

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Harri Korhonen

BIOPOLTTOAINEIDEN LEIJUTUSOMINAISUUKSIEN KARAKTERISOINTI

Työn tarkastajat:

Professori Timo Hyppänen
DI Markku Nikku

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Harri Korhonen

Biopolttoaineiden leijutusominaisuuksien karakterisointi

Diplomityö

2012

82 sivua, 55 kuvaa, 22 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Timo Hyppänen
DI Markku Nikku

Hakusanat: leijutus, karakterisointi, muotokerroin, vastuserroin, terminaalinopeus

Tässä diplomityössä selvitettiin biopolttoaineiden ominaisuuksia leijutuksen kannalta. Ensiksi tutkittavat biopolttoaineet, hake ja turve, seulottiin ja seulotut näytteet analysoitiin. Seuraavaksi turvetta ja haketta leijutettiin eri nopeuksilla ja eri leijutusnopeuksilla saadut näytteet analysoitiin kuva-analysillä. Partikkeleista selvitettiin runsaasti mittoja, kuten keskihalkaisija, pinta-ala ja muotokerroin. Kirjallisuudesta löytyvien korrelaatioiden avulla laskettiin leijutettujen partikkelien vastuskertoimet ja terminaalinopeudet. Korrelaatioiden tuloksia verrattiin mittaustuloksiin. Tässä työssä myös laskettiin kyseisiin biopolttoaineisiin vaikuttavat ominaisvoimat leijutuksessa sekä laskettiin korjauserroin, jota käytettiin ominaisvoimien korjaamiseen. Referenssiaineina käytettiin hiekkaa ja lasikuulia.

ABSTRACT

Lappeenranta University of technology
Faculty of Technology
Degree programme of energy technology

Harri Korhonen

Characterization of fluidization properties of biomass

Master's thesis

2012

82 pages, 55 figures, 22 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Timo Hyppänen
M.Sc. (Tech.) Markku Nikku

Keywords: fluidization, characterization, shape factor, drag coefficient, terminal velocity

Fluidization properties of biofuels were studied in this Thesis. First, the biofuels, peat and wood, were sieved and the sieved samples were analyzed. Next, the peat and the wood were fluidized by using the fluidization equipment. The samples received by using different fluidization velocities were analyzed with the help of image analysis, too. A large number of parameters were determined, including average diameter, surface area and shape factor. Based on the correlations found in literature, the drag coefficients and the terminal velocities of the particles were calculated. The results were compared to the fluidization results. The specific forces affecting the fluidized biofuels were also calculated and the correction factor to correct the forces. Reference substances used in this study were sand and glass beads.

ALKUSANAT

Kiitän diplomityön ohjaajaa Markkua Nikkua sekä tarkastajaa Timo Hyppästä sekä vanhempiani. Kiitän myös Hanna Lampista, Jussi Leppästä, kymmeniä muita enteläisiä, Rooliahjon jäseniä sekä kaikkia muita, jotka ovat olleet jollain tapaa tukena opiskeluaikana ja diplomityön teon aikana.

Lappeenranta 29.7.2012

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Abstract	3
Alkusanat	4
Sisällysluettelo	5
Symboli- ja lyhenneluettelo	7
1 Johdanto	9
2 Kirjallisuuskatsaus	10
2.1 Kiertopetikattilan toiminta.....	10
2.1.1 Biopolttoaineet leijukerros-poltossa	12
2.2 Biomassa.....	13
2.3 Partikkeleiden ominaisuudet leijutuksen kannalta	16
2.3.1 Keskihalkaisija, kokojakauma, muoto ja tiheys.....	16
2.3.2 Hardgrove-, kulumis-, eroosio- ja abraasioindeksi	16
2.3.3 Partikkelin pinnan ominaisuudet ja kaasun ominaisuudet.....	17
2.4 Menetelmät partikkelien koon ja muodon karakterisointiin	18
2.4.1 Seulonta	18
2.4.2 Kuva-analyysi	18
2.4.3 Painovoima ja keskipakoissedimentaatio	19
2.4.4 Elutriaatio.....	19
2.4.5 Kaskaditörmäystekniikka.....	19
2.4.6 Resisttiivisyys	20
2.4.7 Optinen mittaus	20
2.4.8 Partikkelien tilastollinen karakterisointi kokojakaumilla	20
2.5 Biomassan terminen konversio	22
2.5.1 Palamisen määritelmä.....	22
2.5.2 Palamisprosessi	22
2.5.3 Palamisilmantarve	23
2.5.4 Palamiseen vaikuttavat tekijät.....	24
2.6 Leijutus.....	25
2.6.1 Leijutusnopeus ja vastuserroin	25
2.6.2 Muodon määrittely	29
2.6.3 Sekundääriliike.....	32
2.6.4 Turbulenssin vaikutus.....	33
2.6.5 Partikkelien väliset voimat leijutuksessa	34
2.6.6 Virtauksen muuttuminen heterogeeniseksi	34
2.6.7 Kiintoainetiheys	35
3 Kokeellinen tutkimus	37
3.1 Laitteistokuvaus	37

