto ja partikkeleiden järjestys. Fluidin parametreja ovat viskositeetti ja fluidin reologia. (Tian et al. 2018.)

3.2.1 Syöttövirran viskositeetti, kiintoainepitoisuus ja lämpötila

Newtonisen lietteen viskositeetin määrittämiseksi on esitetty yhtälö (16) (Purchas 1981).

$$\frac{\mu_m}{\mu_L} = \frac{0{,}1+0{,}5C}{(1-C)^4} \tag{16}$$

jossa μ_m lietteen viskositeetti

C kiintoainepitoisuus tilavuusosuutena

Syöttölietteen viskositeettiin vaikuttavia tekijöitä ovat yhtälön (16) perusteella lietteen kiintoainepitoisuus, sekä nestefaasin viskositeetti, joka riippuu lämpötilasta. Lietteen viskositeetti kasvaa, kun nesteen viskositeetti kasvaa tai lietteen kiintoainepitoisuus kasvaa. Kiintoainepitoisuus on merkittävin tekijä. Syöttölietteen viskositeetin vaikutusta hydrosyklonin katkaisukokoon voidaan tarkastella verrannon (17) avulla (Purchas 1981).

$$d_{50} \propto \mu_m^{0,5} \tag{17}$$

Lietteen konsentraation kasvaessa hydrosyklonin tehokkuus pienene. Suurin syy tähän on lietteen viskositeetin kasvaminen samalla. Verrannon (17) perusteella nähdään, että viskositeetin kasvaessa myös katkaisukoko kasvaa.

3.2.2 Syöttöpaine

Syötön tilavuusvirtaa voidaan säätää syöttöpaineella. Syötön tilavuusvirtauksen on esitetty aiempien tutkimusten perusteella vaikuttavan sekä katkaisukokoon, että painehäviöön. Yhtälössä (18) on esitetty verrannollisuus syöttövirran ja katkaisukoon välillä (Purchas 1981).

$$d_{50} \propto Q_i^{-0,5} \tag{18}$$

Verrannon (18) mukaan kaksinkertaistamalla syöttövirtaus pienenee katkaisukoko 70 %:een aiemmasta tilanteesta. Syötön tilavuusvirtauksen kaksinkertaistaminen taas nelinkertaistaa painehäviön. (Purchas 1981.)

3.2.3 Nesteen ja kiintoaineen tiheysero

Nesteen ja kiintoaineen riittävä tiheysero on hydrosyklonilla erottamisen pääedellytys. Tiheyseroa voidaan muokata väliaineen lämpötilaa muuttamalla. Tavallisesti nesteen viskositeetti laskee lämpötilan kasvaessa. Tiheysero nesteen ja kiintoaineen välillä on osoitettu olevan verrannollinen hydrosyklonin katkaisukokoon. Kaksinkertaistamalla tiheysero, pienenee katkaisukoko 70 %:een aiemmasta. (Purchas 1981.)

3.3 Hydrosykloneiden kytkemisratkaisut

Hydrosykloni kytketään usein prosessissa jonkin toisen kiintoaine-neste – erotinlaitteen kanssa. Yksi esimerkki tällaisesta tapauksesta on kytkeä hydrosykloni laskeutusaltaan kanssa joko sarjaan tai rinnan. Sarjaan kytkettäessä hydrosyklonin ylite johdetaan laskeutusaltaaseen, jolloin karkeajae voidaan poistaa nopeammin prosessista ja laskeutusaltaan kapasiteetti voi olla pienempi. (Purchas & Wakeman 1986.)

Kytkemällä useita hydrosykloneita prosessiin, tavoitellaan yleensä kahta eri asiaa – suurempaa kapasiteettia pienen halkaisijan hydrosykloneilla tai useita eri kokoisia tuotejakeita. Mitä pienempi hydrosyklonin halkaisija on, sitä pienempiä partikkeleita sillä voidaan erottaa. Laitevalinta tehdään katkaisukoon tai erotustehokkuuden perusteella, jolloin tarvittavan kapasiteetin

saavuttamiseksi hydrosykloneita kytketään rinnan tarvittava määrä. Kytkemällä taas useita dimensioiltaan erilaisia hydrosykloneita sarjaan, saadaan jokaisesta erillisestä hydrosyklonista alitevirtana erilainen tuote ja ylitevirta kytketään seuraavan hydrosyklonin syöttövirraksi. Alitevirtoina saatavien tuotevirtojen partikkelikoko pienenee hydrosyklonisarjassa edettäessä. (Purchas & Wakeman 1986.)

3.4 Hydrosyklonin käyttökohteet

Alun perin hydrosykloneita on käytetty vain kaivos- ja mineraaliteollisuuden tarpeisiin, mutta ajan myötä käyttökohteita on kehitetty yhä enemmän. Nykyisin sovelluksia hydrosyklonille on olemassa niin kemianteollisuuden, petrokemian, tekstiiliteollisuuden, sähköntuotannon ja metalliteollisuuden tarpeisiin. (Svarovsky 1984.)

Anammox (anaerobinen ammoniumtypen hapetus) on orgaanisten jätteiden, kuten karjan lannan, elintarviketeollisuuden jätevesien ja jätevesilietteen käsittelyssä käytetty typenpoistoprosessi. Hydrosyklonia käytetään prosessissa erottamaan käsitelty jäte anammoxlietteestä, jolloin alitteena saatava liete voidaan palauttaa takaisin prosessiastiaan. Ylitteenä saadaan poistettua prosessista nitraattihapetusbakteerit, sekä heterotrofiset bakteerit. (Kwon et al. 2019.)

Myös hydrosykloneiden mahdollisuuksia lentotuhkan puhdistamiseen raskasmetalleista on tutkittu. Lentotuhkaa muodostuu esimerkiksi kiinteiden jätteiden polttolaitoksista. Tuhka koostuu suurimmaksi osaksi pii- ja kalsiumyhdisteistä, mutta sisältää myös raskasmetalleja, jotka haitallisuutensa takia estävät lentotuhkan sisältämien yhdisteiden kierrättämisen. Hydrosyklonilla on onnistuttu erottamaan lentotuhkasta erilleen kloridisuoloja. Erotusprosessin jälkeen raskasmetallit on pystytty konsentroimaan hienojakeeseen. (Ko, Chen & Wei 2013.)

Rikastushiekka on kaivosteollisuuden rikastusprosessista saatava sivutuote, joka sisältää edelleen arvokkaita metalleja. Tutkimusten perusteella on pystytty todistamaan, että metallijakeet rikastuvat tiettyihin partikkelikokojakeisiin. Hydrosykloni on yksi mahdollinen erotuslaite rikastushiekan käsittelemiseksi. (Suokas 2017.)

Nykyinen trendi on selkeästi kehittää hydrosyklonille käyttökohteita teollisuuden jätevirtojen arvokkaiden osien kierrättämiseksi perinteisten käyttökohteiden rinnalle. Jatkuvasti tiukentuva

ympäristölainsäädäntö ja kansainväliset sopimukset aiheuttavat tarpeita kierrättää jätevirtoja yhä tarkemmin tai käsittelemään jätevirran vähemmän haitalliseksi.

II KOKEELLINEN OSA

4 MATERIAALIT JA MENETELMÄT

Kokeellisen osassa tutkittiin laboratoriomittakaavan hydrosyklonilla, miten hydrosyklonin toimintaparametrien muuttaminen vaikuttaa sen toimintaan. Hydrosyklonin tarkasteltaviksi toimintaparametreiksi valittiin kirjallisuusosan perusteella syöttölietteen kiintoainepitoisuus, lämpötila ja keskimääräinen partikkelikoko.

4.1 Materiaalit

Hydrosyklonikokeissa käytettiin kolmea keskimääräiseltä partikkelikooltaan erilaista kiintoainetta: Nordkalkin rikastushiekkaa, sekä kalsiumkarbonaattijauheita Finncarb 6005 ja Durcal 40. Keskimääräiseltä partikkelikooltaan suurin oli rikastushiekka ja pienin Finncarb 6005. Nordkalkin rikastushiekka koostuu pääasiassa kalsiitista (36,4 %), wollastoniitista (19,9 %) ja diopsidista (14,8 %) (Päätös nro. 110/09/2 2009). Rikastushiekka esikäsiteltiin liian suurten partikkeleiden poistamiseksi seulomalla se Retsch:n laboratoriomittakaavan seulalla, jonka aukkokoko oli 1 mm. Lietteet valmistettiin kiintoaineesta ja vesijohtovedestä.

4.2 Kokeet

Hydrosyklonikokeissa jokaisesta kiintoaineesta valmistettiin yhteensä neljä eri lietettä, joista kolme oli viileämpiä ja yksi lämpimämpi. Viileämpien lietteiden pitoisuudet olivat noin 2 m-%, 6 m-% ja 10 m-% ja lämpimien noin 6 m-%. Taulukossa I on esitetty koesuunnitelma käytetyistä syöttölietteistä.

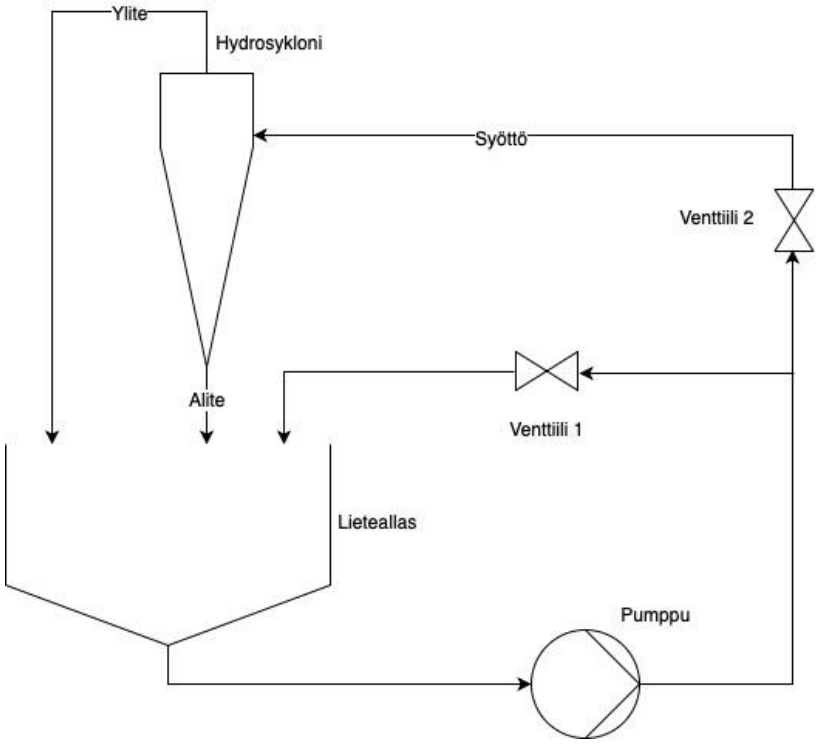
Taulukko I Koesuunnitelma syöttölietteiden kiintoainepitoisuuksista ja lämpötiloista.

Näytenumero	**Kiintoaine**	**S, [m-%]**	**T, [°C]**
1	Rikastushiekka	2,0	20,0
2	Rikastushiekka	6,0	20,0
3	Rikastushiekka	10,0	20,0
4	Rikastushiekka	6,0	50,0
5	Durcal 40	2,0	20,0
6	Durcal 40	6,0	20,0
7	Durcal 40	10,0	20,0
8	Durcal 40	6,0	50,0
9	Finncarb 6005	2,0	20,0
10	Finncarb 6005	6,0	20,0
11	Finncarb 6005	10,0	20,0
12	Finncarb 6005	6,0	50,0

Hydrosyklonikokeet suoritettiin Mozley:n C124 two inch - laboratoriomittakaavan hydrosyklonilla, joka oli kytkettynä Mozley C700 hydrosyklonin testaussarjaan MKII. Valokuva laitteistosta on esitetty kuvassa 6.

Kuva 6. Hydrosyklonikokeissa käytetty Mozley C700 hydrosyklonin testaussarja.

Virtauskaavio kuvassa 6 esitetystä laitteistosta on kuvassa 7.



Kuva 7. Virtauskaavio käytetystä koelaitteistosta.

Aliteputken halkaisija oli kaikissa suoritetuissa kokeissa 5 mm ja yliteputken halkaisija 11 mm. Syöttölietteet valmistettiin suoraan laitteiston altaaseen. Ennen näytteiden ottamista lietettä kierrätettiin altaassa 10 min siten, että kuvassa 7 esitetty venttiili 1 oli auki. 10 min jälkeen liete johdettiin 1,5 bar vakiopaineessa hydrosykloniin avaamalla kuvassa 7 esitetty venttiili 2. Pyörteiden annettiin tasoittua hydrosyklonissa vielä 5 min ennen näytteiden ottamista. Lietteen lämpötila mitattiin altaasta pyörteiden tasoittumisen jälkeen, sekä välittömästi näytteiden oton jälkeen.

4.3 Lietteiden ominaisuuksien määrittäminen

Syöttölietteen, sekä ylite- ja alitevirtojen kiintoainepitoisuuksien määrittämiseksi otettiin näytteet lietealtaasta, ylite- ja alitevirroista. Jokaisesta virrasta otettiin kaksi rinnakkaista näytettä. Näytteet ylitteestä, sekä alitteesta otettiin yhtäaikaisesti. Näyteastiat punnittiin näytteen kanssa ennen lämpökaapissa kuivaamista. Lämpökaapin lämpötila oli 120 °C ja näytteitä kuivattiin vähintään 24 tuntia ennen kuivan kiintoainenäytteen punnitsemista. Kiintoaineen massaosuus näytteessä ratkaistiin yhtälöllä (19).

$$S = \frac{m_s}{m_m} \tag{19}$$

jossa m_m lietteen kokonaismassa

m_s kiintoaineen massa lietteessä

Alite- ja ylitevirtojen tilavuusvirtauksien määrittämiseksi molemmista virroista kerättiin näytettä yhtäaikaisesti mittakannuihin samalla aikaa ottaen. Kertyneen näytteen tilavuuden ja näytteenottoon kuluneen ajan perusteella voitiin määrittää alite-, ylite- ja syöttölietteen tilavuusvirtaukset. Rinnakkaisia määrityksiä suoritettiin kolme. Tilavuusvirtauksilla ja lietteiden kiintoainepitoisuuksilla ratkaistiin massavirrat.

Kiintoaineiden tiheydet määritettiin pyknometrillä. Pyknometri punnittiin ensin tyhjänä tulpan kanssa, jonka jälkeen kiintoainetta lisättiin pyknometriin 10 - 50 g. Pyknometri punnittiin uudelleen tulppineen, kun kiintoaine oli lisätty. Kiintoaineen joukkoon lisättiin ionivaihdettua vettä siten, että kiintoaine peittyi täysin. Lietenäyte esikäsiteltiin vakuumissa ilmakuplien poistamiseksi näytteestä. Pyknometri täytettiin vedellä ja tulppa asetettiin paikoilleen siten, että näyte täytti kapillaarin tulpassa. Lopuksi vedellä täytetty pyknometri punnittiin ja mitattiin lietteen lämpötila. Kiintoaineen tiheys ratkaistiin yhtälöllä (20).

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_p - \frac{m_L}{\rho_L}} \tag{20}$$

jossa ρ_s kiintoaineen tiheys

ρ_L nesteen tiheys

m_L nesteen massa

V_p pyknometrin tilavuus

Lietteen kiintoainepitoisuus voidaan muuttaa massaosuudesta tilavuusosuudeksi käyttäen yhtälöä (21) (Holdich 2002).

$$C = \frac{1}{\frac{(1-S)}{S}\frac{\rho_S}{\rho_L}} \quad (21)$$

jossa C kiintoaineen tilavuusosuus

S kiintoaineen massaosuus

4.4 Partikkelikokoanalyysi

Partikkelikokoanalyysit suoritettiin Malvern Mastesizer 3000 -partikkelikokoanalysaattorilla, johon oli kytketty Malvern Hydro EV dispersioyksikkö. Laitteen toiminta perustuu laserdiffraktioon. Näytteiden tausta mitattiin puhtaalla vedellä, jonka jälkeen näytteet pipetoitiin dispersioyksikköön samalla pipetillä hyvin sekoittaen ja pumpaten. Pumpun nopeus rikastushiekkanäytteitä analysoitaessa oli 3500 rpm ja kalsiumkarbonaattinäytteitä analysoitaessa 3000 rpm. Jokaisen hydrosyklonikokeen syöttö-, ylite- ja alitevirrasta suoritettiin kahdesta rinnakkaisesta näytteestä viisi mittausta.

Kuva 8. Malvern Mastersizer 3000 ja Hydro EV -dispersioyksikkö (Malvern Panalytical, Hydro EV).

Dispergoitu kiintoainenäyte pumpataan Mastersizer 3000 -partikkelikokoanalysaattorin kyvetin läpi, jossa kyvetissä olevan näytteen läpi johdetaan lasersäde. Osuessaan eri kokoisiin partikkeleihin laservalo siroaa ja valon intensiteetti eri kulmilla mitataan. Mitä suurempi partikkeli on, sitä pienemmän sirontakulman se aiheuttaa. Mitatusta datasta saadaan sirontakuvio, josta saadaan laskennallinen tilavuuskokojakauma näytteelle. (Malvern Panalytical, Mastersizer 3000.)

Laskentamenetelmänä partikkelikokoanalyyseissä käytettiin Mie-teoriaa. Menetelmä sopii hyvin murskatulle tai jauhetulle materiaalille. Mie-teoria vaatii kuitenkin tietoa näytteen optisista ominaisuuksista, joten rikastushiekan taitekertoimeksi arvioitiin aiemmin tieteellisesti tehdyn tutkimuksen perusteella 1,75 (Nyman 2016). Kalsiumkarbonaattinäytteille käytettiin laitteen tietokannan ehdottamaa taitekerrointa 1,58.

5 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

Hydrosyklonikokeissa käytettyjen lietteiden kokeellisesti määritetyt kiintoainepitoisuudet, sekä mitattujen lämpötilojen keskiarvot ovat esitetty taulukossa II.

Taulukko II Kokeissa käytettyjen syöttölietteiden todelliset kiintoaineet, kokeellisesti määritetyt massapitoisuudet, keskimääräinen lietteen lämpötila mittausten aikana ja rejektiosuhde.

Näytenumero	**Kiintoaine**	**S, [m-%]**	**T, [°C]**	**R_f**
1	Rikastushiekka	1,39	25,0	0,142
2	Rikastushiekka	4,69	28,2	0,159
3	Rikastushiekka	7,50	26,7	0,158
4	Rikastushiekka	5,22	51,7	0,172
5	Durcal 40	2,03	20,0	0,133
6	Durcal 40	5,60	22,8	0,135
7	Durcal 40	9,41	22,5	0,129
8	Durcal 40	5,49	45,2	0,115
9	Finncarb 6005	1,91	21,8	0,109
10	Finncarb 6005	5,77	21,8	0,115
11	Finncarb 6005	9,54	20,8	0,114
12	Finncarb 6005	5,75	45,9	0,0983

Taulukossa III on pyknometrillä määritetyt käytettyjen kiintoaineden tiheydet.

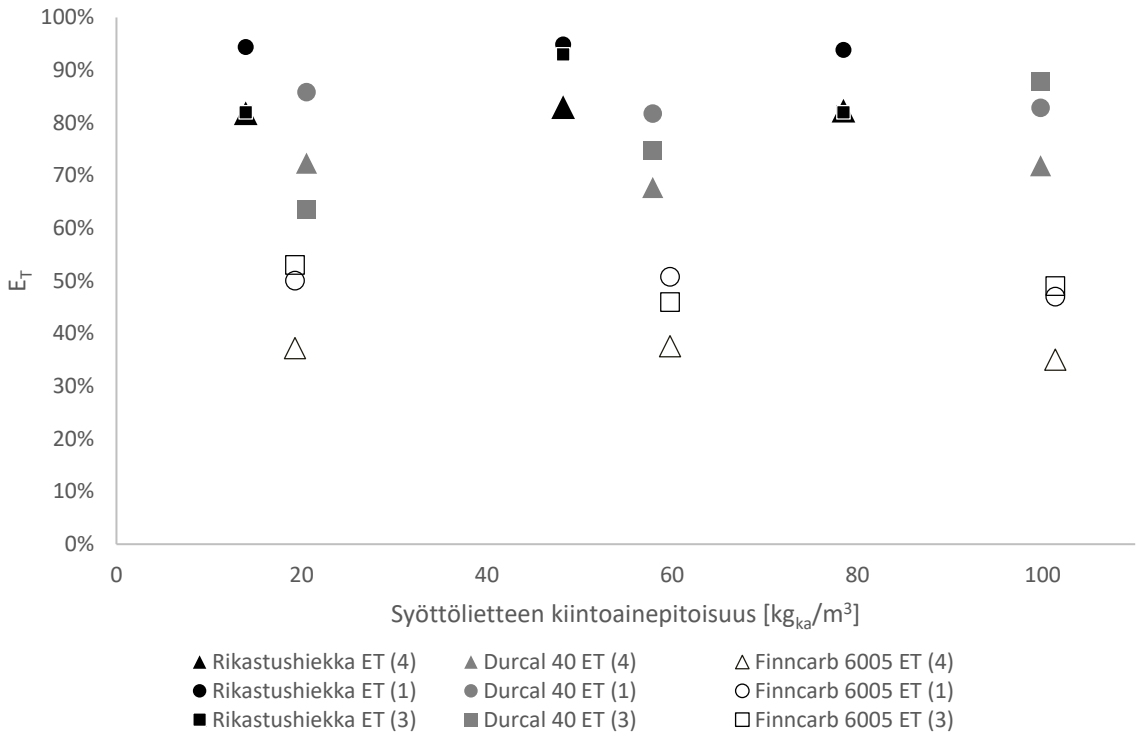
Taulukko III Kokeissa käytettyjen kiintoaineiden kokeellisesti määritetyt tiheydet.