3.2	Leijutus ja seulonta.....	38
3.3	Partikkelien koon ja muodon analyysi	38
3.3.1	Mikroskooppikuvat.....	38
3.3.2	Kuvankäsittely ja kuva-analyysi	40
3.4	Käsitteet	41
4	Tulokset ja tulosten käsittely	42
4.1	Keskiarvon valinta.....	42
4.2	Seulontakokeiden tulokset	46
4.2.1	Turve	46
4.2.2	Hake	49
4.3	Leijutuskokeiden tulokset	52
4.3.1	Turve	52
4.3.2	Hiekka	55
4.3.3	Lasikuulat.....	57
4.3.4	Hake	59
4.3.5	Muita leijutuksessa vaikuttaneita tekijöitä	61
4.4	Terminaalinopeus	62
4.4.1	Laskenta	62
4.4.2	Tulokset	67
4.4.3	Terminaalinopeuden laskennan virhelähteitä.....	72
4.5	Herkkyystarkastelu	73
4.6	Karakterisointimenetelmä	75
5	Johtopäätökset ja yhteenveto	80
	Lähdeluettelo	81
	LIITTEET	83
	Liite 1: Korrelaation Yow, Pitt & Salman kertoimia	83

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset kirjaimet

a	partikkelin lyhin pääakseli	[m]
A_p	partikkelin projektiopinta-ala	[m ²]
b	partikkelin keskipitkä pääakseli	[m]
c	partikkelin pisin pääakseli	[m]
C_d	vastuserroin	[-]
d	tilavuusekvivalenttihalkaisija	[m]
d_n	pinta-alaekvivalenttihalkaisija	[m]
D	halkaisija	[m]
e_1	korjauserroin	[-]
e_2	korjauserroin	[-]
e_3	korjauserroin	[-]
e_4	korjauserroin	[-]
F_D	vastusvoima	[N]
F_g	paino	[N]
F_L	noste	[N]
K_1	korjauserroin	[-]
K_2	korjauserroin	[-]
m	massa	[kg]
p	paine	[Pa]
R	kaasuvakio	[J/kgK]
Re	Reynoldsin luku	[-]
T	lämpötila	[K]
w	nopeus	[m/s]

Kreikkalaiset kirjaimet

β	Coreyn muotokerroin	[-]
ε	tilavuusosuus	[-]
μ	viskositeetti	[Pa•s]
ρ	tiheys	[kg/m ³]
Ψ	pallomaisuus	[-]

Vakiot

\vec{g}	Maan vetovoiman kiihtyvyys	[9.81 m/s ²]
-----------	----------------------------	--------------------------

Alaindeksit

d	vastus
g	kaasu
p	projektio

s kiintoaine
0 referenssitila

Lyhenteet

CFB kiertoleijupeti
ECD pinta-alaekvivalenttihalkaisija [m]