Näyte	**Tiheys, [kg/m^3]**
Rikastushiekka	2840
Durcal 40	2690
Finncarb 6005	2720

PubChemin mukaan kalsiumkarbonaatin tiheys on välillä 2700 – 2950 kg/m^3 (PubChem, Calsium Carbonate (Compound)). Finncarb 6005 -näytteen määritetty tiheys vastaa hyvin PubChemin tiheysväliä kalkille. Durcal 40 -näytteen määritetty tiheys on hieman matalampi, mutta koska ero on hyvin pieni, tiheyden määritystä voidaan pitää luotettavana.

5.1 Syöttölietteen koostumuksen vaikutus hydrosyklonin erotustehokkuuteen

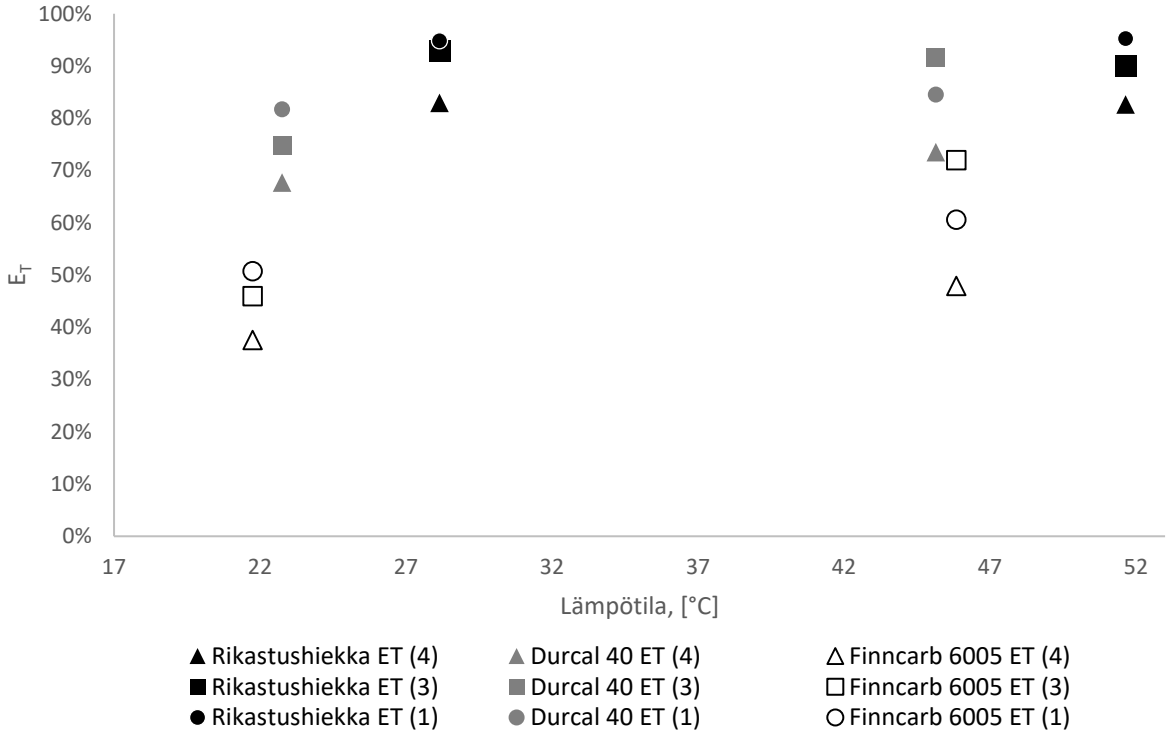
Hydrosyklonin erotustehokkuus, sekä redusoitu erotustehokkuus ratkaistiin syöttölietteen ja alitteen massavirtojen perusteella yhtälöllä (1), Malvern Mastersizer 3000 -partikkelikokoanalysaattorilla saaduista kumulatiivisista jakaumista yhtälöllä (3) ja virtojen kiintoainepitoisuuksista, sekä kiintoaineen tiheydestä yhtälöllä (4). Kuvassa 9 on esitetty erotustehokkuus eri laskentatavoilla kaikilla kolmella käytetyllä kiintoaineella syötön kiintoainepitoisuuden suhteen.



Kuva 9. Syöttölietteen kiintoainepitoisuuden vaikutus hydrosyklonin erotustehokkuuteen laskettuna yhtälöillä (1), (3) ja (4).

Kuvasta 9 nähdään, että partikkelikoon vaikutus erotustehokkuuteen on huomattavasti syötön kiintoainepitoisuutta suurempi. Partikkelikooltaan suurimmalla näytteellä eli rikastushiekalla saavutetaan kaikista suurin erotustehokkuus. Partikkelikoon pienentyessä myös erotustehokkuus pienenee.

Ero erotustehokkuuden laskemiseen käytettyjen menetelmien välillä on havaittavissa parhaiten massavirtojen perusteella laskettaessa yhtälöllä (1) ja kiintoainepitoisuuksien perusteella laskettaessa yhtälöllä (4). Yhtälö (1) tuottaa säännöllisesti korkeammat erotustehokkuuden arvot verrattuna yhtälöön (4). Yhtälöillä (1) ja (4) ratkaistuna syötön kiintoainepitoisuuden kasvaessa erotustehokkuus laskee. Yhtälöllä (3) ratkaistut erotustehokkuudet poikkeavat yhtälöillä (1) ja (4) ratkaistuista erotustehokkuuksista. Poikkeama etenkin rikastushiekkanäytteiden tuloksista aiheutui todennäköisesti rikastushiekan vaikeasta käsiteltävyydessä partikkelikokoanalyyseissä. Rikastushiekka laskeutui suuren partikkelikokonsa takia nopeasti näyteastiassa ja pipetissä, joten sen pipetoiminen dispersioyksikköön toistettavasti oli vaikeaa.



Kuva 10. Syöttölietteen lämpötilan vaikutus erotustehokkuuteen.

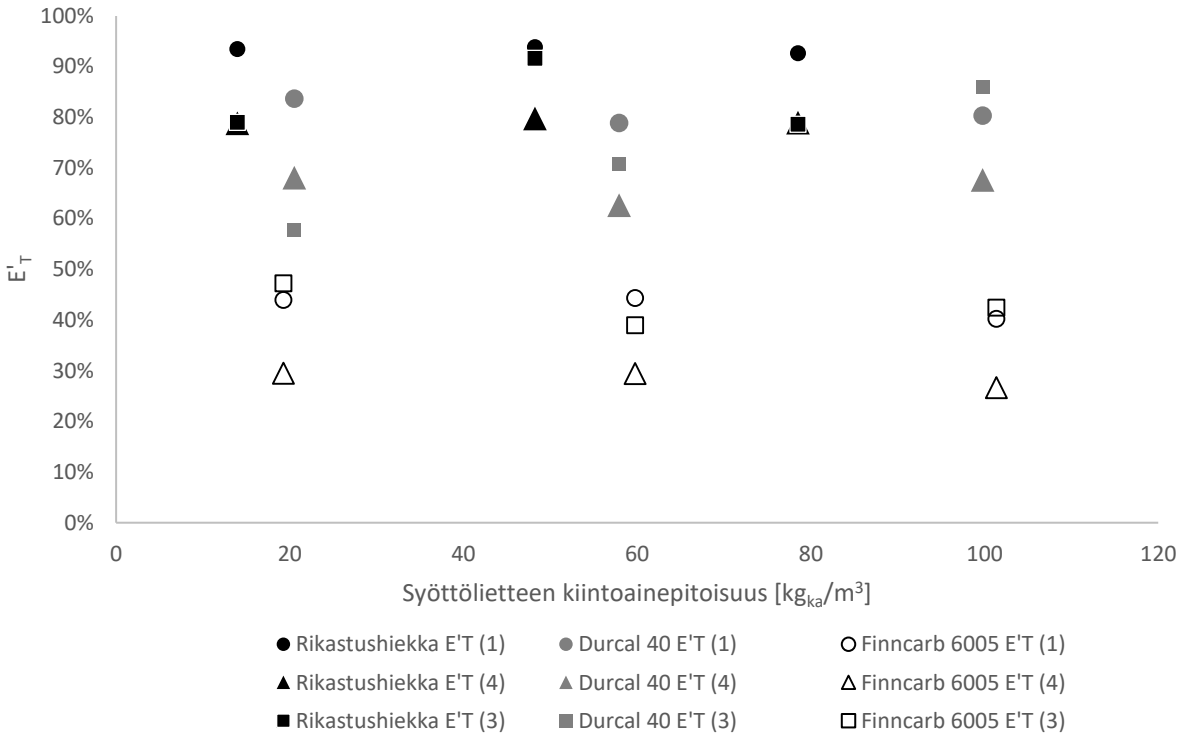
Kuvassa 10 syöttölietteen lämpötilan nostaminen kasvattaa yhtälöllä (1) ratkaistua erotustehokkuutta kaikilla tutkituilla kiintoaineilla. Kiintoainepitoisuuden kasvattaminen vähentää syöttölietteen lämpötilan vaikutusta erotustehokkuuteen. Finncarb 6005 -kalkkinäytteen erotustehokkuus kasvaa eniten eli 9,9 %, toisiksi eniten Durcal 40 -näytteen eli 2,8 % ja vähiten rikastushiekkanäytteen 0,39 %.

Yhtälöllä (4) ratkaistuna rikastushiekkanäytteiden erotustehokkuus laskee hieman lämpötilan noustessa, mutta kalkkinäytteiden erotustehokkuudet sen sijaan nousevat. Durcal 40 -näytteen erotustehokkuus kasvaa lämpötilan noustessa 22,8 °C:sta 45,2 °C:een 5,8 %. Finncarb 6005 -näytteen taas lämpötilan noustessa 21,8 °C:sta 45,9 °C:een 10,3 %.

Yhtälöllä (3) ratkaistuna rikastushiekkanäytteen erotustehokkuus laskee 3,0 % lämpötilan noustessa 28,2 °C:sta 51,7 °C:een. Durcal 40 -näytteen erotustehokkuus kasvaa lämpötilan noustessa 22,8 °C:sta 45,2 °C:een 17,0 %. Finncarb 6005 -näytteen taas lämpötilan noustessa 21,8 °C:sta 45,9 °C:een 26,0 %. Lämpötilan vaikutus erotustehokkuuteen on selkeästi suurin yhtälöllä (3) laskettaessa.

Syöttölietteen lämpötilan vaikutus erotustehokkuuteen perustuu siihen, että lietteen viskositeetti on lämpötilan funktio. Lämpötilaa nostettaessa veden viskositeetti laskee, jolloin erotustehokkuus kasvaa. Fluidin viskositeetin laskiessa partikkeleiden laskeutumisnopeus kasvaa, lietteen tangentiaalinen nopeus kasvaa hydrosyklonissa, sekä ilmasydän ja lietteen pyörimisliike muodostuvat paremmin (Neesse et al. 2015; Tian et al. 2018.).

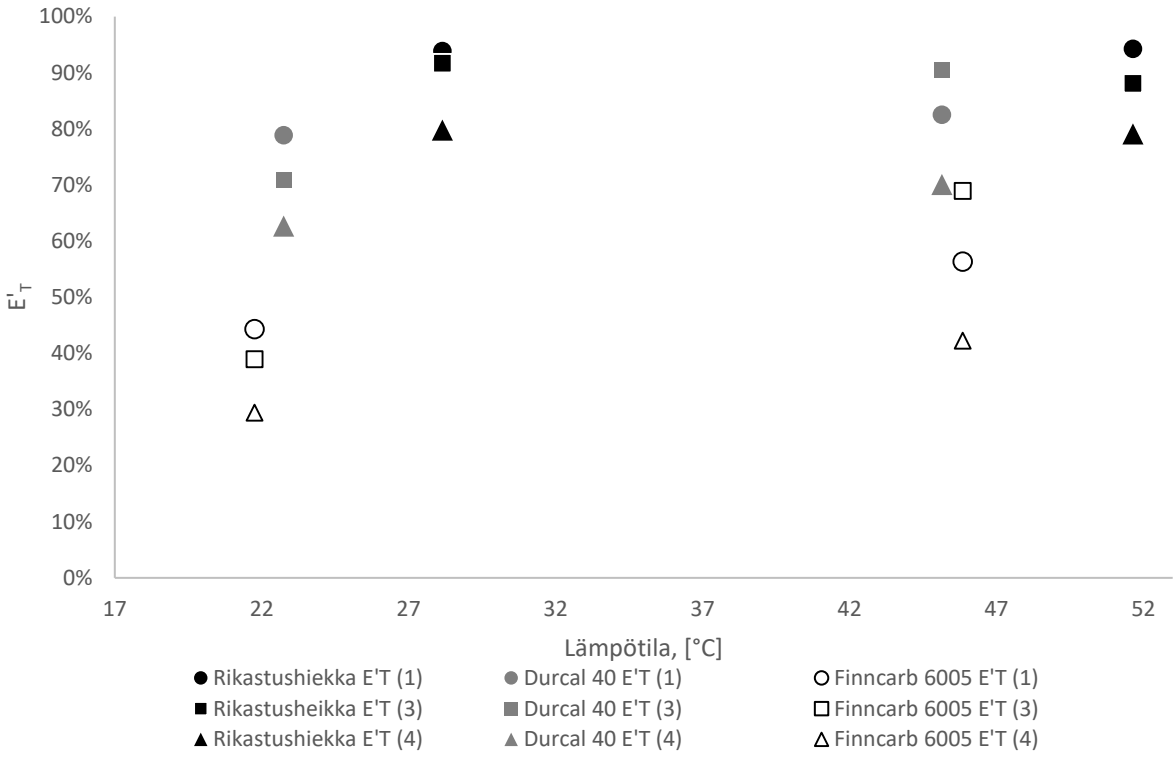
Kuvassa 11 on esitetty redusoitu erotustehokkuus syöttölietteen kiintoainepitoisuuden suhteen. Redusoitu erotustehokkuus on laskettu käytettyjen kolmen erotustehokkuuden laskentatavan perusteella.



Kuva 11. Syöttölietteen kiintoainepitoisuuden vaikutus redusoituun erotustehokkuuteen. Redusoidut erotustehokkuudet ovat ratkaistu yhtälöillä (1), (3) ja (4) ratkaistuista erotustehokkuuksista.

Redusoidun erotustehokkuuden arvot ovat dead flux -ilmiön korjauksesta aiheutuen aina pienempiä kuin erotustehokkuuden arvot, kuten vertaamalla kuvaa 11 kuvaan 9 voidaan nähdä. Redusoitu erotustehokkuus käyttäytyy syöttölietteen kiintoainepitoisuuden kasvaessa kuitenkin samalla tavoin kuin erotustehokkuus.

Redusoitu erotustehokkuus ja erotustehokkuus eroavat toisistaan sitä enemmän, mitä pienempään partikkelikokoon siirrytään riippumatta laskentatavasta. Esimerkiksi yhtälöllä (1) lasketuna rikastushiekkanäytteissä redusoitu erotustehokkuus eroaa vain noin prosentin erotustehokkuuden arvoista. Durcal 40 -kalkkinäytteissä ero on n. 2 % ja Finncarb 6005 -näytteissä n. 6 %. Kuvassa 12 on esitetty redusoidun erotustehokkuuden arvot lämpötilan suhteen.



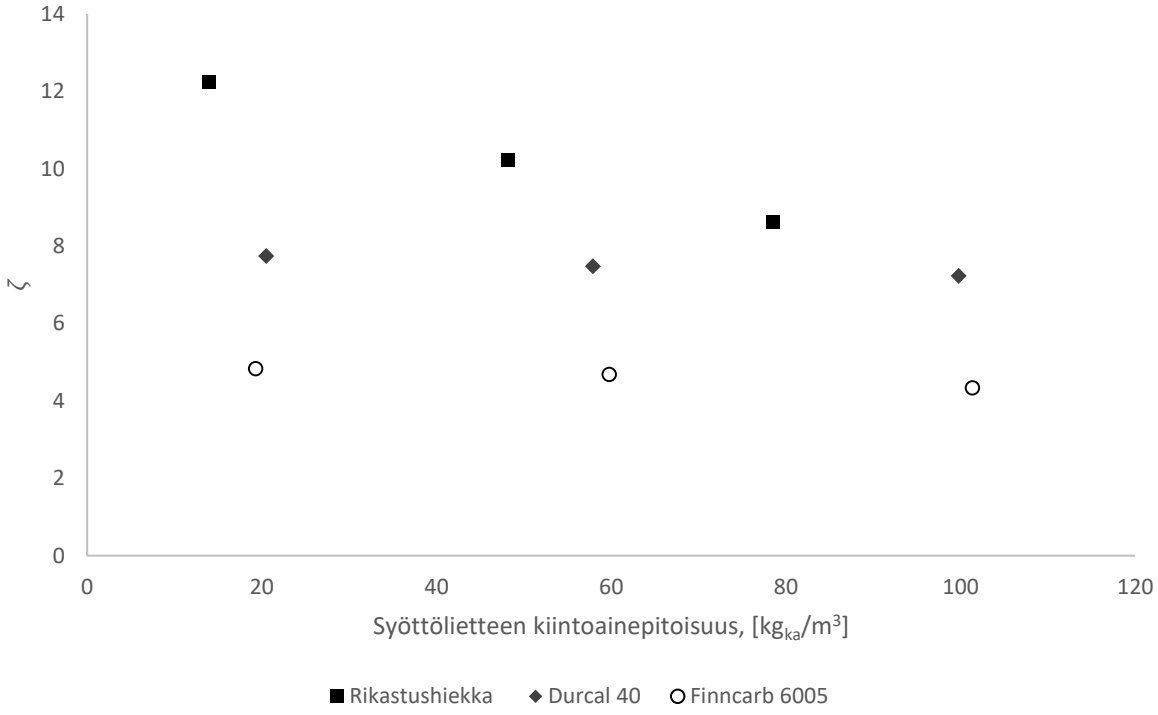
Kuva 12. Syöttölietteen lämpötilan vaikutus redusoituun erotustehokkuuteen.

Kuvasta 12 voidaan nähdä redusoidun erotustehokkuuden käyttäytyvän myös samalla tavoin kuin erotustehokkuuden lämpötilan suhteen. Kuvasta nähdään selkeästi, kuinka yhtälöllä (4) lasketut erotustehokkuudet ovat matalampia kuin muilla laskentamenetelmillä lasketut.

Kirjallisuuden lisäksi tietokonesimulaatioissa on mallinnettu hydrosyklonin toimintaa, jolloin erotustehokkuus on kasvanut kiintoaineen partikkelikoon, sekä tiheyden kasvaessa (Razmi et al. 2019). Erotustehokkuuden on aiemmissa tutkimuksissa todettu myös kasvavan kiintoainepitoisuuden kasvaessa laimeissa syöttölietteen kiintoainepitoisuuksissa. Erotustehokkuuden kasvattaminen kiintoainepitoisuutta kasvattamalla on kuitenkin rajallista ja mikäli lietteen kiintoainepitoisuutta kasvatetaan liikaa, kääntyy erotustehokkuus jyrkkään laskuun (Niazi et al. 2017).

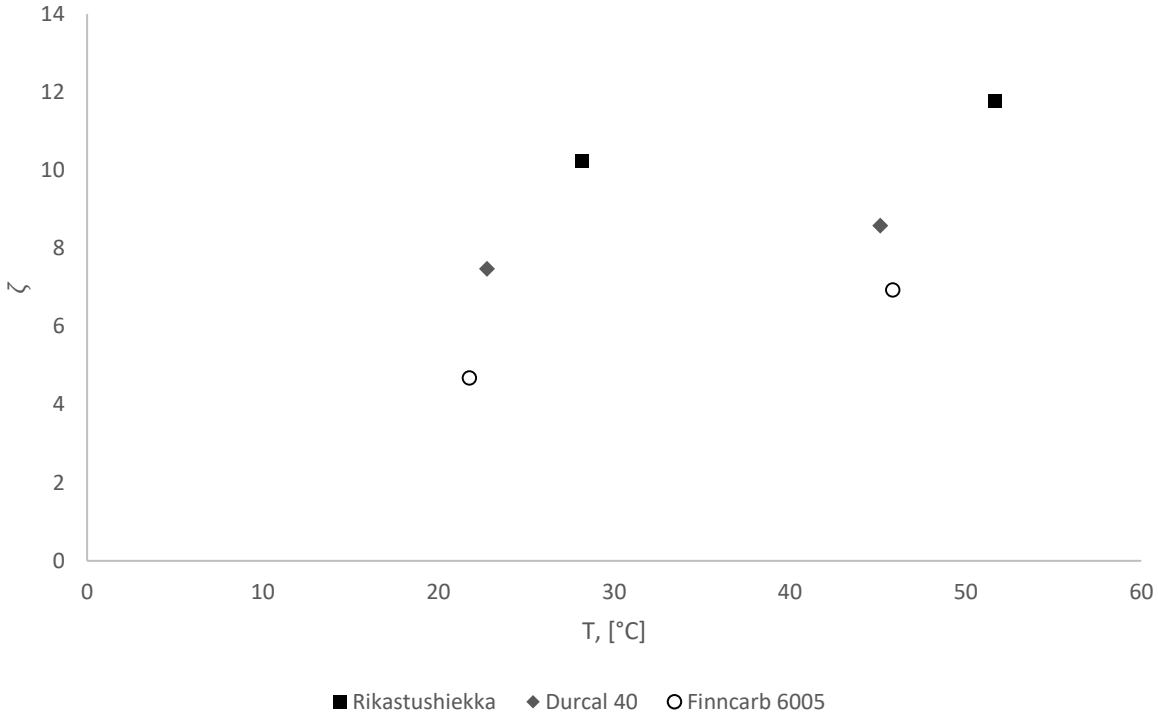
5.2 Syöttölietteen koostumuksen vaikutus sakeutussuhteeseen

Hydrosyklonin sakeutussuhde ratkaistiin yhtälöllä (6). Tulokset kuvassa 13 ovat esitetty syöttölietteen kiintoainepitoisuuden suhteen ja kuvassa 14 syöttölietteen lämpötilan suhteen.



Kuva 13. Syöttölietteen kiintoainepitoisuuden vaikutus hydrosyklonin sakeutussuhteeseen.

Kiintoainepitoisuuden kasvattaminen pienentää sakeutussuhdetta kaikilla kiintoaineilla kuvassa 13. Partikkelikoon vaikutus sakeutussuhteeseen on kaikista merkittävin tekijä. Partikkelikoon kasvaessa myös sakeutussuhde kasvaa. Rikastushiekan sakeutussuhde pienenee kaikista voimakkaimmin tutkituista kiintoaineista syöttölietteen kiintoainepitoisuuden kasvaessa. Molemmissa kalkkinäytteissä tapahtuu lähes saman suuruinen muutos sakeutussuhteessa kiintoainepitoisuuden kasvaessa, mutta Durcal 40 -näytteiden sakeutussuhde on noin kolme yksikköä korkeampi kuin Finncarb 6005 -näytteiden.

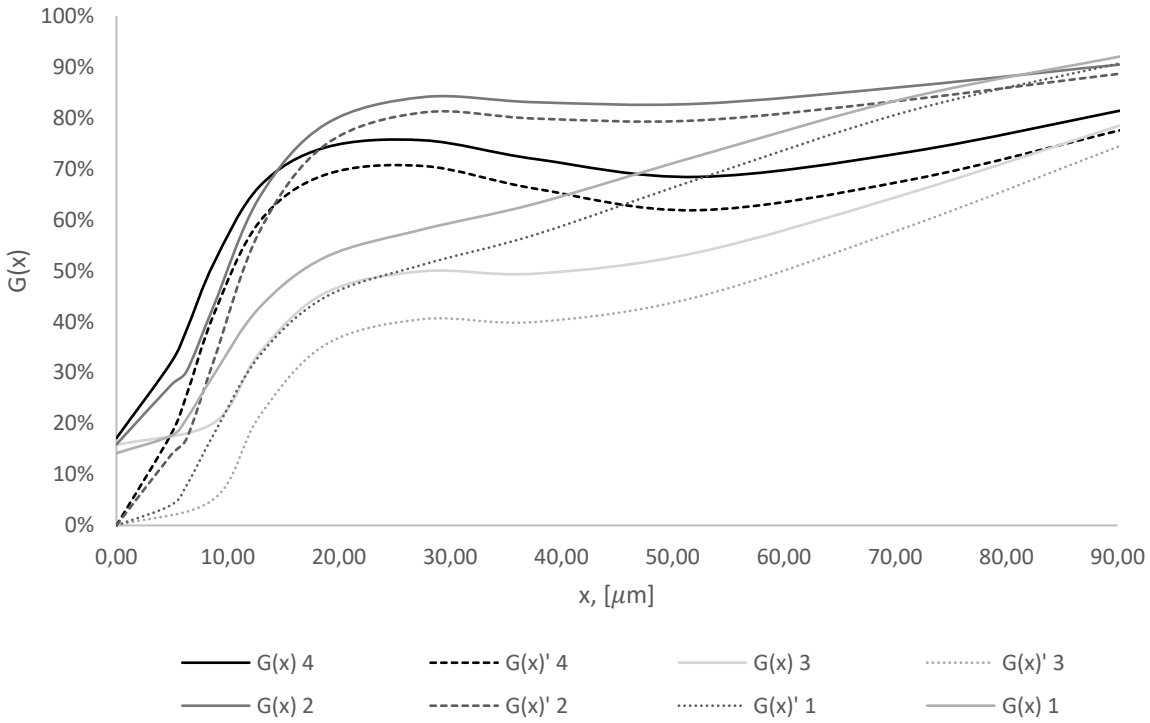


Kuva 14. Syöttölietteen lämpötilan vaikutus hydrosyklonin sakeutussuhteeseen.

Kuvassa 14 sakeutussuhdetta lämpötilan suhteen tarkasteltaessa havaitaan, että sakeutussuhde kasvaa syöttölietteen lämpötilan noustessa. Partikkelikoon pienentäminen kasvattaa syöttölietteen lämpötilan vaikutusta sakeutussuhteeseen. Rikastushiekalla muutos on 1,5 yksikköä, Durcal 40 -näytteellä 1,1 yksikköä ja Finncarb 6005 -näytteelle 2,3 yksikköä.

5.3 Syöttölietteen koostumuksen vaikutus luokitustehokkuuteen

Kuvissa 15-17 esitetyt luokitustehokkuuden ja redusoidun luokitustehokkuuden käyrät ovat ratkaistu yhtälöillä (10) ja (13) partikkelikokoanalyyseistä saaduista kumulatiivisista jakaumista.



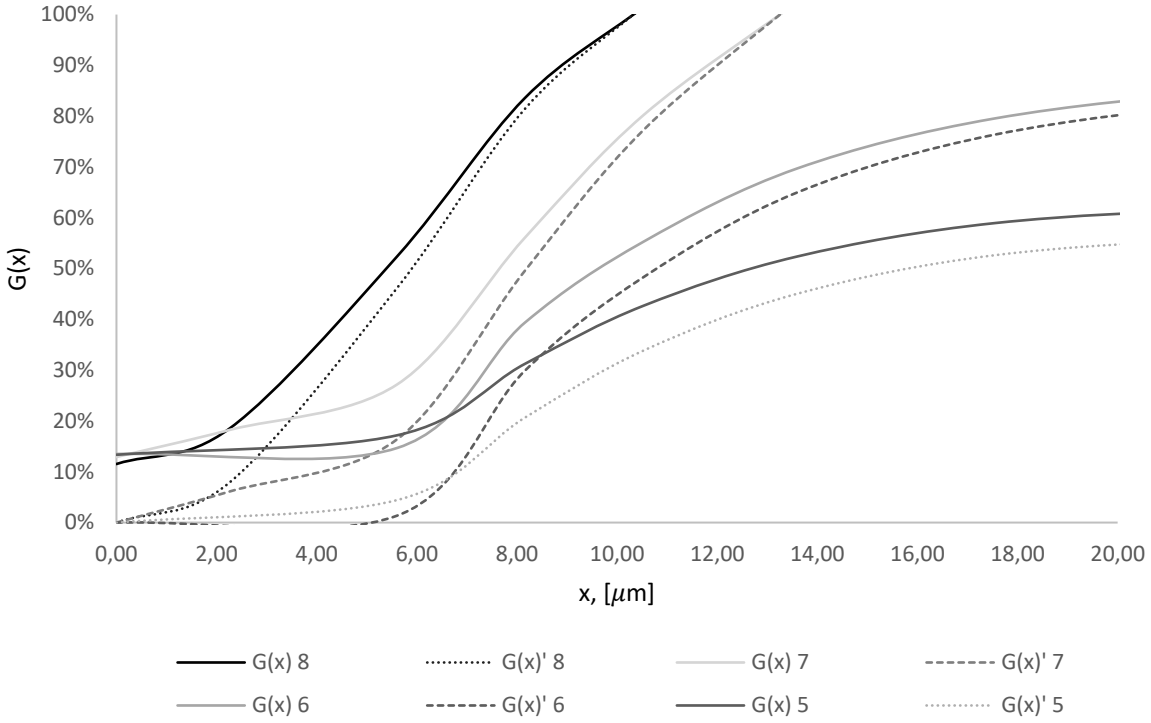
Kuva 15. Rikastushiekkanäytteiden 1-4 luokitustehokkuuden ja redusoidun luokitustehokkuuden kuvaajat.

Luokitustehokkuus kasvaa kaikilla kuvassa 15 tarkastelluilla rikastushiekkanäytteillä alussa hyvin nopeasti partikkelikokovälillä 0-20 μm. Tämän jälkeen näytteiden 2-4 luokitustehokkuus, sekä redusoitu luokitustehokkuus laskee hieman. Eniten laskee näytteen numero 4 luokitustehokkuus. Selkeää korrelaatiota kiintoainepitoisuuden ja luokitustehokkuuden tai lämpötilan ja luokitustehokkuuden välillä ei voida havaita.

Laskeuma luokitustehokkuuden käyrässä on dead flux -ilmiön aiheuttama niin sanottu fishhook-efekti. Siinä hienot partikkelit kulkeutuvat alitteeseen karkean kiintoaineen kanssa. Ilmiölle on monia mahdollisia syitä, kuten epätarkkuudet mitatuissa partikkelikokojakaumissa, kiintoaineen sisältämät eri tiheyden omaavat partikkelit ja liian suuri syöttökonsentraatio. (Zhu & Liow 2014) Ilmiö parantaa erotustehokkuutta, koska osa ylitteeseen tavallisesti kulkeutuvista hienoista partikkeleista päätyy alitteeseen.

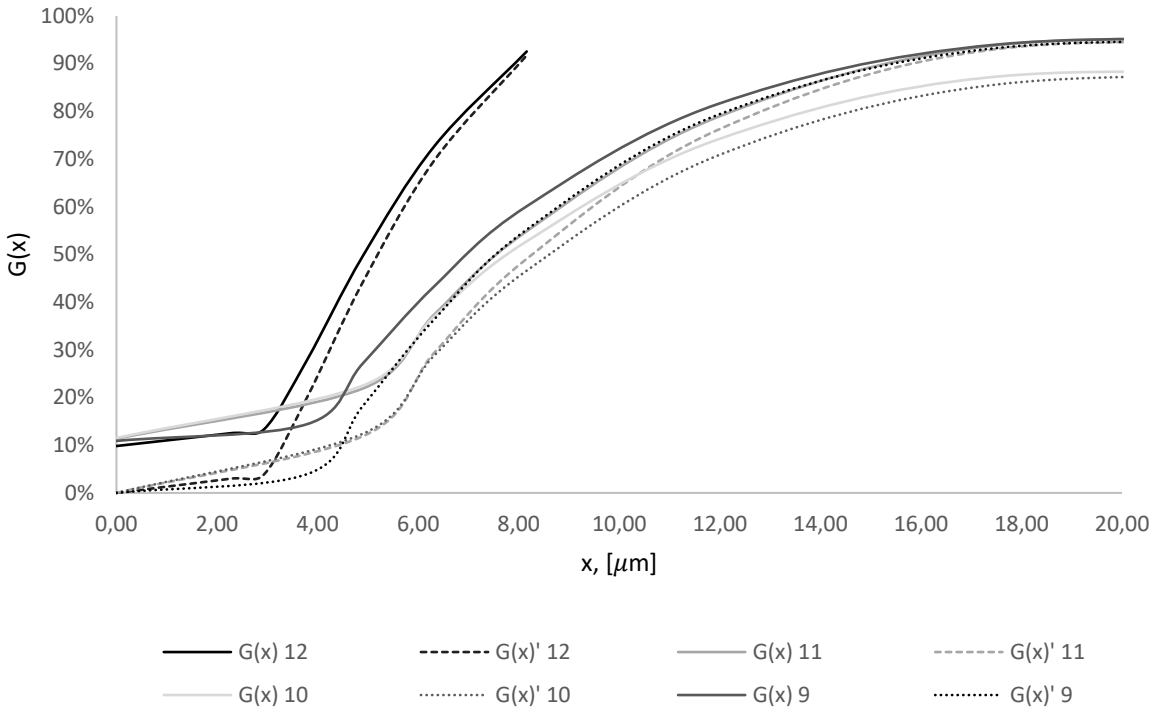
Koska fishhook-efekti ei ole havaittavissa kaikista laimeimmalle näytelietteelle 1, on oletettavaa, että syöttöpitoisuus näytteissä 2-4 on ollut liian korkea ja aiheuttanut ilmiön. Liian korkean

pitoisuuden lisäksi partikkelikokoanalyyseissä rikastushiekka aiheutti ongelmia suuren laskeutumisnopeutensa takia. Rikastushiekkanäytteessä oli myös oletettavasti epäpuhtauksia. Ilmiön tarkkaa yksittäistä aiheuttajaa on kuitenkin vaikea arvioida.



Kuva 16. Durcal 40 -kalkkinäytteiden 5-8 luokitustehokkuuksien, sekä redusoitujen luokitustehokkuuksien kuvaajat.

Kuvassa 16 esitettyjen Durcal 40 -kalkkinäytteiden 5-7 luokitustehokkuuden käyrät kääntyvät jyrkkään nousuun partikkelikokoalueella 5-6 μm. Näyte 8 kääntyy jyrkkään nousuun jo noin 1 μm partikkelikokoalueella. Luokitustehokkuuksien ja redusoitujen luokitustehokkuuksien käyrissä voidaan nähdä selkeä muutos syöttölietteen kiintoainepitoisuuden kasvaessa. Näytteet 5-7 ovat kaikki viileitä näytteitä ja niiden kiintoainepitoisuus kasvaa järjestyksessä. Luokitustehokkuuden käyristä voidaan havaita selvä korrelaatio syöttölietteiden pitoisuuden ja lämpötilan välille. Luokitustehokkuuden käyrät ovat sitä jyrkempiä, mitä suurempi kiintoainepitoisuus syöttölietteessä on. Näytteen 8 luokitustehokkuuden käyrä on verrattuna näytteen 6 käyrään selkeästi jyrkempi. Voidaan todeta, että kuvan 18 perusteella lämpötilan nostaminen parantaa Durcal 40 -näytteillä luokitustehokkuutta.



Kuva 17. Finncarb 6005 -kalkkinäytteiden 9-12 luokitustehokkuuksien ja redusoitujen luokitustehokkuuksien kuvaajat.

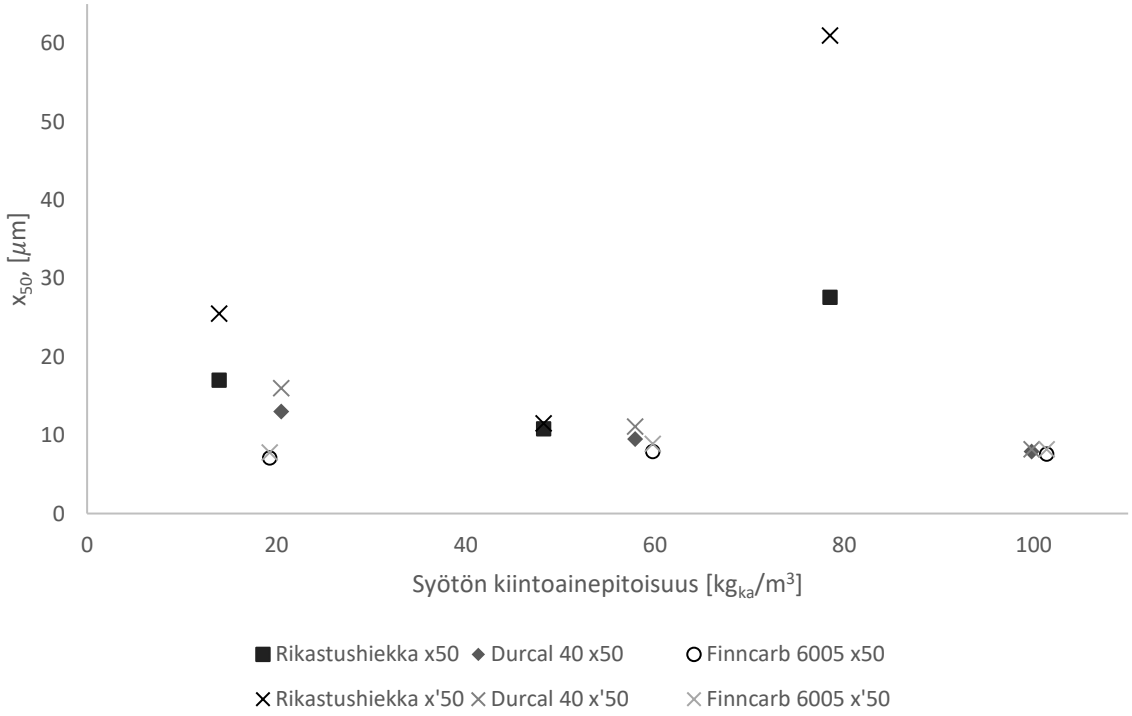
Kuvasta 17 voidaan havaita, että syöttölietteen lämpötilan nostaminen kasvattaa luokitustehokkuutta pienillä partikkelikooilla. Näytteet 10 ja 12 ovat kiintoainepitoisuudeltaan lähes samoja, mutta lämpötilaltaan erilaisia. Viileän näytteen 10 luokitustehokkuuden käyrä nousee jyrkemmin vasta partikkelikoon 5 μm kohdalla, kun taas lämpimämmän näytteen 12 luokitustehokkuuden käyrä lähtee nousuun jo partikkelikoolla 3 μm ja nousee paljon jyrkemmin.

Kuvasta 17 ei voida havaita korrelaatiota lämpötilan ja luokitustehokkuuden välillä. Tämä aiheutuu todennäköisesti siitä, että Finncarb 6005 -näyte on liian hienoa käsiteltäväksi käytetylle hydrosyklonille, jotta syöttölietteen kiintoainepitoisuuden tai lämpötilan muuttaminen vaikuttaisi luokituksen laatuun merkittävästi. Näytteiden 10 ja 11 luokitustehokkuuden käyrät kulkevat lähes päällekkäin partikkelikokoalueella 0-5 μm, jonka jälkeen näytteen 11 käyrä nousee hieman jyrkemmin. Laimeimman näytteen, eli näytteen 9 luokitustehokkuuden käyrä nousee hieman näytteiden 10 ja 11 käyriä jyrkemmin.

Vertaamalla kiintoaineita toisiinsa kuvista 15-17, voidaan nähdä, että mitä pienempi kiintoaineen keskimääräinen partikkelikoko on, sitä suurempia luokitustehokkuuden arvoja saadaan pienillä partikkelikooilla.