1 JOHDANTO

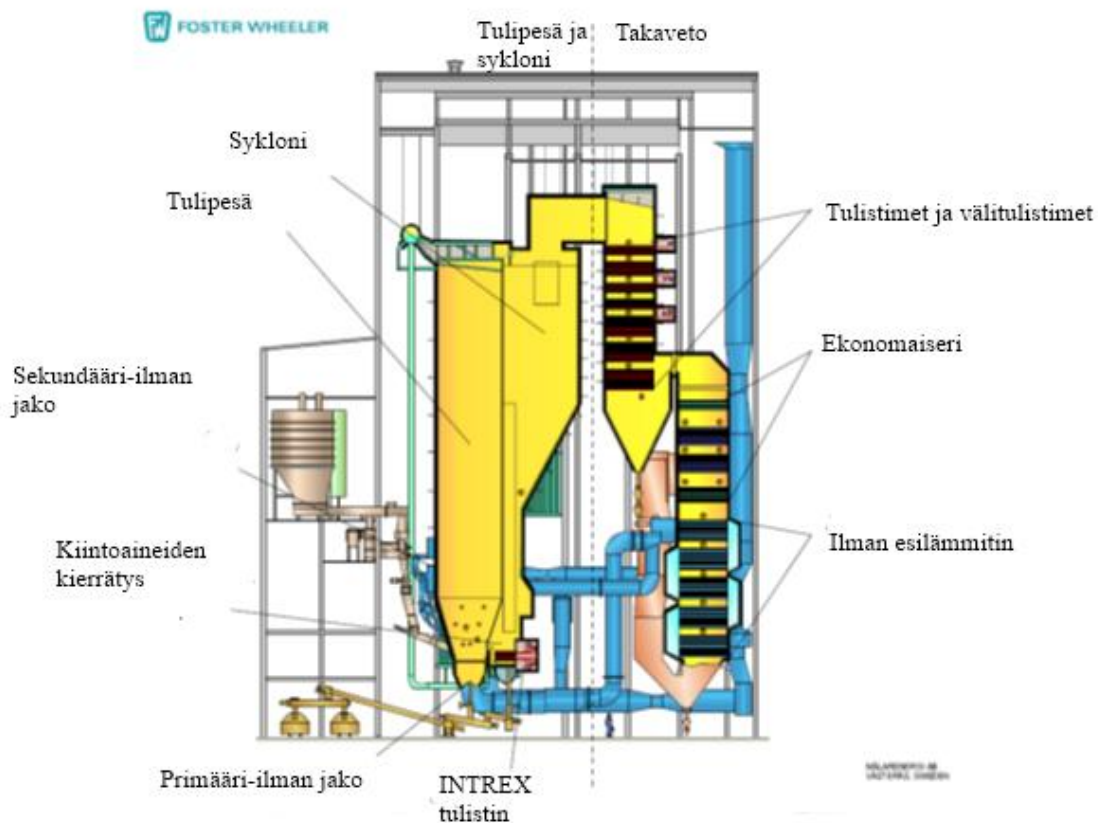
Fossiilisten polttoaineiden varannot tulevat ehtymään, joten on välttämätöntä löytää korvaavia polttoaineita. Erilaiset biomassat, kuten puu ja peltobiomassat, voivat olla osaratkaisu tähän ongelmaan. Fossiilisten polttoaineiden polttamisessa vapautuvan hiilidioksidin uskotaan voimistavan kasvihuoneilmiötä, ja tällä uskotaan olevan tuhoisia seurauksia. Tästäkin syystä biomassojen käyttöä polttoaineena halutaan lisätä, koska niiden poltossa vapautuva hiilidioksidi sitoutuu takaisin luonnon hiilen kiertoon aikanaan. Biomassojen hyödynnettävissä oleva potentiaali on suuri.

Tässä diplomityössä pyritään selvittämään erinäisten biomassojen, kuten turpeen tai kuoren, leijutusominaisuuksia. Tulosten perusteella ymmärretään paremmin kuinka erimuotoiset ja – kokoiset biomassapartikkelit käyttäytyvät eri leijutusnopeuksilla. Leijutuskäyttäytymisen ymmärtäminen on tärkeää hyvän leijuveden ja sekoittumisen aikaansaamiseksi kiertopetikatiloihin. Näin saadaan hyvä palamistehokkuus. Tämän työn tulosten toivotaan auttavan kiertopetikatiloiden kehitystyössä juurikin biomassan polttoa varten. Kiertopetipoltto on ympäristön kannalta parhaimpia polttotekniikoita.

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

2.1 Kiertopetikattilan toiminta

CFB-kattila eli kiertopetikattila voidaan jakaa kahteen osaan: ensimmäinen osa koostuu tulipesästä, erottimesta, kiintoaineen kierrätyslaitteesta ja mahdollisista paluukierrossa olevista tulistimista. Toinen osa on nimeltään takaveto, jossa sijaitsevat välitulistin, tulistin, ekonomaiseri ja ilmanesilämmitin. (Zhang & Teir 2010, s. 155) Kuvassa 1 on CFB-kattilan rakennekuva.