5.4 Syöttölietteen koostumuksen vaikutus katkaisukokoon

Katkaisukoot ovat luettu luokitustehokkuuksien käyristä ja redusoitujen katkaisukokojen arvot redusoitujen luokitustehokkuuksien käyristä. Katkaisukoot ja redusoidut katkaisukoot ovat esitetty kuvassa 18 syöttölietteen kiintoainepitoisuuden suhteen ja kuvassa 19 syöttölietteen lämpötilan suhteen.

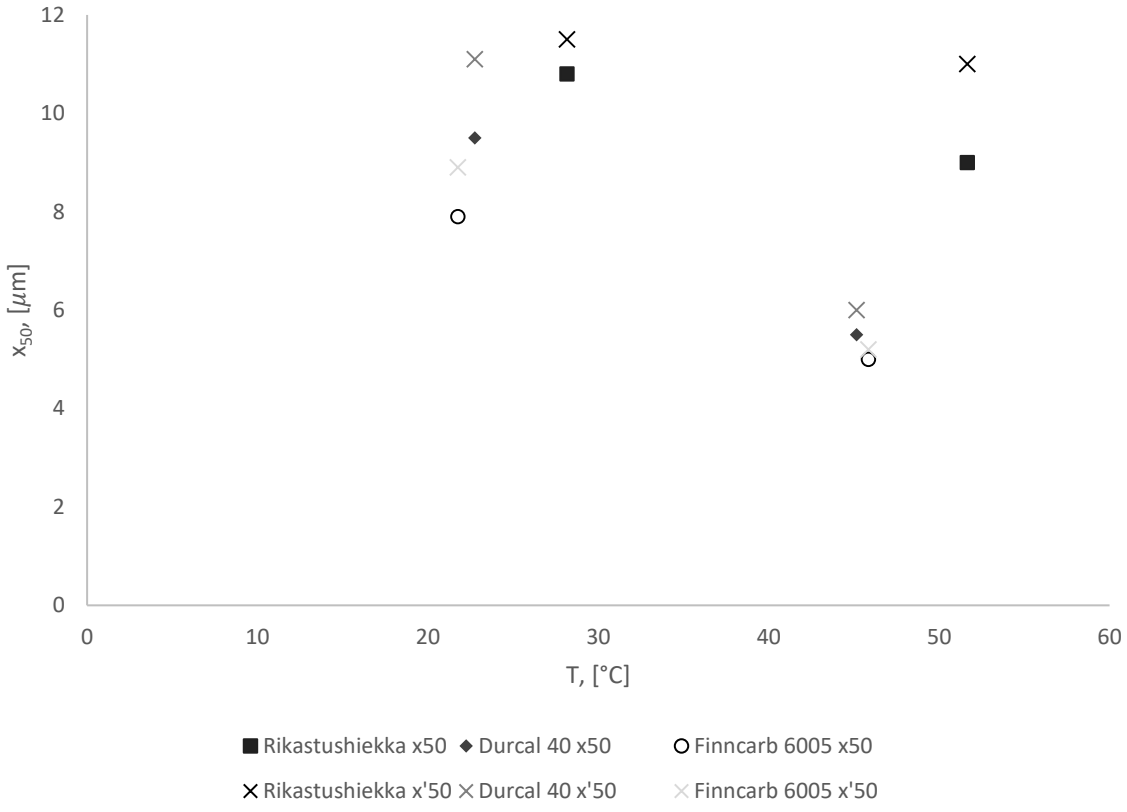


Kuva 18. Syöttölietteen kiintoainepitoisuuden vaikutus hydrosyklonin katkaisukokoon x_{50} ja redusoituun katkaisukokoon x'_{50}.

Kuvan 18 perusteella syöttölietteen kiintoainepitoisuuden kasvattaminen pienentää Durcal 40 -kalkkinäytteen katkaisukokoa. Finncarb 6005 -kalkkinäytteen katkaisukoko kasvaa hieman kiintoainepitoisuuden kasvaessa. Rikastushiekkanäytteen katkaisukoko pienenee välillä 13,9 kg_{ka}/m^3 ja 48,2 kg_{ka}/m^3 3,1 μm. Pitoisuudessa 78,5 kg_{ka}/m^3 katkaisukoko on kuitenkin selkeästi suurempi. Ongelma liittyy todennäköisesti luokitustehokkuuden kuvaajien fishhook -efektiin.

Redusoidun katkaisukoon arvot käyttäytyvät kalkkinäytteiden tapauksessa tasaisesti. Finncarb 6005 -näytteellä redusoidut katkaisukoot ovat vain hieman suuremmat kuin katkaisukokojen, mutta Durcal 40 -näytteillä ero katkaisukoon ja redusoidun katkaisukoon välillä oleva ero pienenee syöttölietteen kiintoainepitoisuuden kasvaessa. Rikastushiekkanäytteen kiintoainepitoisimman näytteen redusoitu katkaisukoko on selkeästi suurempi kuin katkaisukoko. Kaksi laimeinta näytettä kuitenkin mukailevat Durcal 40 -näytteen kanssa samanlaista trendiä.

Kuten työn kirjallisuusosiossa todettiin, teoriassa syötön kiintoainepitoisuuden kasvaessa lietteen viskositeetti laskee, jolloin katkaisukoon tulisi myös laskea. Suuri hajonta etenkin rikastushiekkanäytteiden katkaisukokojen välillä aiheutuu todennäköisesti ongelmista partikkelikokoanalyyseissä.



Kuva 19. Syöttölietteen lämpötilan vaikutus katkaisukokoon ja redusoituun katkaisukokoon.

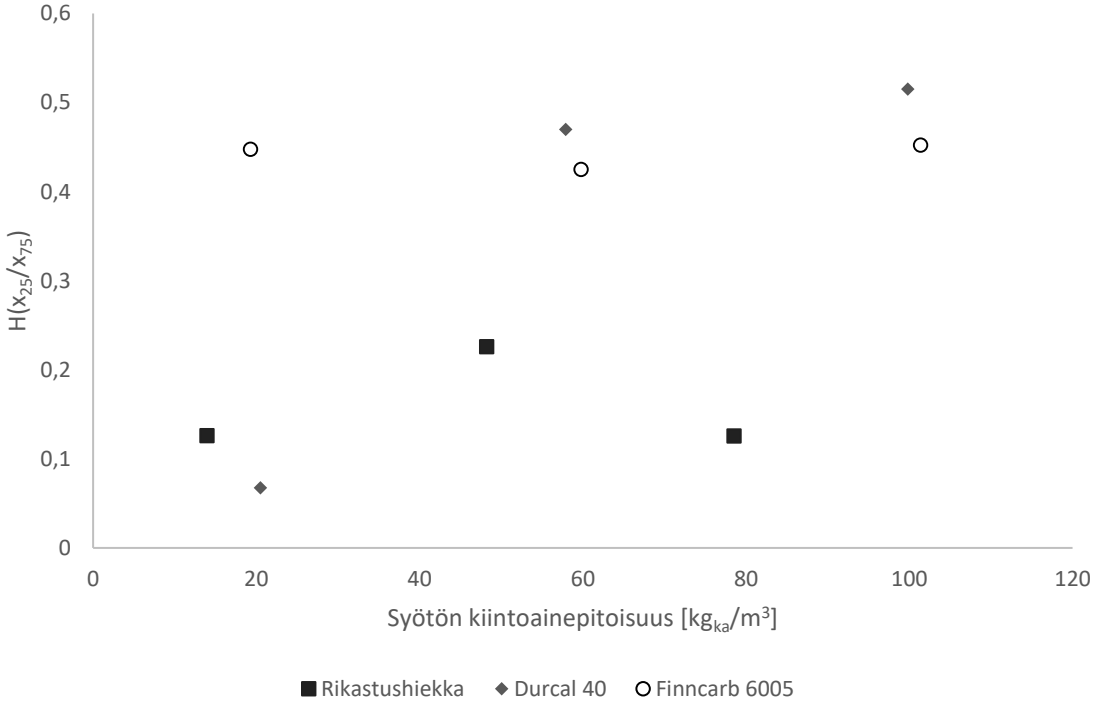
Lämpötilan vaikutus katkaisukokoon, sekä redusoituun katkaisukokoon on kuvan 19 perusteella yksiselitteinen – katkaisukoko pienenee lämpötilan noustessa. Eniten pienenee Durcal 40 -näytteen katkaisukoko lämpötilan noustessa, selkeästi vähiten rikastushiekkanäytteen.

Redusoiduissa erotustehokkuuksissa tapahtuvat muutokset ovat samanlaisia, mutta suuruusluokaltaan erilaisia. Redusoidut katkaisukoot muuttuvat enemmän kalkkinäytteillä kuin katkaisukoot. Rikastushiekkanäytteissä redusoitu katkaisukoko muuttuu kuitenkin vähemmän kuin katkaisukoko lämpötilan muuttuessa.

Syöttölietteen lämpötilan vaikutus katkaisukokoon vaikuttaa luotettavalta. Veden lämpötilan noustessa lietteen viskositeetti pienenee ja katkaisukoko pienenee (Neesse et al. 2015).

5.5 Syöttölietteen koostumuksen vaikutus luokituksen terävyyteen

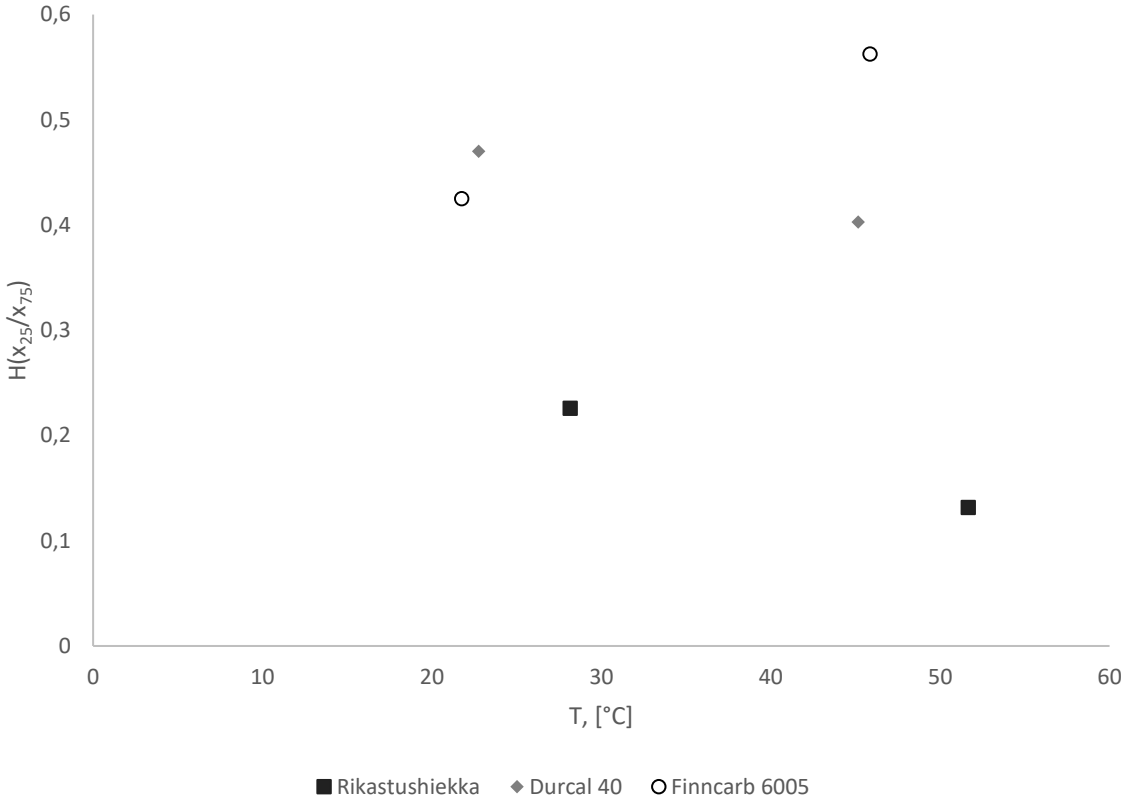
Luokituksen terävyys ratkaistiin yhtälöllä (15) luokitustehokkuuksien käyristä ratkaistuista x_{25} ja x_{75} arvoista. Kuvassa 20 on esitetty luokituksen terävyyden tulokset syöttölietteen kiintoainepitoisuuden suhteen ja kuvassa 21 lämpötilan suhteen.



Kuva 20. Syötön kiintoainepitoisuuden vaikutus luokituksen terävyyteen.

Kuvasta 20 ei voida nähdä yhtenäistä vaikutusta syötön kiintoainepitoisuuden vaikutukselle luokituksen terävyyteen. Finncarb 6005 -näytteiden luokituksen terävyys on näytteistä korkeimmalla tasolla ja samalla tasolla kaikilla syöttölietteen kiintoainepitoisuuksilla. Durcal 40 -näyt-

teillä luokituksen terävyys on kaikista pienin laimeimmalla näytteellä, mutta kaksi kiintoainepitoisempaa näytettä taas ovat kaikista näytteistä korkeimmalla tasolla. Rikastushiekkanäytteiden luokituksen terävyys on keskimääräisesti pienin ja vaihtelee tasolla 0,1-0,2 eri pitoisuuksilla.



Kuva 21. Syöttövirtauksen lämpötilan vaikutus luokituksen terävyyteen.

Kuvasta 21 ei voida tehdä yhtenäisiä johtopäätöksiä lämpötilan vaikutuksesta luokituksen terävyyteen näytteiden välillä. Rikastushiekka- ja Durcal 40 -näytteiden luokituksen terävyys laskee lämpötilan noustessa, kun taas Finncarb 6005 -näytteen luokituksen terävyys kasvaa. Tasoltaan rikastushiekan luokituksen terävyys on pienin. Kalkkinäytteiden luokituksen terävyydet ovat samalla tasolla.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn kirjallisuusosan tarkoituksena oli tutkia mitä eri parametreja hydrosyklonin tehokkuuden ja toiminnan laadun tarkastelemiseksi on ja miten eri erotustehokkuuden laskentamenetelmät eroavat toisistaan. Kokeellisessa osassa tutkittiin valittujen parametrien avulla, miten hydrosyklonin syöttölietteen partikkelikoko, lämpötila ja kiintoainepitoisuus vaikuttavat hydrosyklonin toiminnan laatuun.

Hydrosyklonin toiminnan laatua kuvaavia parametreja on lukuisia. Erotuksen tehokkuutta kuvaa se, kuinka hyvin kiintoaine palautuu hydrosyklonissa alitevirtaan. Luokituksen tehokkuutta kuvaa taas luokituksen terävyys. Näiden lisäksi työssä tutkittiin luokitustehokkuutta, sakeutussuhdetta ja katkaisukokoa sekä näitä vastaavia redusoidut parametreja. Redusoidut parametrit korjaavat hydrosyklonissa tapahtuvaa ns. dead flux -ilmiötä, jossa alitevirtaan päätyy pieniä, ylitevirtaan kuuluvia partikkeleita.

Työssä saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että syöttölietteen partikkelikoon vaikutus erotustehokkuuteen, luokitustehokkuuteen, sakeutussuhteeseen, katkaisukokoon ja vastaaviin redusoituihin parametreihin on kaikista merkittävin. Erotustehokkuus, katkaisukoko ja sakeutussuhde kasvavat partikkelikoon kasvaessa. Syöttölietteen keskimääräinen partikkelikoko on myös merkittävin tekijä luokituksen onnistumisen kannalta. Vain sopivalla syöttölietteen partikkelikoolla syötön kiintoainepitoisuuden kasvattaminen, sekä lämpötilan nostaminen kasvattavat luokitustehokkuutta.

Tuloksista voidaan havaita myös, että sakeutussuhde, katkaisukoko ja erotustehokkuus laskevat syöttölietteen kiintoainepitoisuuden kasvaessa. Syöttölietteen lämpötilan nostaminen kasvattaa taas erotustehokkuutta, sakeutussuhdetta ja pienentää katkaisukokoa. Yhtenäistä syöttölietteen lämpötilan ja kiintoainepitoisuuden vaikutukselle sakeutussuhteeseen, katkaisukokoon ja erotustehokkuuteen on se, että partikkelikoko vaikuttaa merkittävästi vaikutuksen suuruuteen. Syöttölietteen kiintoainepitoisuuden vaikutus oli sitä suurempi, mitä suurempaa partikkelikokoa käsiteltiin, kun taas lämpötilan vaikutus oli sitä suurempi, mitä pienempiä partikkelikokoa käsiteltiin. Lietteen lämpötilan nostamisen vaikutus perustuu siihen, että lietteen viskositeetti laskee lämpötilan noustessa. Tällöin partikkeleiden laskeutumisnopeus ja lietteen tangentiaalinen

nopeus kasvavat hydrosyklonissa, sekä ilmasydän ja lietteen pyörimisliike muodostuvat paremmin (Neesse et al. 2015; Tian et al. 2018).

Erotustehokkuuden laskentamenetelmistä yhtälö (1) tuottaa keskimäärin korkeimmat tulokset ja yhtälö (4) matalimmat. Yhtälöllä (3) ratkaistut erotustehokkuudet poikkesivat muista käytetyistä menetelmistä. Svarovsky (1984) on myös todennut yhtälön (3) tuottavan suurimmat virheet erotustehokkuutta laskettaessa.

Tutkittujen hydrosyklonin hyvyyttä kuvaavien parametrien perusteella voidaan todeta, että syöttölietteen partikkelikoon vaikutus on kaikista merkittävin tutkituista käyttöparametreista. Partikkelikoko vaikuttaa myös, miten hydrosyklonin toiminnan laatu muuttuu syöttölietteen lämpötilaa tai kiintoainepitoisuutta muutettaessa. Saatujen tulosten perusteella voidaan sanoa, että optimiolosuhteet, joissa hydrosykloni toimii parhaiten, ovat jokaiselle lietteelle erilaiset.

Jatkotutkimusaiheina tulisi selvittää tarkemmin syötön optimiolosuhteita laajemmilla koesarjoilla, sekä useilla rinnakkaisnäytteillä. Syöttölietteen kiintoainepitoisuuksia tulisi valita kokeisiin laajemmalta alueelta, sekä valita useampia tutkittavia lämpötiloja. Lisäksi kokeita tulisi suorittaa eri kokoisilla hydrosykloneilla. Etenkin Finncarb 6005 -näytettä tulisi tutkia pienemmällä hydrosyklonilla, joka voisi sopia paremmin lietteen käsittelemiseen. Kokeissa voitaisiin tutkia myös tarkemmin syytä rikastushiekkanäytteitä käsiteltäessä aiheutuneelle dead flux -ilmiölle.

7 LÄHDELUETTELO

Bernhardt, C. 1994. *Particle size analysis: Classification and sedimentation methods*. London: Chapman & Hall. 428 s. ISBN 0-412-55880-7

Coulson, J. M. & Richardson, J. F. 1991. *Chemical engineering*: *Vol. 2, Particle Technology and Separation Processes*. 4. ed. Oxford: Pergamon Press. 979 s. ISBN 0-08-037957-5

Coulson, J. M. & Richardson, J. F. 1993. *Chemical engineering*: *Vol. 6, Chemical Engineering Design*. 2. ed. Oxford: Butterworth Heinemann. 966 s. ISBN 0-7506-2558-9

Cilliers, J. J. & Harrison, S. T. L. 1997. *The application of mini-hydrocyclones in the concentration of yeast suspensions*. Chemical Engineering Journal. Vol. 65:1. S. 21-26. ISSN 1385-8947

Endres, E., Dueck, J. & Neesse, Th. 2012. *Hydrocyclone classification of particles in the micron range*. Minerals Engineering. Vol. 31. S. 42-45. ISSN 0892-6875

Holdich, R., G. 2002. *Fundamentals of Particle Technology*. United Kingdom: Midland Information Technology and Publishing. 173 s. ISBN 0-9543881-0-0

Hukki, R. T. 1964. *Mineraalien hienonnus ja rikastus.* Keuruu: Otava. 656 s.

Huusari, L. 2013. *Laboratoriokäyttöön soveltuvan syklonin suunnittelu*. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Kemiantekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta. 40 s.