Kuva 1. CFB-kattilan rakenne. (Zhang & Teir 2010, s. 155)

Palamisessa tarvittava primääri-ilma puhalletaan alhaalta, ja se myös leijuttaa polttoaineen ja pedin. Primääri-ilman määrä on vähemmän kuin stökiometrinen määrä. Palamista tehostava sekundääri-ilma puhalletaan hieman arinan yläpuolelta. Rikin sitomiseen tarvittava kalkkikivi syötetään tulipesän alaosassa hiekkapetiin. Kiintoainepartikkelit kulkeutuvat ilmavirran mukana sykloniin, jossa hienot partikkelit poistuvat ja palamattomat palaavat takaisin tulipesään. Syklonin ja tulipesän välillä oleva polvilukko estää kaasun ja kiintoaineen virtauksen takaisin sykloniin. Pedin lämpötila on 800–900 °C. Syklonista poistuvat partikkelit kerätään joko pussisuodattimilla tai sähkösuodattimilla. Polttoaineen syöttö hoidetaan joko painovoimaisesti tai mekaanisilla syöttimillä. (Zhang & Teir 2010, s. 158)

CFB-kattiloilla on monia etuja:

- CFB-kattiloissa 97,5–99,5 % polttoaineesta palaa. Tämä johtuu tehokkaasta sekoittumisesta, pitkästä palamisvyöhykkeestä sekä palamattomien kierrätyksestä takaisin tulipesään.
- Rikki voidaan poistaa tehokkaasti kalkilla koska palamislämpötila tarvittaville reaktioille on ihanteellinen ja pitkä palamisvyöhyke CFB-kattilassa antaa sorbenteille runsaasti aikaa reagoida. Rikinpoisto kattilassa on myös halvempaa ja yksinkertaisempaa kuin savukaasujen puhdistus.
- NO_x - päästöt ovat alhaisia, koska palamisilma jaetaan vaiheittain ja palamislämpötila on alhainen.
- CFB-kattiloissa voidaan polttaa hyvin erilaisia polttoaineita, kuten hiiltä, turvetta ja kuorta. Voidaan myös polttaa monia erilaisia polttoaineita yhtä aikaa.
- CFB-kattilan koko on suhteellisen pieni, koska palaminen on tehokasta. Myös polttoaineen syöttölaitteita tarvitaan vähemmän.
- CFB-kattiloilla on lyhyt ylös- ja alasajoaika ja ne pystyvät seuraamaan kuorman muutoksia nopeasti, noin 4 % kapasiteetista/minuutti. Siksi ne soveltuvat sekä peruskuorma- että huippukuormalaitoksiksi. (Zhang & Teir 2010, s. 160–161)

Taulukossa 1 on esitetty tyypillisiä CFB-kattilan toiminta-arvoja

Taulukko 1. Kiertopetikattilan tyypillisiä toiminta-arvoja. (Huhtinen et al. 2000, s. 161)

Tilavuusteho	0,1-0,3 MW/m ³
Poikkipintarasitus	0,7-5 MW/m ²
Kokonaispainehäviö	10–15 kPa
Leijutusnopeus	3-10 m/s
Primääri-ilman lämpötila	20–400 °C
Sekundääri-ilman lämpötila	20–400 °C
Pedin lämpötila	800–950 °C
Loppulämpötila	850–950 °C
Sekundääri-ilman osuus	25–65 %
Ilmakerroin	1,1–1,3
Pedin tiheys	10–100 kg/m ³

2.1.1 Biopolttoaineet leijukerros poltossa

Biopolttoaineita voi polttaa usein ongelmitta leijukerros poltossa leijupedin suuren lämpökapasiteetin ansiosta, mutta ongelmia voi esiintyä. Matala lämpöarvo, korkea kosteuspitoisuus ja polttoainemäärän massavirran hankala mittaaminen tuottavat vaikeuksia. (Vakkilainen 2010, s. 10-13)

Biomassan poltosta syntyvä tuhkalla on taipumus liata ja kuonata lämpöpintoja, jolloin lämmönsiirto heikkenee. Petipartikkelit agglomeroituvat eli takertuvat toisiinsa korkeassa lämpötilassa, mikä johtaa kattilan alasajoon, jos pedin leijutuskyky häviää (defluidisaatio). Biomassan seassa voi olla esimerkiksi kiviä mikä karkentaa leijupetiä. Karkenemisella tarkoitetaan isojen partikkelien osuuden nousua leijupedissä. Kun leijupeti karkenee tarpeeksi, heikkenevät lämmönsiirto sekä leijutus. Lämmönsiirron heikkeneminen voi johtaa epätasaiseen lämpötilajakaumaan, mikä voi johtaa pedin sintraantumiseen eli hiekan sulamiseen. (Vakkilainen 2010, s. 10.13–10.14)

2.2 Biomassa

Biomassa käsittää kaiken maapallolla olevan kasvimateriaalin toisin sanoen biomassa on syntynyt fotosynteesissä. Myös eläimet voidaan lukea biomassaan, vaikka tällöin ei suoraan auringonvaloa hyödynnetä. (Decker et al. 2007, s.1449) Euroopan Standardisointikomitea on määritellyt biomassalle standardit. 30 standardia kattavat seuraavat alueet biomassan suhteen. (Loo & Koppejan 2008, s. 49–50)

- Terminologia, määritelmät ja kuvaukset
- Polttoaineen spesifikaatiot, luokat ja laadunhallinta
- Näytteenotto ja näytteen reduktio
- Fyysiset ja mekaaniset testausmenetelmät
- Kemialliset testausmenetelmät

Standardien mukaan seuraavat ovat biopolttoaineita:

- maatalouden ja metsätalouden tuotteet
- eloperäinen jäte maataloudesta ja metsäteollisuudesta
- eloperäinen jäte elintarviketeollisuudesta
- puujäte, pois lukien puujäte, joka voi sisältää halogenoituja orgaanisia yhdisteitä tai raskasmetalleja
- eloperäinen kuitupitoinen jäte sellunvalmistuksesta ja paperinvalmistuksesta
- korkkijäte

Biomassasta saadaan tällä hetkellä noin 14 % maailman energiantarpeesta. Tästä noin 75 % käytetään kehitysmaissa muun muassa polttopuuna. Sähkön tuotantoon biomassaa käytetään noin 7 EJ/a. Biomassan energiapotentiaalia on vaikea arvioida, koska täytyy huomioida resurssien hyödyntämisen vaikutukset luontoon. Vuori et al. on arvioinut hyödynnettävissä olevaksi maailmanlaajuisesti biomassapotentiaaliksi 120–210

EJ/a. Tästä suurin osa voitaisiin saada energiakasveista. (Vuori et al. 2010, s. 243–44)
Taulukossa 2 on esitetty eri tahojen arvioita biomassavarojen energiapotentiaalista.

Taulukko 2. Eri tahojen arvioita biomassavarojen energiapotentiaalista. (Vuori et al. 2010, s. 244)

	RIGES (2025) (2050)	Parikka	Hoogwijik	Fischer & Scharattenholzer	IPCC(2007)	VTT ja MTT
Kokonaisbiomassa (EJ)	144,8 205,9	104	33–1135	350–450	250	120–210
Päälähteet	Plantaasit	Puubiomassa	Energiakasvit	Ruohomaat(energiakasvit)		Energiakasvit
Pääalueet	Latinalainen Amerikka	Latinalainen Amerikka		Keski- ja Itä-Eurooppa		Ent. Neuvostoliitto

2.3 Partikkeleiden ominaisuudet leijutuksen kannalta

2.3.1 Keskihalkaisija, kokojakauma, muoto ja tiheys

Partikkelien suositeltava keskihalkaisija on 50 µm - 1,66 mm. Hienot partikkelit ovat liian koheesivisia, kun taas liian suuret partikkelit huonontavat leijutusominaisuuksia. Liian pieni kokojakauma johtaa leijutusominaisuuksien huononemiseen, ja liian suuri jakauma johtaa partikkelien segregatioon. (Grace et al 2006, s. 5-2)

Muotoja käsitellään tarkemmin luvussa 2.6. Leijutuksen kannalta sopivin muoto on pyöreähkö, ja sivusuhte ei saisi olla suurempi kuin 3. Tärkeintä on kuitenkin välttää äärimmäisiä muotoja, kuten levyjä ja neuloja, jotka häiritsevät leijutusta, ja teräviä kulmia, jotka kuluttavat pintoja. (Grace et al. 2006, s. 5-2)

Tiheyden täytyy olla sama kaikilla partikkeleilla. Hyvin alhaisen tiheyden omaavia partikkeleita (<500 kg/m³) on vaikea pitää pedissä. (Grace et al. 2006, s. 5-2) Partikkelin tiheys voidaan määrittellä partikkelien massan ja tilavuuden suhteena. Tämä pätee vain partikkeleille, jotka eivät ole huokoisia. (Yang 2003, s. 6)