Kwon, K., Kim, H., Kim, W. & Lee, J. 2019. *Efficient Nitrogen Removal of Reject Water Generated from Anaerobic Digester Treating Sewage Sludge and Livestock Manure by Combining Anammox and Autotrophic Sulfur Denitrification Processes*. Water. Vol. 11:2. S. 204. ISSN 2073-4441

Ko, M., Chen, Y. & Wei, P. 2013. *Recycling of municipal solid waste incinerator fly ash by using hydrocyclone separation*. Waste Manage. Vol. 33. S. 615-620. ISSN 0262-4079

Malvern Panalytical. *Hydro EV*. [ONLINE]. Saatavissa: https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/mastersizer-range/mastersizer-3000/accessories/hydro-ev [viitattu 29.3.2019]

Malvern Panalytical. *Mastersizer 3000*. [ONLINE]. Saatavissa: https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/mastersizer-range/mastersizer-3000 [viitattu 29.3.2019]

McCabe, W. L., Smith, J. C. & Harriot, P. 2005, *Unit Operations of Chemical Engineering*, 7th ed. New York, USA: McGraw-Hill. 1140 s. ISBN 007-124710-6

Neesse, Th., Dueck, J., Schwemmer, H. & Farghaly, M. 2015. *Using a high pressure hydrocyclone for solids classification*. Minerals Engineering. Vol. 71. S. 85-88. ISSN 0892-6875

Niazi, S., Habibian, M. & Rahimi, M. 2017. *Performance evaluation of a uniflow mini-hydrocyclone for removing fine heavy metal particles from water*. Chemical Engineering Research and Design. Vol. 126. S. 89-96. ISSN 0263-8762

Nyman, T. 2016. *Jauhatusparametrien vaikutus jauhatustuotteen partikkelikokoon ja suodattuvuuteen*. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, kemiantekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta. 77 s.

Patra, G., Barnwala, R., Beheraa, S. K. & Meikapab, B.C. 2018. *Removal of dyes from aqueous solution by sorption with fly ash using a hydrocyclone*. Journal of Environmental Chemical Engineering. Vol. 6:4. S. 5204-5211. ISSN 2213-3437

PubChem. *Calsium Carbonate (Compound)*. [ONLINE]. Saatavissa: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/10112#section=Top [viitattu 30.3.2019]

Purchas, D. B. 1981, *Solid/Liquid Separation Technology*, Croydon: Uplands Press. 717 s.

Purchas, D. B. & Wakeman R. J. 1986, *Solid/Liquid Separation Equipment Scale-Up*, 2. ed. London: Uplands Press. 749 s.

Päätös nro. 110/09/2. 2009. Itä-Suomen Ympäristövirasto. *Ympäristölupapäätöksen nro. 53/02/2, 17.10.2002 muuttaminen rikastushiekkaa koskevien määräysten osalta ja toiminnan aloittamislupa, Lappeenranta*. [ONLINE]. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B28B0DF2F-F4FB-4F21-813A-BAC0533872EE%7D/84479 [viitattu 29.4.2019].

Razmi, H., Goharrizi, AS. & Mohebbi, A. 2019. *CFD simulation of an industrial hydrocyclone based on multiphase particle in cell (MPPIC) method*. Separation and Purification Technology. Vol. 209. S. 851-862. ISSN 1383-5866

Suokas, P. 2017. *Fractionation of tailings*. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, kemiantekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta. 74 s.

Svarovsky, L. 1984. *Hydrocyclones*. London: Holt, Rinehart and Winston. 198 s. ISBN 0-03-910562-8

Tian, J., Ni, L., Song, T., Olson, J. & Zhao, J. 2018. *An overview of operating parameters and conditions in hydrocyclones for enhanced separations*. Separation and Purification Technology. Vol. 206. S. 268-285. ISSN 1383-5866

Wills, B. A. & Napier-Munn, T. 2006, *Wills' Mineral Processing Technology*, 7th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann. 438 s. ISBN 978-7506-4450-1

Zhu, G. & Liow J-L. 2014. *Experimental study of particle separation and the fishhook effect in a mini-hydrocyclone*. Chemical Engineering Science. Vol. 111. S. 94-105. ISSN 0009-2509

8 LIITTEET

LIITE I Mittauspöytäkirjat ja laskennan tulokset

LIITE II Partikkelikokoanalyysien tulokset kumulatiivisina jakaumina

LIITE III Partikkelikokoanalyysien tulokset tilavuusjakaumin

Näytteiden alku- ja loppulämpötilat, sekä tilavuusvirtauksien näytteen ottoon kuluneet ajat ja lasketut tilavuusvirtaukset.

Näytenro.	**T_{alku}, °C**	**T_{loppu}, °C**	**Aika, s**	**Q_{ylite}, l/s**	**Q_{alite}, l/s**
1	21,7	28,3	4,0	0,41	0,068
2	25,5	30,8	3,3	0,47	0,088
3	24,3	29,0	3,7	0,48	0,090
4	52,7	50,6	3,0	0,47	0,098
5	17,6	22,3	3,0	0,47	0,073
6	18,5	27,0	3,0	0,46	0,071
7	18,5	26,5	3,0	0,49	0,073
8	45,7	44,6	3,0	0,49	0,064
9	19,1	24,5	3,0	0,49	0,061
10	20,0	23,5	3,2	0,45	0,059
11	18,4	23,1	3,2	0,47	0,060
12	46,3	45,4	3,1	0,44	0,048

Näytteiden kiintoainepitoisuudet.

Näyte nro.	**Näyte**	**m_{kuppi}, g**	**$m_{kuppi+näyte}$, g**	**$m_{kuiva\ näyte\ +\ kuppi}$, g**	**c, kg_{ka}/m^3**
1	Syöttö 1/2	6,81	162,12	9,15	15,17
	Syöttö 2/2	6,71	178,31	8,88	12,72
	Ylite 1/2	6,78	235,3	7,14	1,57
	Ylite 2/2	6,7	218,1	7,07	1,75
	Alite 1/2	6,71	113,63	22,5	162,89
	Alite 2/2	6,67	121,32	24,7	174,66
2	Syöttö 1/2	6,74	144,39	12,82	45,30
	Syöttö 2/2	6,81	186,6	15,74	51,13
	Ylite 1/2	6,69	152,06	7,4	4,88
	Ylite 2/2	6,78	136,84	7,46	5,23
	Alite 1/2	6,74	117,13	47,75	487,77
	Alite 2/2	6,68	104,78	43,61	496,37
3	Syöttö 1/2	6,67	202,23	21,67	80,46
	Syöttö 2/2	6,75	193,23	20,39	76,54
	Ylite 1/2	6,76	100,41	7,47	7,59
	Ylite 2/2	6,69	132,1	7,81	8,95
	Alite 1/2	6,66	118,06	61,77	726,38
	Alite 2/2	6,76	121,25	57,92	627,41

Näytteiden kiintoainepitoisuudet.

Näyte nro.	**Näyte**	**m_{kuppi}, g**	**$m_{kuppi+näyte}$, g**	**$m_{kuiva\ näyte\ +\ kuppi}$, g**	**c, kg_{ka}/m^3**
4	Syöttö 1/2	6,69	179,93	17,09	61,73
	Syöttö 2/2	6,83	160,19	13,63	45,11
	Ylite 1/2	6,76	145,66	7,7	6,72
	Ylite 2/2	6,76	98,27	7,32	6,07
	Alite 1/2	6,73	154,65	75,37	657,47
	Alite 2/2	6,82	116,05	53,31	582,12
5	Syöttö 1/2	6,78	205,34	10,77	20,32
	Syöttö 2/2	6,7	178,68	10,22	20,70
	Ylite 1/2	6,74	272,45	7,81	4,03
	Ylite 2/2	6,86	260,43	7,88	4,03
	Alite 1/2	6,65	125,62	23,38	154,00
	Alite 2/2	6,76	124,02	24,2	163,79
6	Syöttö 1/2	6,69	163,75	15,49	57,95
	Syöttö 2/2	6,7	180,24	16,41	57,87
	Ylite 1/2	6,75	252,95	9,9	12,87
	Ylite 2/2	6,66	284,38	11,46	17,43
	Alite 1/2	6,74	128,01	48,28	435,75
	Alite 2/2	6,75	168,13	61,47	430,14
7	Syöttö 1/2	6,68	207,26	25,12	97,36
	Syöttö 2/2	6,81	248,28	30,05	102,22
	Ylite 1/2	6,78	303,66	13,27	22,12
	Ylite 2/2	6,69	224,43	11,45	22,12
	Alite 1/2	6,7	108,98	57,82	727,65
	Alite 2/2	6,79	156,26	80,62	715,27
8	Syöttö 1/2	6,64	229,88	18,72	55,48
	Syöttö 2/2	6,73	185,19	16,66	57,11
	Ylite 1/2	6,66	166,12	8,47	11,32
	Ylite 2/2	6,69	224,25	9,24	11,69
	Alite 1/2	6,74	103,27	43,3	493,14
	Alite 2/2	6,67	122,68	49,23	473,01

Näytteiden kiintoainepitoisuudet.

Näyte nro.	**Näyte**	**m_{kuppi}, g**	**$m_{kuppi+näyte}$, g**	**$m_{kuiva\ näyte\ +\ kuppi}$, g**	**c, kg_{ka}/m^3**
9	Syöttö 1/2	6,65	221,23	10,72	19,16
	Syöttö 2/2	6,66	235,34	11,05	19,39
	Ylite 1/2	6,75	138,26	8,3	11,85
	Ylite 2/2	6,67	220,35	8,99	10,91
	Alite 1/2	6,74	180,88	22,52	95,91
	Alite 2/2	6,67	140,25	18,11	90,35
10	Syöttö 1/2	6,67	238,91	20,06	59,71
	Syöttö 2/2	6,79	234,35	19,94	59,85
	Ylite 1/2	6,77	182,03	12,88	35,57
	Ylite 2/2	6,80	297,88	16,83	35,15
	Alite 1/2	6,78	133,34	37,43	285,36
	Alite 2/2	6,69	149,9	40,22	274,23
11	Syöttö 1/2	6,75	240,27	29,07	101,55
	Syöttö 2/2	6,75	203,99	25,54	101,19
	Ylite 1/2	6,75	180,03	17,36	63,58
	Ylite 2/2	6,67	148,28	15,28	63,12
	Alite 1/2	6,69	165,11	62,15	448,84
	Alite 2/2	6,81	177,48	64,57	429,84
12	Syöttö 1/2	6,75	242,85	20,3	58,98
	Syöttö 2/2	6,67	270,67	21,9	59,30
	Ylite 1/2	6,69	117,92	9,9	29,11
	Ylite 2/2	6,66	200,11	12,21	28,94
	Alite 1/2	6,62	138,9	51,09	423,33
	Alite 2/2	6,71	178,08	61,5	397,31

Kiintoaineiden tiheyden määrityksen tulokset.

	T, °C	**m_p, g**	**m_{p+s}, g**	**m_s, g**	**m_{kaikki}, g**	**m_{H2O}, g**	**V_{H20}, cm^3**	**V_s, cm^3**	**ρ_s, g/cm^3**
Rikas-tus-hiekka	19,6 18,2	43,616 43,643	82,964 91,366	39,348 47,722	169,535 175,031	86,571 83,665	86,843 83,928	13,865 16,780	2,838 2,844
Dur-cal 40	21,3 20,2	43,668 43,568	84,036 66,429	40,368 22,861	169,499 158,409	85,463 91,980	85,720 92,243	14,988 8,465	2,693 2,701
Finn-carb 6005	20,2 20,4	43,601 43,555	58,544 54,183	14,943 10,627	153,479 150,703	94,935 96,521	95,207 96,797	5,501 3,911	2,716 2,717

Luokitustehokkuuden kuvaajista luetut x_{25}, x_{50}, x_{75} ja x'_{50} arvot.

Näytenumero	**x_{25}, μm**	**x_{50}, μm**	**x_{75}, μm**	**x_{50}, μm**
1	7,5	17,0	59,5	25,5
2	3,5	10,8	15,5	11,5
3	10,5	27,6	83,5	61,0
5	2,5	9,0	19,0	11,0
6	7,1	13,0	105,0	16,0
7	7,0	9,5	14,9	11,1
8	5,1	7,9	9,9	8,2
9	2,9	5,5	7,2	6,0
10	4,7	7,1	10,5	7,8
11	5,1	7,9	12,0	8,9
12	5,2	7,6	11,5	8,2
13	3,6	5,0	6,4	5,2

Erotustehokkuudet laskettuina yhtälöillä (1), (3) ja (4).

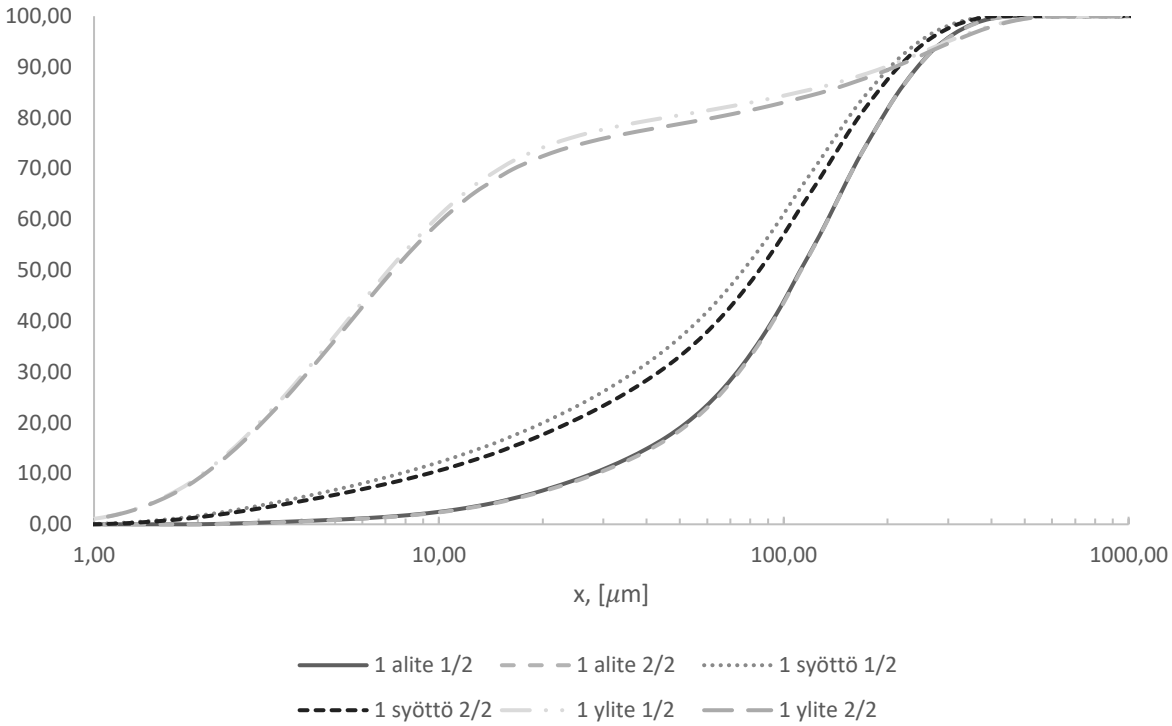
Näytenumero	**E_T (1), %**	**E_T (3), %**	**E_T (4), %**
1	94,4	81,7	81,8
2	94,9	93,2	83,0
3	93,8	82,1	82,3
4	95,2	90,8	82,7
5	85,9	63,5	72,4
6	81,7	74,8	67,7
7	82,9	87,8	71,8
8	84,5	91,6	73,5
9	50,1	52,8	37,2
10	50,8	46,0	37,6
11	47,0	48,7	35,0
12	60,6	71,8	47,9

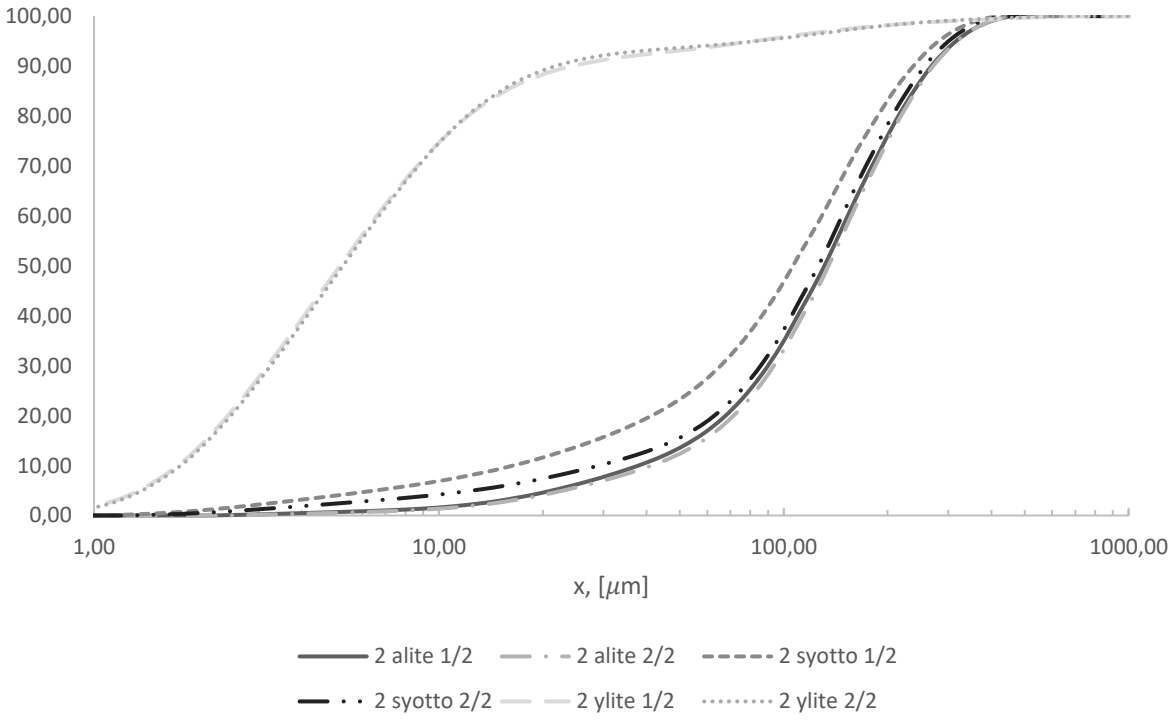
Redusoidut erotustehokkuudet ratkaistuina yhtälöillä (1), (3) ja (4).