2.3.2 Hardgrove-, kulumis-, eroosio- ja abraasioindeksi

Hardgrove-indeksi kuvaa kivihiekin jauhautuvuutta, mutta sitä käytetään myös muille aineille. Jauhautuvuus selvitetään jauhamalla 50 g näytettä myllyssä 60 pyörähdyksen ajan. Se osa näytteestä, joka pääsee seulan (aukon koko 75 µm) läpi, punnitaan. Hardgrove-indeksi saadaan vertaamalla standardiin tai laskemalla yhtälöstä $HGI = 13 + 6,93W_{200}$. Hardgrove-indeksi on yleensä 15–140. Mitä suurempi indeksi, sitä helpompaa materiaali on jauhaa. Vaikeita jauhettavia ovat muun muassa muovit. (Yang 2003, s. 13)

Partikkelien kuluminen on tärkein ominaisuus leijutuksen kannalta. Partikkelin taipumus kulua leijutuksessa vaikuttaa kokojakaumaan ja virtauskanavien suunnitteluun. Kaksi menetelmää on kehitetty poistuman määrittämiseen. Toinen hyödyntää partikkelien törmäystä

levyyn ja toisessa käytetään niin sanottua Davisonin suihkukuppia. Nämä kaksi menetelmää pätevät erilaisille materiaaleille kuten muovit, alumiini ja kalkkikivi. (Yang 2003, s. 13–14)

Partikkelin abraasioindeksi määritetään yleensä Yancey-Geer Price -laitteella. Tässä menetelmässä neljä metalliliuskaa on kytketty moottoriin, joka pyörittää niitä nopeudella 1440 rpm 12 000 pyörähdysten ajan. Liuskat jauhavat näytettä, ja abraasioindeksi lasketaan liuskojen menettämän massan perusteella. (Yang 2003, s. 14)

Partikkelin eroosioalttisuuden määrittämiseen on menetelmä, jossa teräsliuska altistetaan jauhetun hiilen virrälle ohjatuissa olosuhteissa. Liuskan painonmenetykseen osoittaa tietynlaisen hiilen eroosiovaikutuksen. (Yang 2003, s. 14)

2.3.3 Partikkelin pinnan ominaisuudet ja kaasun ominaisuudet

Pintojen on oltava sileitä, mutta pieni pinnankarheus on siedettävissä. Partikkelit eivät saa olla toisiinsa tarttuvia, tai muuten ne agglomeroituvat ja likaavat seiniä. (Grace et al. 2006, s. 5-2) Kaasun tiheydellä ei ole sinänsä rajoitusta, mutta korkeampi tiheys parantaa leijutusta. Kaasun viskositeetille ei ole ohjearvoja. Suhteellisen ilmankosteuden täytyy olla 10–90 %. Jos kosteus on alle 10 %, niin sähköstaattiset voimat ovat merkittäviä. Jos kosteus on yli 90 %, niin kapillaarivoimat ovat hallitsevia. (Grace et al. 2006, s. 5-2)

2.4 Menetelmät partikkelien koon ja muodon karakterisointiin

2.4.1 Seulonta

Seulonta on kaikkein suosituin menetelmä partikkelien luokitteluun. Jauhemaisen näytteen seulonnassa käytetään seuloja, joiden seula-aukkojen koko on määritelty standardeilla. Menetelmän ongelmana on, että se ei anna tietoa suurinta seulakokoa suuremmista ja pienintä seulakokoa pienemmistä partikkeleista. Seulonnan tarkkuus riippuu seulonnan kestosta, seulan partikkelikuormasta sekä seulan tukkeutumisesta. Muita virhelähteitä ovat seula-aukon kasvaminen eroosion takia sekä partikkelien agglomeroituminen staattisen sähköön tai kosteuden takia. Partikkeleille, jotka ovat pienempiä kuin 20 μm , sähköstaattiset voimat ovat merkittäviä eikä seulontaa suositella. (Yang 2003, s. 7)