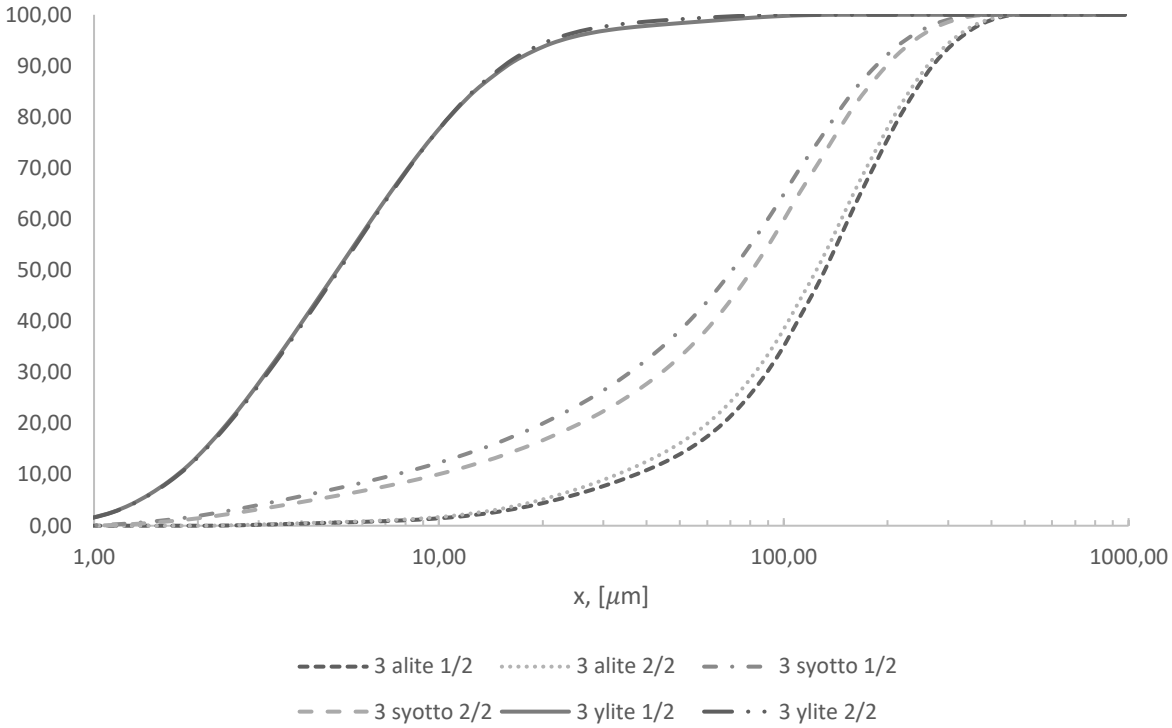
Näytenumero	**E'_T (1), %**	**E'_T (3), %**	**E'_T (4), %**
1	93,5	79,0	78,8
2	93,9	91,7	79,8
3	92,7	78,6	79,0
4	94,3	89,1	79,1
5	83,7	57,9	68,1
6	78,9	70,9	62,7
7	80,3	86,0	67,7
8	82,5	90,5	70,1
9	44,0	47,2	29,5
10	44,3	39,0	29,5
11	40,2	42,5	26,7
12	56,3	68,9	42,3

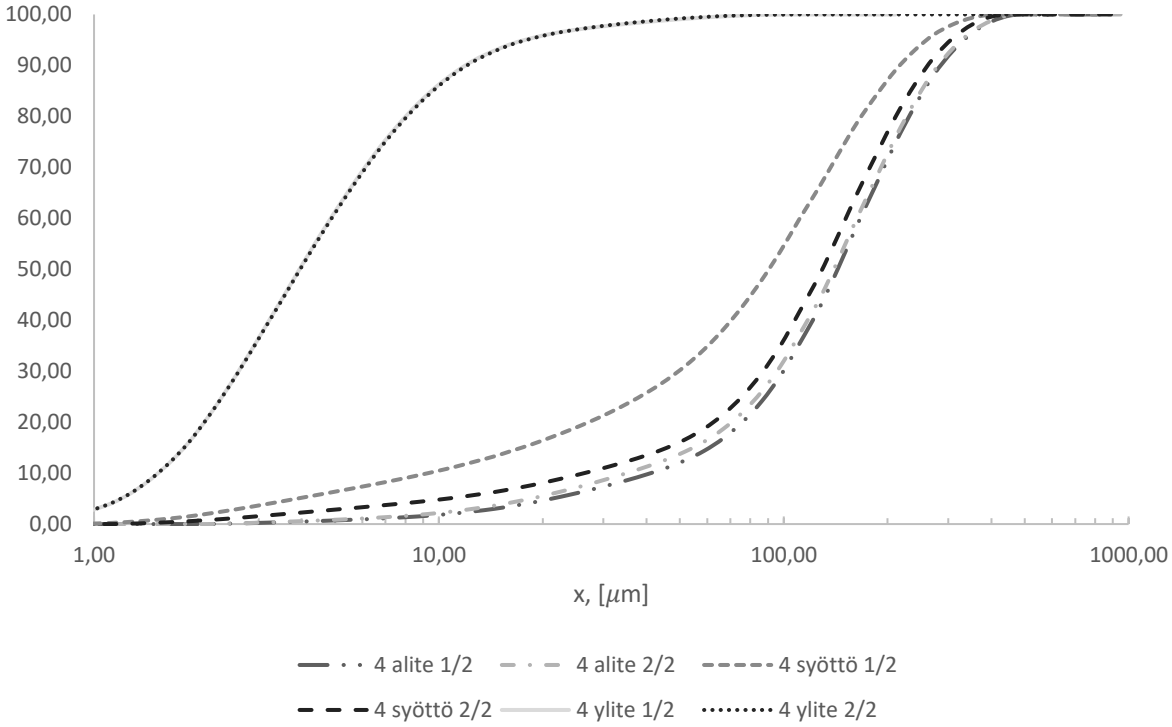
Lasketut sakeutussuhteet ja luokituksen terävyydet.

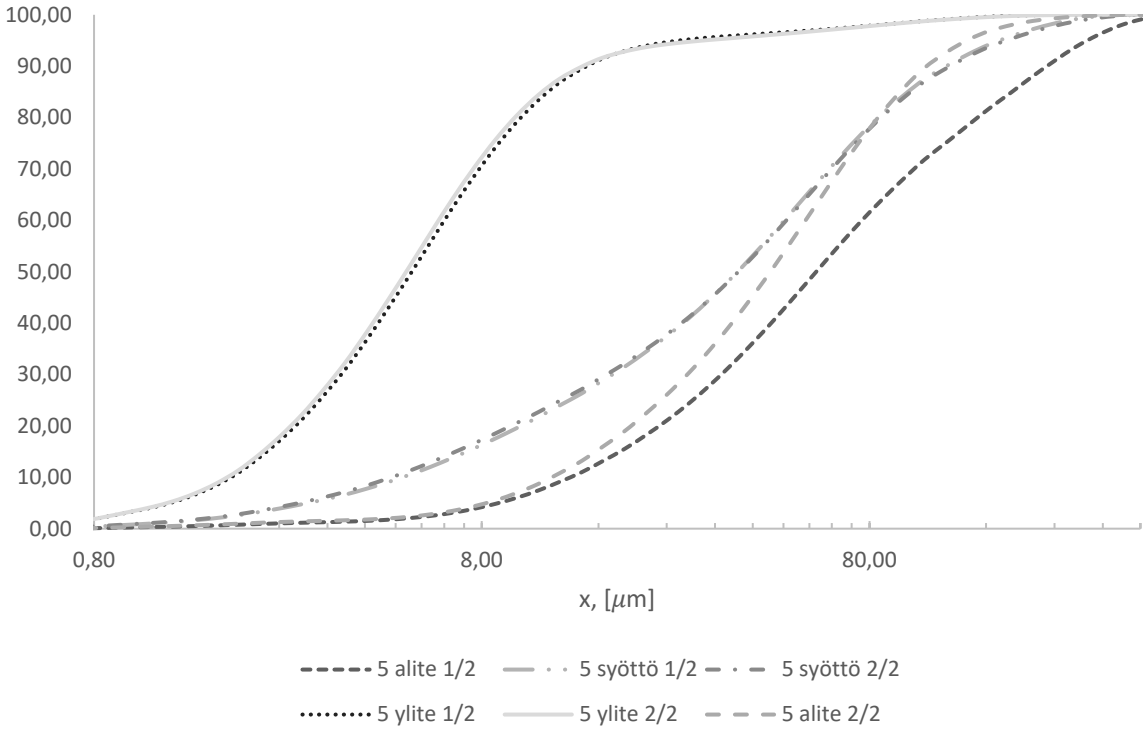
Näytenumero	**ζ**	**$H(x_{25}/x_{75})$**
1	12,2	0,13
2	10,2	0,23
3	8,6	0,13
4	11,8	0,13
5	7,7	0,068
6	7,6	0,47
7	7,2	0,52
8	8,6	0,40
9	4,8	0,45
10	4,7	0,43
11	4,3	0,45
12	6,9	0,56

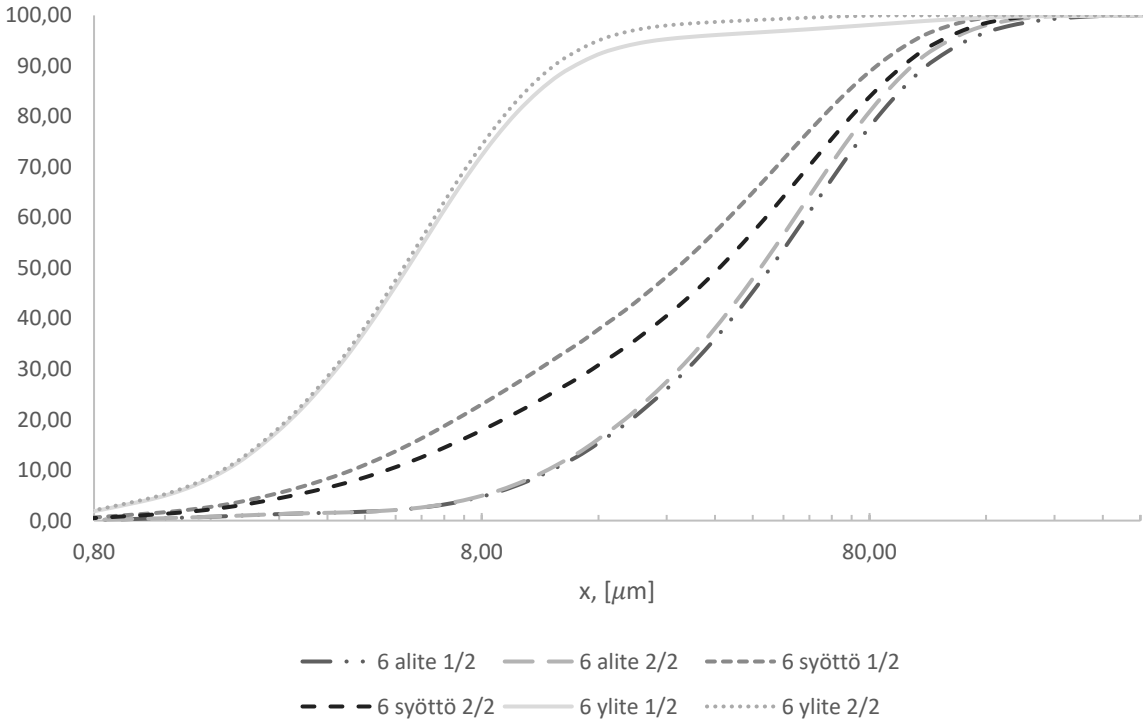

100,00
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
1,00
10,00
100,00
1000,00
x, [μm]
1 alite 1/2
1 alite 2/2
1 syöttö 1/2
1 syöttö 2/2
1 ylite 1/2
1 ylite 2/2

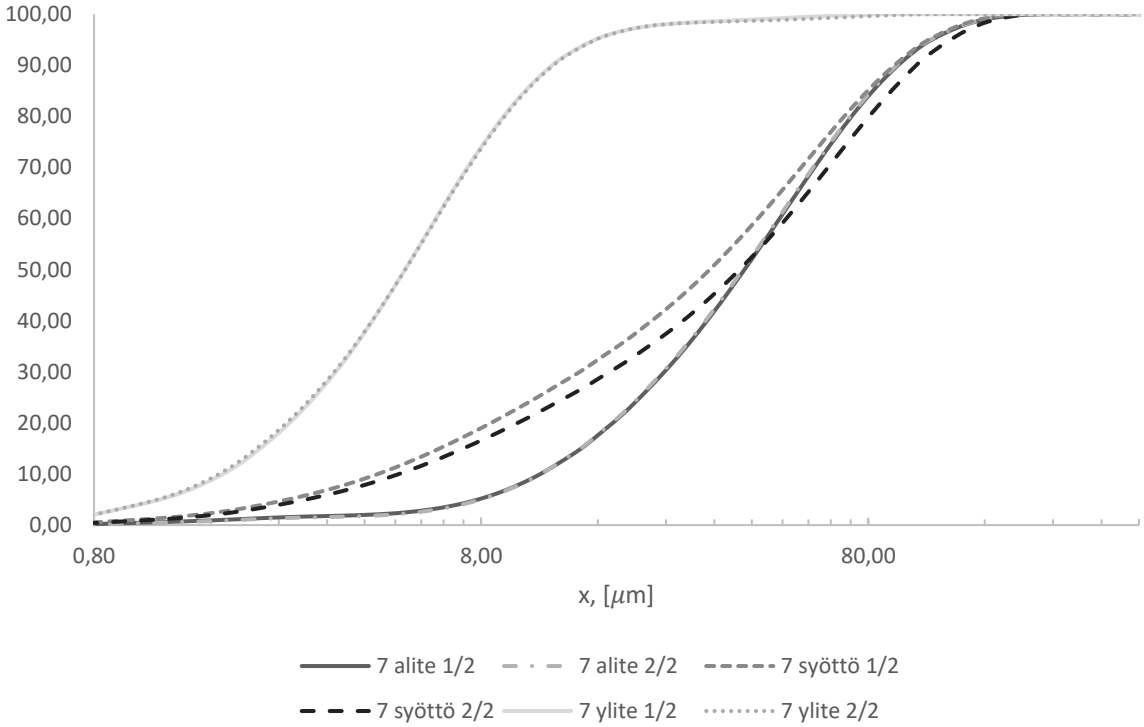

100,00
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
1,00
10,00
100,00
1000,00
x, [μm]
2 alite 1/2
2 alite 2/2
2 syotto 1/2
2 syotto 2/2
2 ylite 1/2
2 ylite 2/2

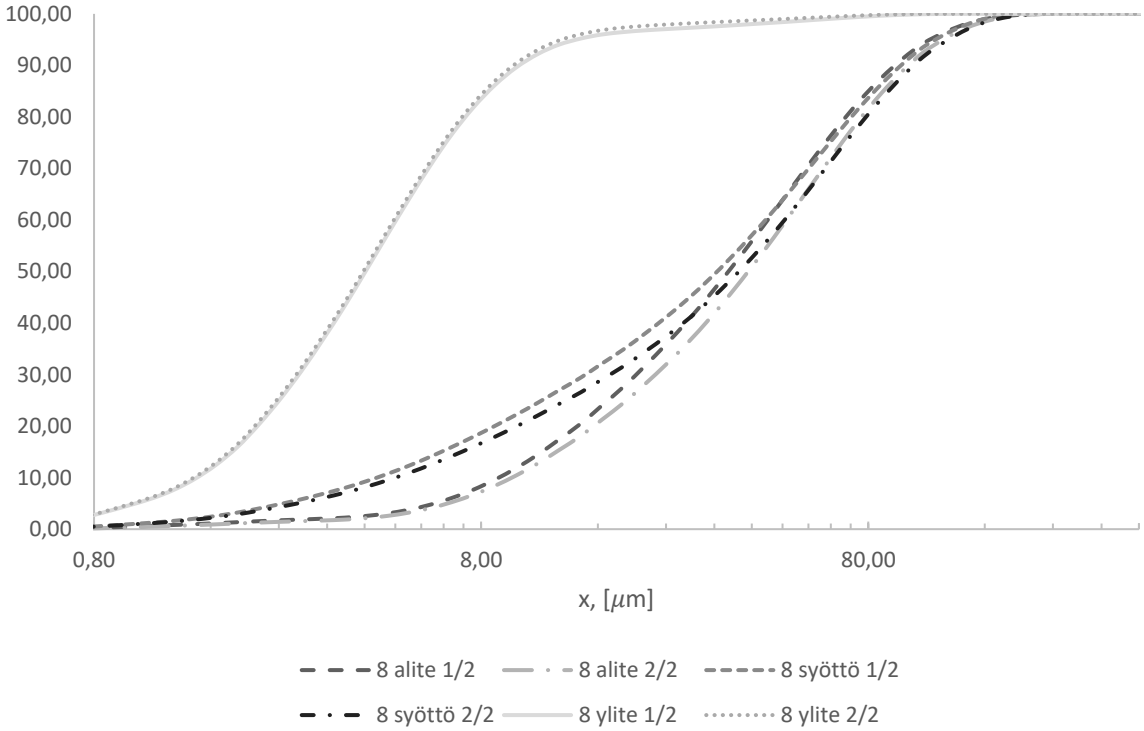

100,00
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
1,00
10,00
100,00
1000,00
x, [μm]
3 alite 1/2
3 alite 2/2
3 syotto 1/2
3 syotto 2/2
3 ylite 1/2
3 ylite 2/2

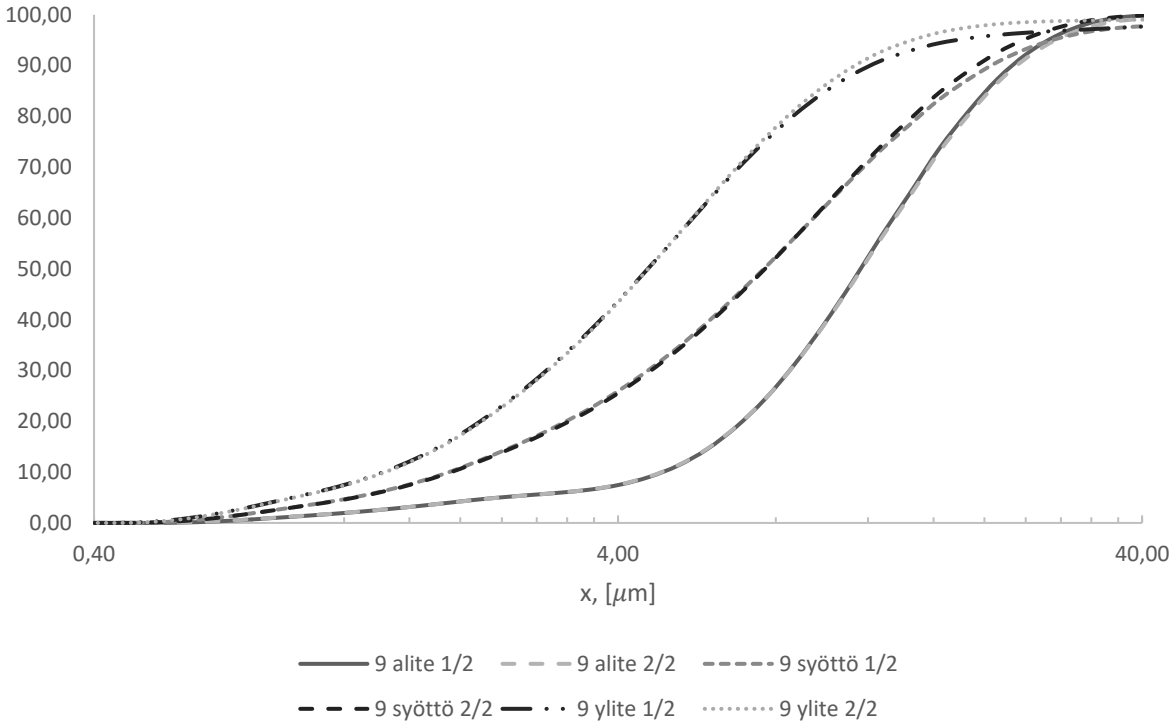

100,00
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
1,00
10,00
100,00
1000,00
x, [μm]
4 alite 1/2
4 alite 2/2
4 syöttö 1/2
4 syöttö 2/2
4 ylite 1/2
4 ylite 2/2

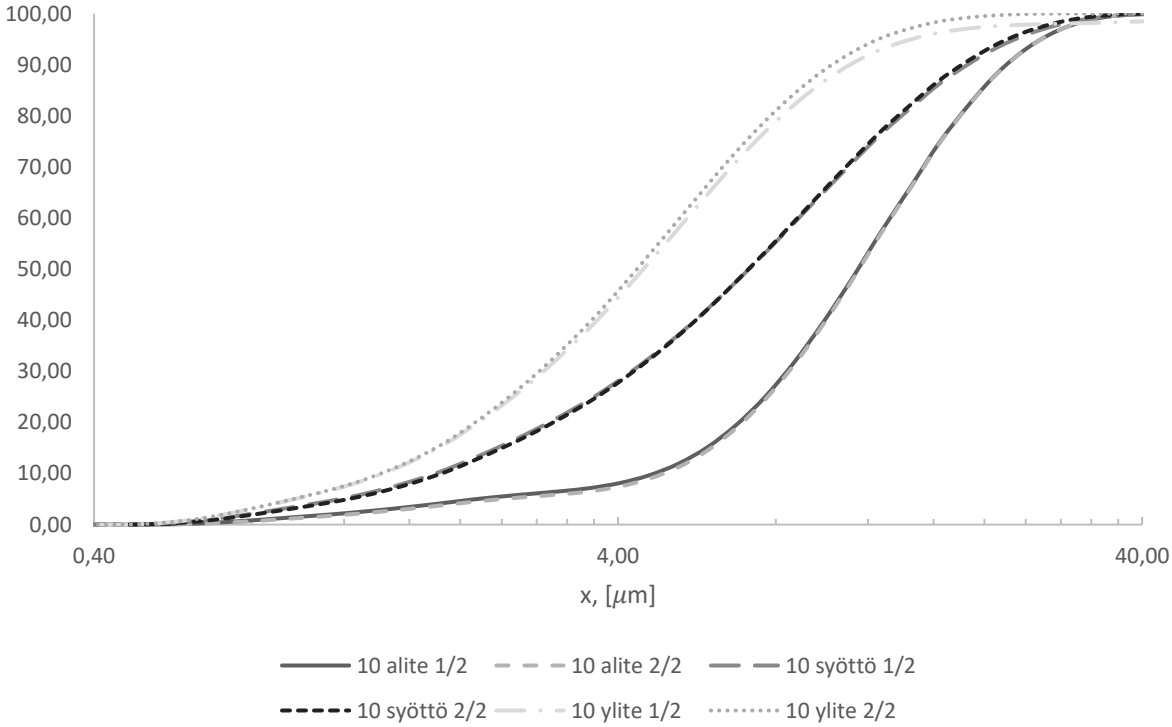

100,00
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
0,80
8,00
80,00
x, [µm]
5 alite 1/2
5 syöttö 1/2
5 syöttö 2/2
5 ylite 1/2
5 ylite 2/2
5 alite 2/2