2.4.2 Kuva-analyysi

Suurennetuista valokuvista tai mikroskoopin kautta otetuista valokuvista voidaan suoraan mitata partikkelien dimensiot. Partikkeleita verrataan standardimuotoihin, jotta saadaan niiden todelliset koot ja muodot selvitettyä. Usein käytetään Martinin ja Feret'n halkaisijoita partikkelien karakterisointiin. Virhettä voi syntyä, jos kuvassa näkyvä partikkelijakauma ei ole täysin satunnainen. Tällöin koon karakterisointiin syntyy poikkeama. Tämä tekniikka sopii parhaiten suhteellisen yhtenäisille ja raemaisille partikkeleille. Partikkeleita tarvitaan noin 300–500, jotta saadaan tilastollisesti luotettava tulos. (Yang 2003, s. 8)

2.4.3 Painovoima ja keskipakoissedimentaatio

Painovoimasedimentaatioissa mitataan partikkelien putoamisnopeudet viskoosissa nesteessä. Mitatut nopeudet muutetaan Stokesin halkaisijoiksi sillä oletuksella, että kaikki partikkelit ovat pyöreitä. Tämän menetelmän ongelmia ovat kyvyttömyys erotella epäsäännölliset partikkelit, muiden partikkelien häiriövaikutus sekä mahdollisten tihentymien muodostuminen. Myös seinävaikutus voi häiritä mittauksia. Sedimentaatiokäytös voidaan mitata ottamalla pipetillä näyte sedimenttikerroksessa. Nykyaikaisia tekniikkoja ovat valonsäteen diffraktiokuvio, röntgensäteiden tehonmenetys tai lasersäteiden Doppler-siirtymä. Painovoiman sijasta voidaan käyttää sedimentaatioissa myös keskipakoisvoimaa. (Yang 2003, s. 9-11)

2.4.4 Elutriaatio

Elutriaatioissa käytetään virtaavaa fluidia erikokoisten partikkelien erottamiseen. Pystysuorissa elutriaattoreissa partikkelit, joiden terminaalinopeus on pienempi kuin fluidin vertikaalinen nopeus, erottuvat ja kulkeutuvat ulos elutriaattorista. Eri fluidin nopeuksilla saadaan erikokoiset partikkelit erottumaan. Virhelähteitä ovat partikkelien konsentraatio, joka vaikuttaa mittaustuloksiin sekä fluidin parabolinen nopeusjakauma. Tässä menetelmässä kaikki partikkelit oletetaan palloiksi. (Yang 2003, s. 11)

2.4.5 Kaskaditörmäystekniikka

Tämä tekniikka on muuten samanlainen kuin elutriaatio, mutta myös hiukkasten inertiaa hyödynnetään. Virtaavassa fluidissa olevat partikkelit törmäävät levyyn, kun fluidin virtaussuunta muuttuu äkillisesti. Suuremmat partikkelit, joilla on suurempi inertia, törmäävät levyyn helpommin kuin pienet. Laskemalla fluidin nopeutta vähitellen saadaan partikkelit kerättyä ja luokiteltua eri kokojakaumiin. Tämä menetelmä sopii partikkelien kokoluokkaan 0,1 – 100 μm . (Yang 2003, s. 11)

2.4.6 Resistiivisyys

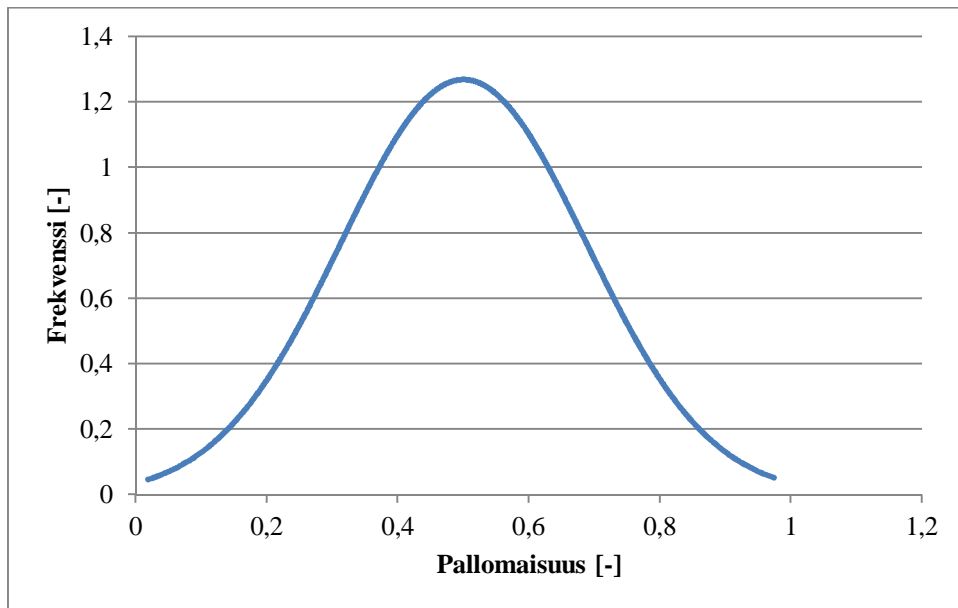
Resistiivisyyttä hyödyntävät menetelmät mittaavat muutoksia partikkelien resistiivisyydessä, kun ne kulkevat instrumenttien mittausalueen läpi. Näyte sekoitetaan elektrolyyttiin ja johdetaan sylinterinmuotoiseen suuttimeen, jossa on kaksi elektroodia. Partikkelit luovat jännitepulsseja, jotka mitataan ja analysoidaan. Partikkelit eivät saa olla suurempia kuin 40 % suuttimen halkaisijasta tai pienempiä kuin 3 % suuttimen halkaisijasta. Virheitä syntyy, jos partikkelit ovat epäsäännöllisiä tai jos ne eivät kulje suuttimen akselin läpi. Resistiivisyyden mittaus sopii partikkeleille, joiden koot ovat välillä 0,6-1200 μm . (Yang 2003, s. 11–13)