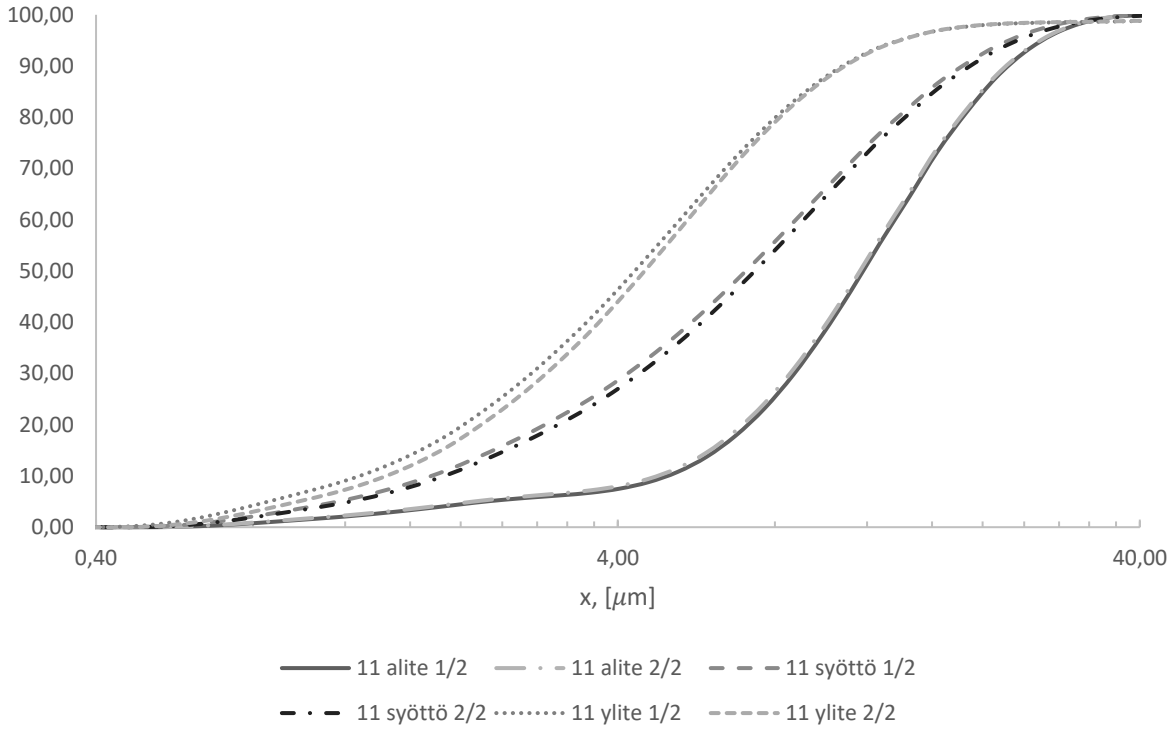

100,00
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
0,80
8,00
80,00
x, [µm]
6 alite 1/2
6 alite 2/2
6 syöttö 1/2
6 syöttö 2/2
6 ylite 1/2
6 ylite 2/2

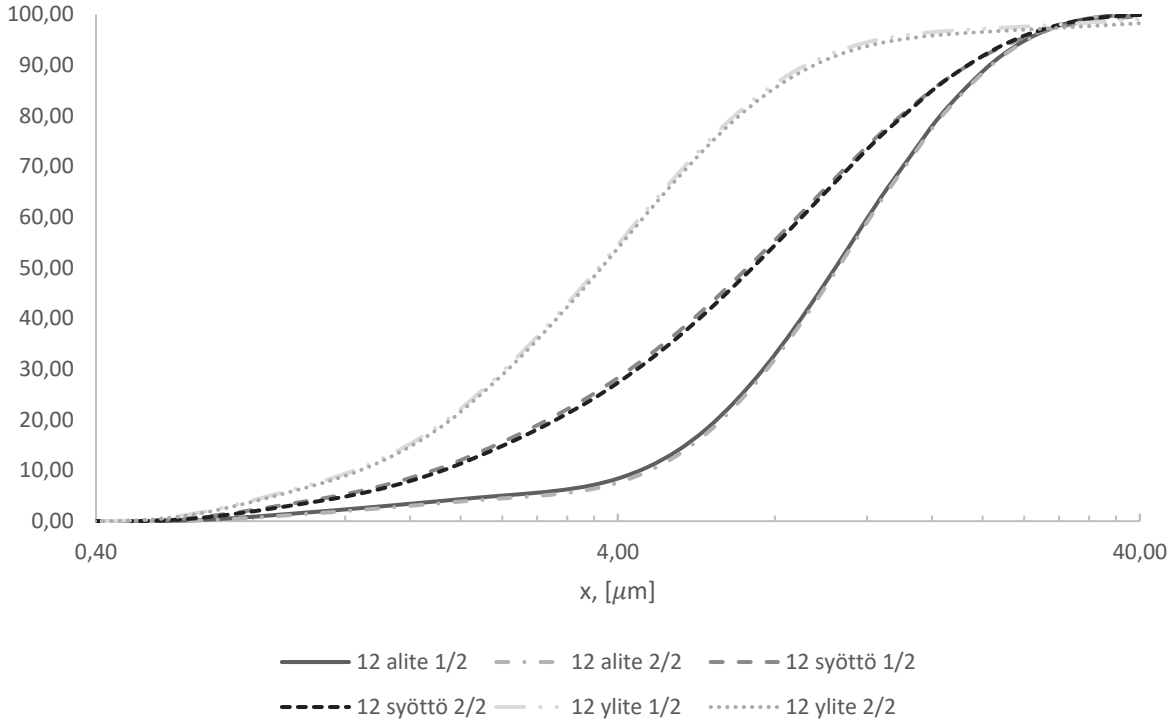

100,00
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
0,80
8,00
80,00
x, [μm]
7 alite 1/2
7 alite 2/2
7 syöttö 1/2
7 syöttö 2/2
7 ylite 1/2
7 ylite 2/2

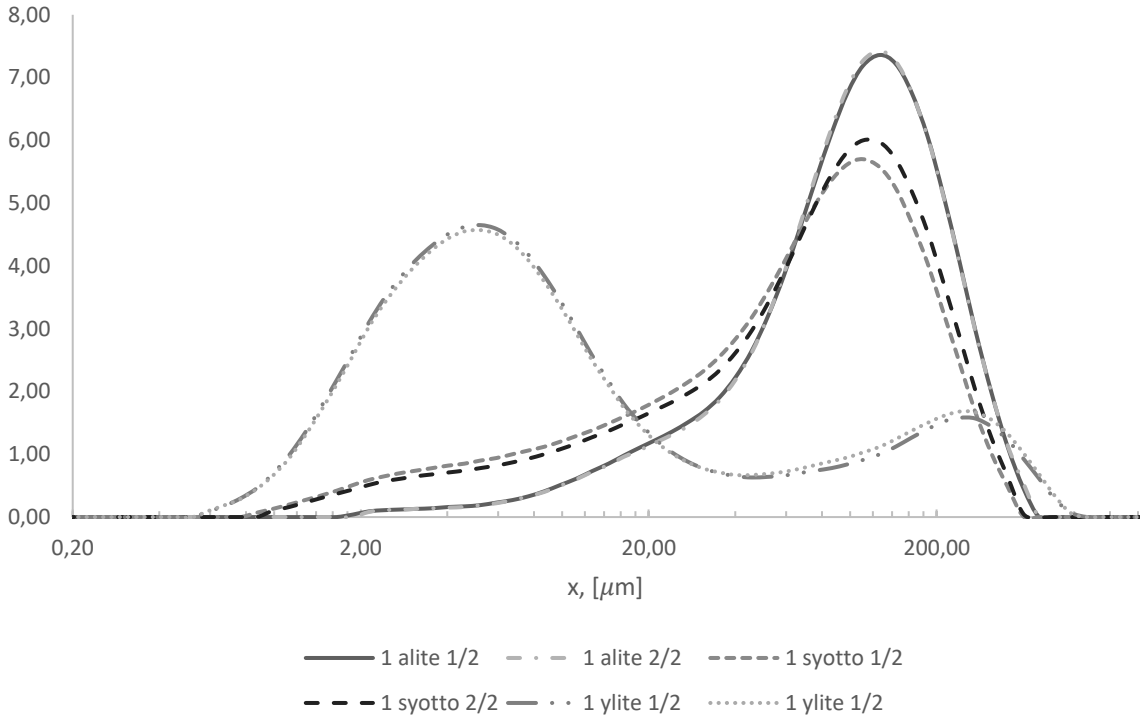

100,00
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
0,80
8,00
80,00
x, [μm]
8 alite 1/2
8 alite 2/2
8 syöttö 1/2
8 syöttö 2/2
8 ylite 1/2
8 ylite 2/2

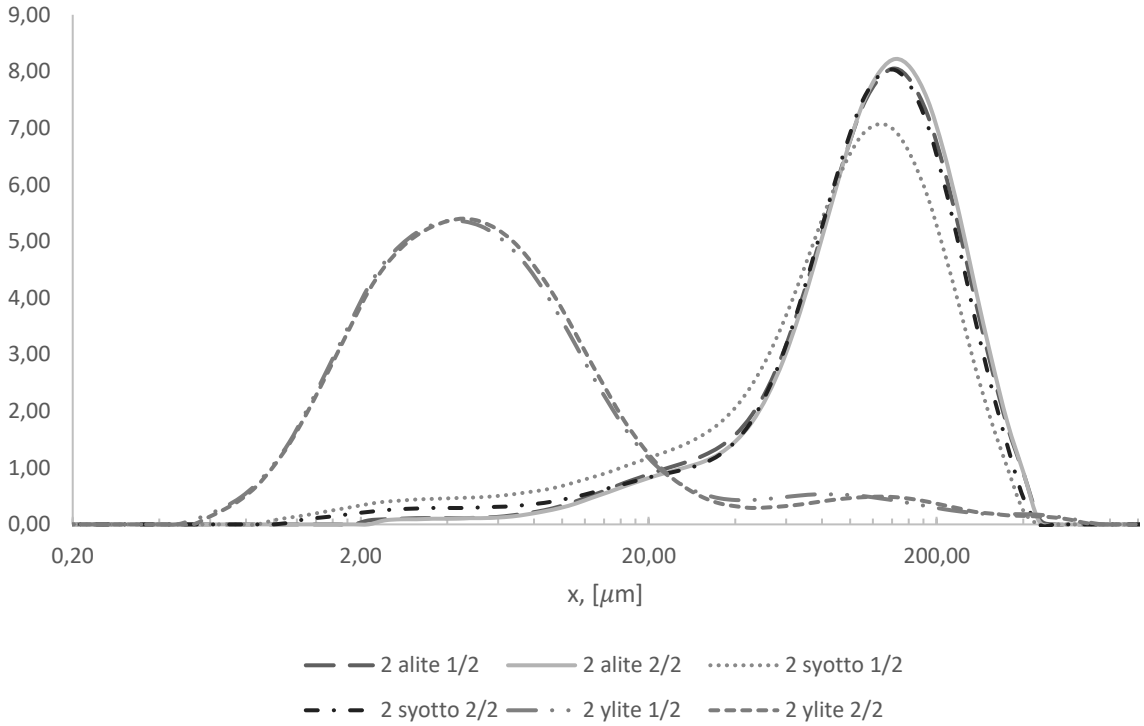

100,00
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
0,40
4,00
40,00
x, [μm]
9 alite 1/2
9 alite 2/2
9 syöttö 1/2
9 syöttö 2/2
9 ylite 1/2
9 ylite 2/2

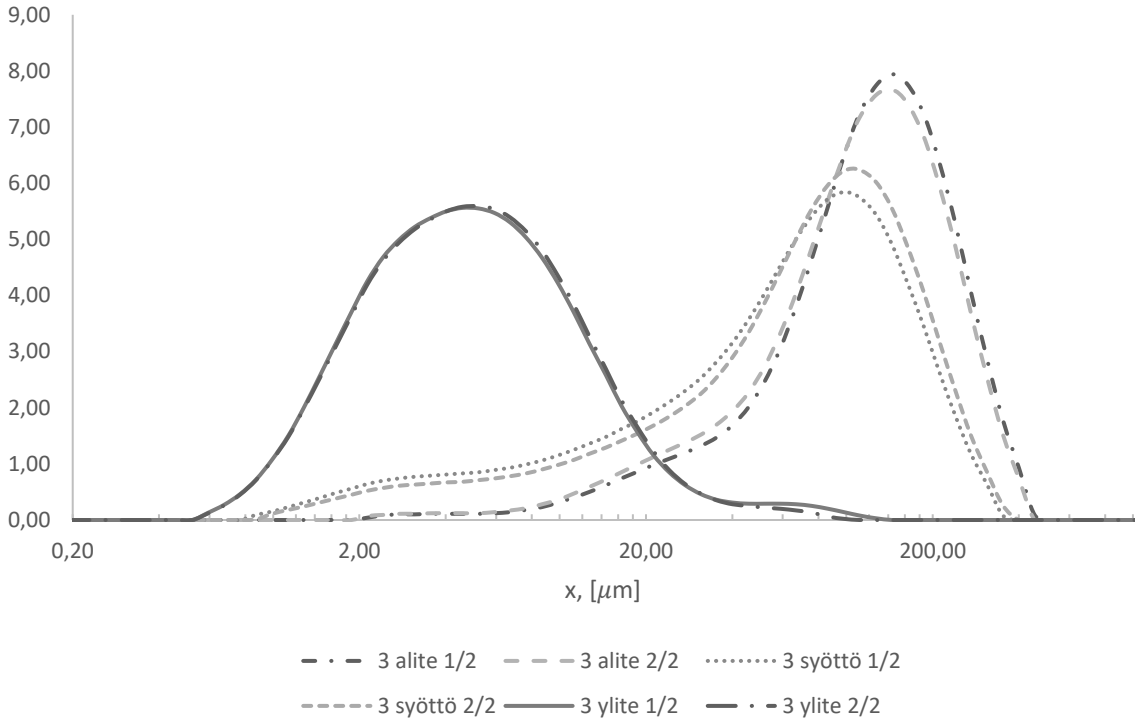

100,00
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
0,40
4,00
40,00
x, [μm]
10 alite 1/2
10 alite 2/2
10 syöttö 1/2
10 syöttö 2/2
10 ylite 1/2
10 ylite 2/2

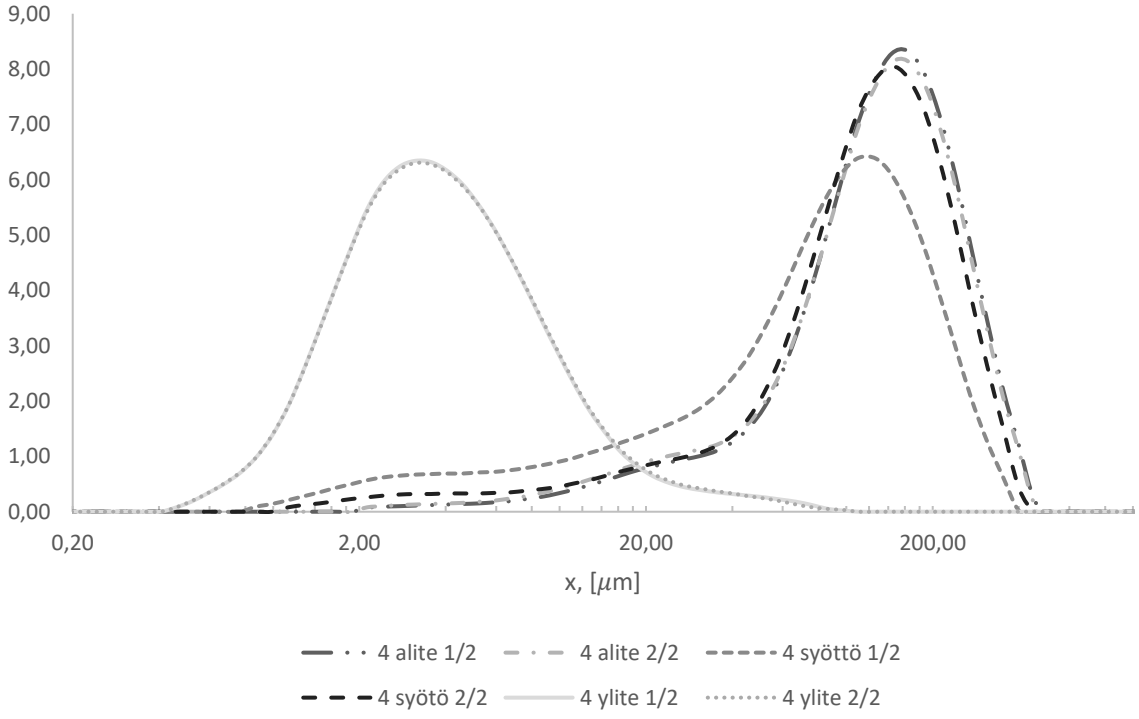

100,00
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
0,40
4,00
40,00
x, [μm]
11 alite 1/2
11 alite 2/2
11 syöttö 1/2
11 syöttö 2/2
11 ylite 1/2
11 ylite 2/2

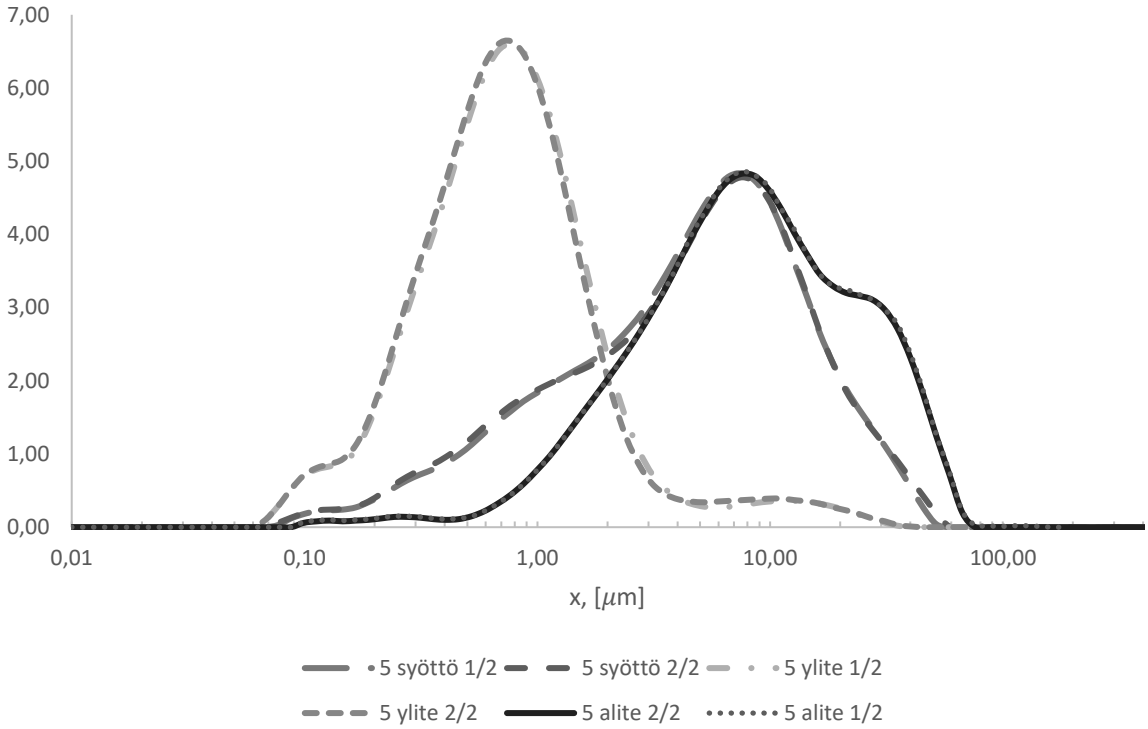

100,00
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
0,40
4,00
40,00
x, [μm]
12 alite 1/2
12 alite 2/2
12 syöttö 1/2
12 syöttö 2/2
12 ylite 1/2
12 ylite 2/2

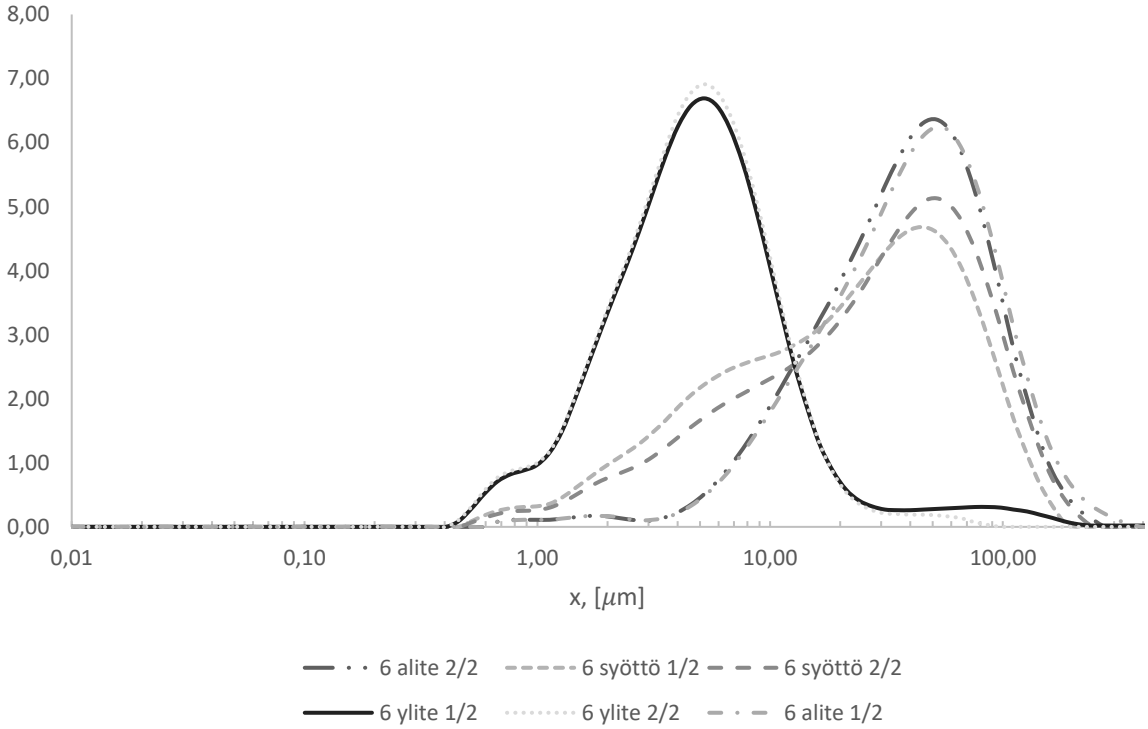

8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,20
2,00
20,00
200,00
x, [μm]
1 alite 1/2
1 alite 2/2
1 syotto 1/2
1 syotto 2/2
1 ylite 1/2
1 ylite 1/2

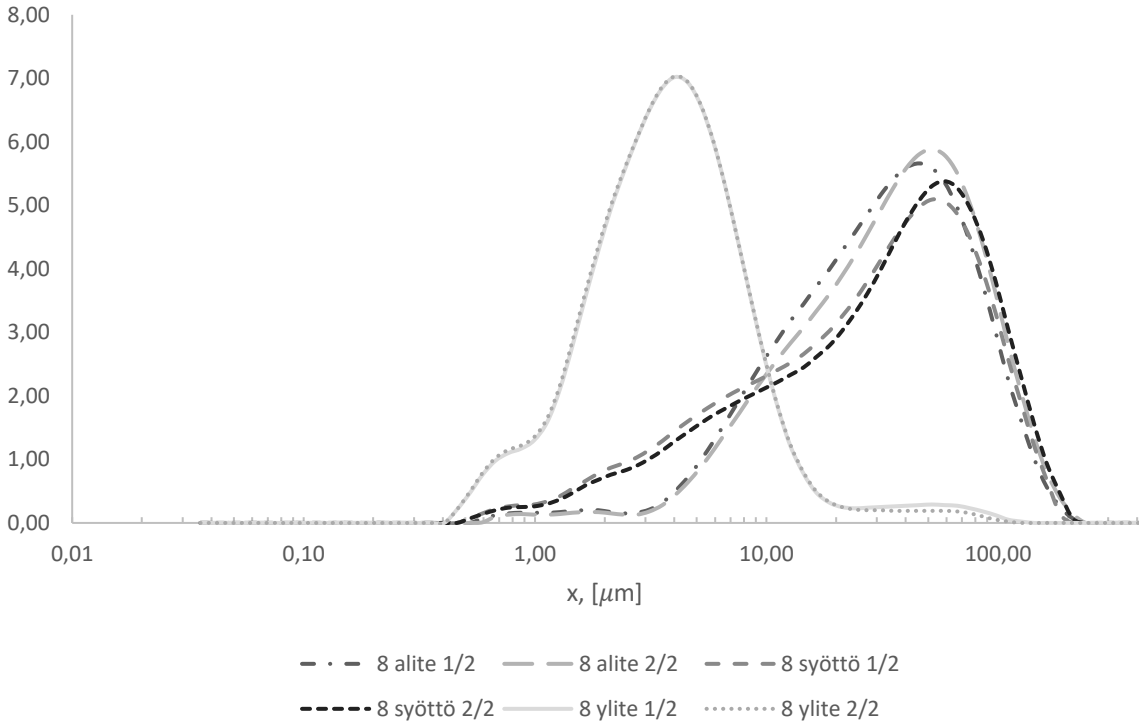

9,00
8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,20
2,00
20,00
200,00
x, [μm]
2 alite 1/2
2 alite 2/2
2 syotto 1/2
2 syotto 2/2
2 ylite 1/2
2 ylite 2/2

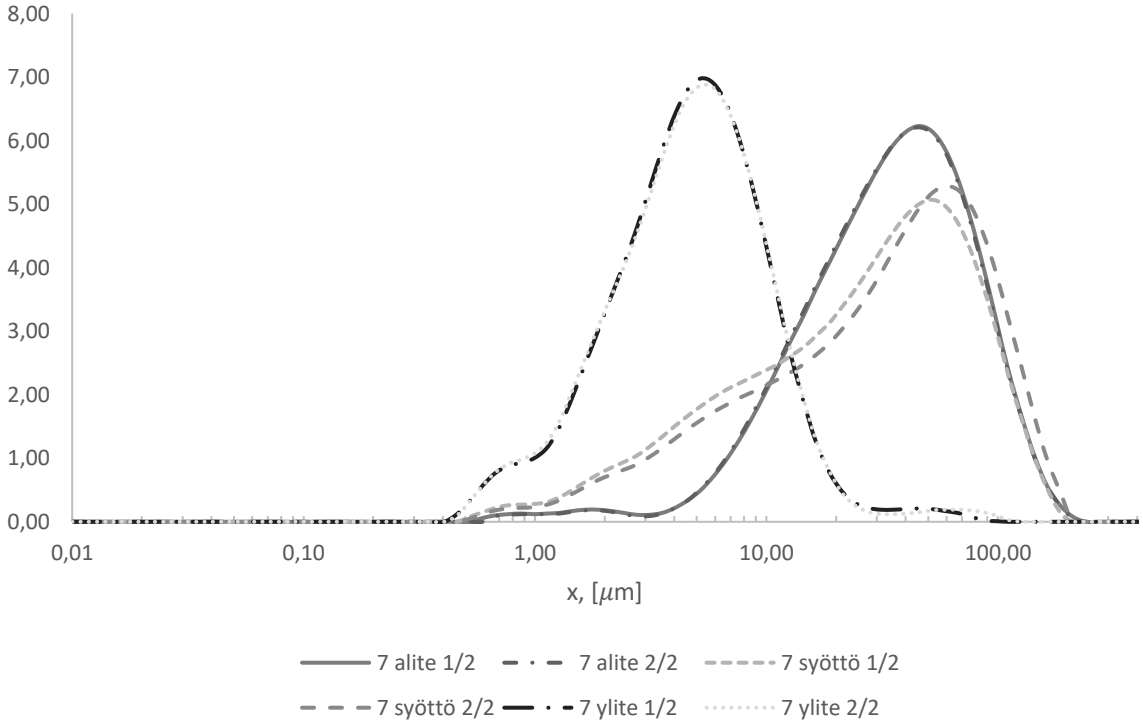

9,00
8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,20
2,00
20,00
200,00
x, [μm]
3 alite 1/2
3 alite 2/2
3 syöttö 1/2
3 syöttö 2/2
3 ylite 1/2
3 ylite 2/2

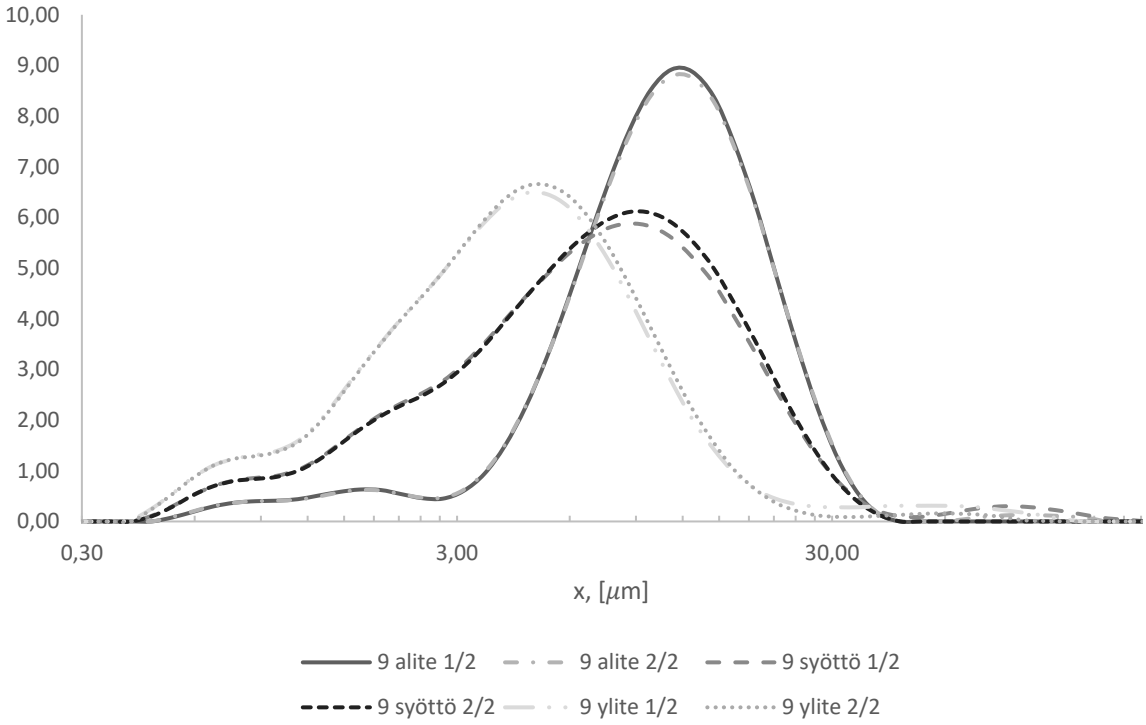

9,00
8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,20
2,00
20,00
200,00
x, [μm]
4 alite 1/2
4 alite 2/2
4 syöttö 1/2
4 syötö 2/2
4 ylite 1/2
4 ylite 2/2

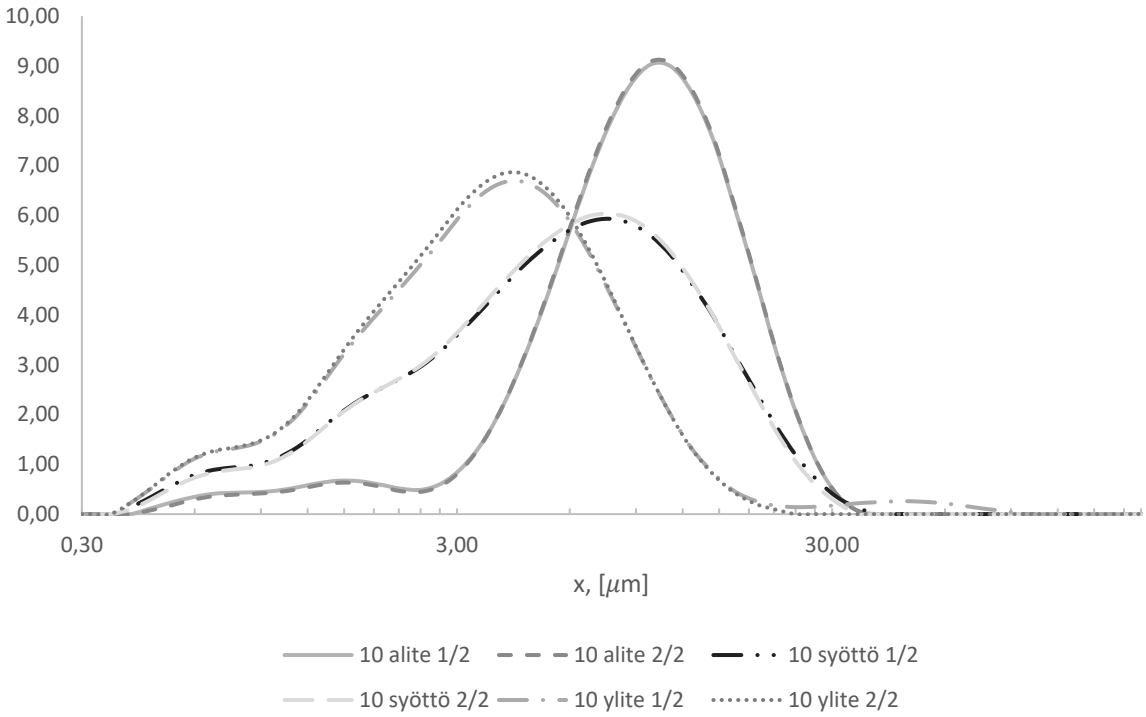

7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,01
0,10
1,00
10,00
100,00
x, [μm]
5 syöttö 1/2
5 syöttö 2/2
5 ylite 1/2
5 ylite 2/2
5 alite 2/2
5 alite 1/2

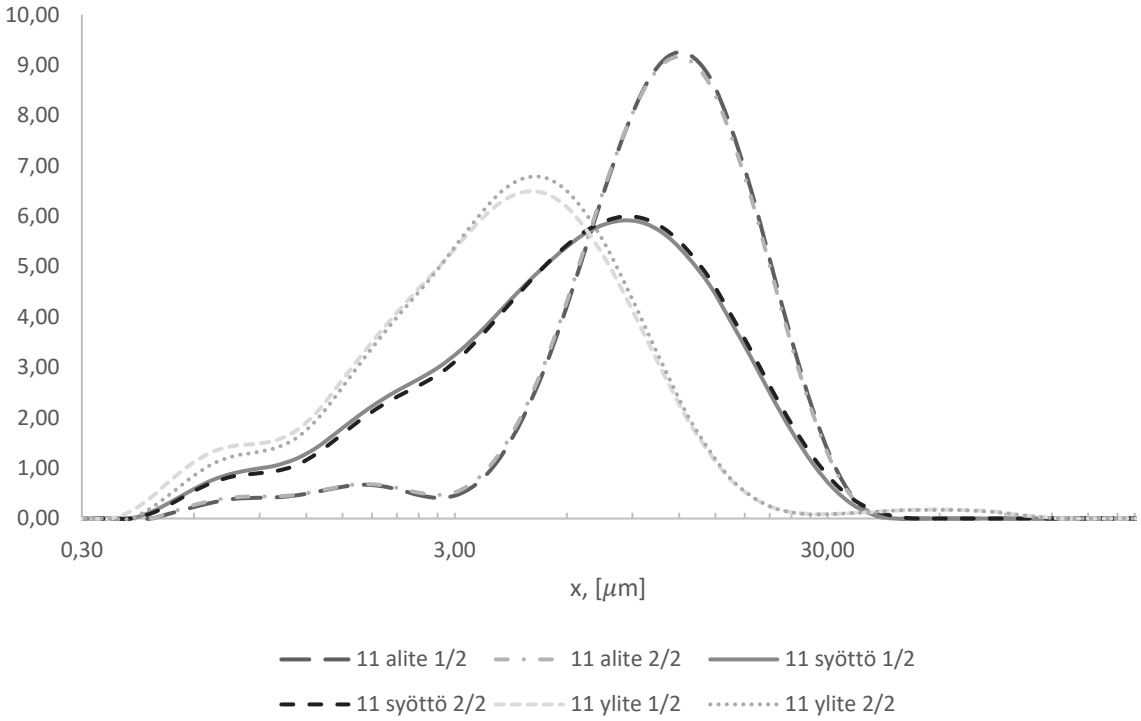

8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,01
0,10
1,00
10,00
100,00
x, [μm]
6 alite 2/2
6 syöttö 1/2
6 syöttö 2/2
6 ylite 1/2
6 ylite 2/2
6 alite 1/2

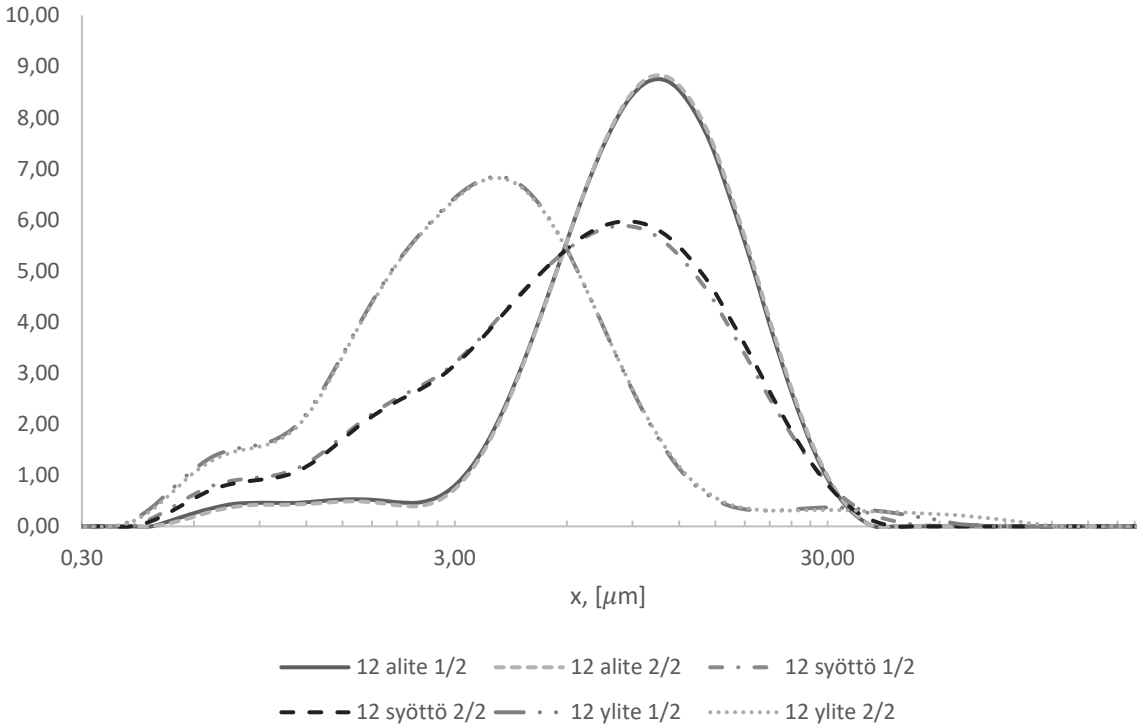

8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,01
0,10
1,00
10,00
100,00
x, [μm]
8 alite 1/2
8 alite 2/2
8 syöttö 1/2
8 syöttö 2/2
8 ylite 1/2
8 ylite 2/2


8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,01
0,10
1,00
10,00
100,00
x, [μm]
7 alite 1/2
7 alite 2/2
7 syöttö 1/2
7 syöttö 2/2
7 ylite 1/2
7 ylite 2/2


10,00
9,00
8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,30
3,00
30,00
x, [µm]
9 alite 1/2
9 alite 2/2
9 syöttö 1/2
9 syöttö 2/2
9 ylite 1/2
9 ylite 2/2


10,00
9,00
8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,30
3,00
30,00
x, [µm]
10 alite 1/2
10 alite 2/2
10 syöttö 1/2
10 syöttö 2/2
10 ylite 1/2
10 ylite 2/2


10,00
9,00
8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,30
3,00
30,00
x, [μm]
11 alite 1/2
11 alite 2/2
11 syöttö 1/2
11 syöttö 2/2
11 ylite 1/2
11 ylite 2/2


10,00
9,00
8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,30
3,00
30,00
x, [μm]
12 alite 1/2
12 alite 2/2
12 syöttö 1/2
12 syöttö 2/2
12 ylite 1/2
12 ylite 2/2