2.4.7 Optinen mittaus

Optinen mittaus perustuu valon heijastumiseen partikkeleista, jotka kulkevat esimerkiksi laserilla valaistun mittaustilavuuden läpi. Heijastuneen valon intensiteetti korreloi partikkelin koon kanssa. Todellisuudessa asia ei ole näin yksinkertainen vaan koon ja muodon suhde heijastuneeseen valoon on hyvin monimutkainen. Samat virhelähteet, jotka pätevät resistiivisyyden mittaukseen, koskevat myös optista mittausta. (Yang 2003, s. 11–13)

2.4.8 Partikkelien tilastollinen karakterisointi kokojakaumilla

Kokojakaumaa voidaan kuvata moodilla, mediaanilla ja keskiarvolla. Keskihajonta kuvaa poikkeamaa halkaisijan keskiarvosta. Kokojakaumaa voidaan kuvata log-normaalijakaumalla sekä Rosin-Rammler -jakaumalla. Kuvassa 2 on esitetty hiekan pallomaisuuden log-normaalijakauma. (Yang 2003, s. 22–24)

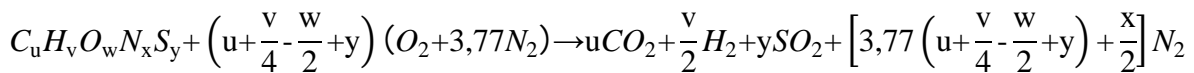


Kuva 2. Hiekan pallomaisuuden log-normaalijakauma.

2.5 Biomassan terminen konversio

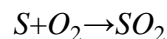
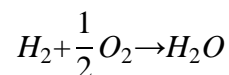
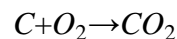
2.5.1 Palamisen määritelmä

Palaminen on aineen yhtymistä happeen ja voidaan siten approksimoida seuraavalla yhtälöllä hiiltä, vetyä, happea, typpeä ja rikkiä sisältävälle polttoaineelle. (Saastamoinen 2002, s. 35)



Reaktioyhtälössä u, v, w, x ja y ovat kertoimia, jotka saadaan alkuainetaseesta. Luku 3,77 on typen ja hapen moolisuhde toisin sanoen 1 happimolekyyliä kohti ilmassa on 3,77 typpimolekyyliä. (Saastamoinen 2002, s. 35)

Palamisessa tapahtuu satoja reaktioita, mutta yksinkertaisessa palamislaskussa otetaan vain seuraavat kolme huomioon.



2.5.2 Palamisprosessi

Ensimmäinen palamisen vaihe on kuivuminen, jolloin polttoaineessa oleva vesi höyrystyy. Kuivuminen on nopeaa, koska partikkeleissa olevan veden ja ympäristön välillä vallitsee paine-ero. Myös veden diffuusio partikkelista ympäristöön nopeuttaa kuivumista. (Saastamoinen 2002, s. 189)

Seuraavaksi on vuorossa kaasuuntuvien haihtuminen eli pyrolyysi. Osa polttoaineesta haihtuu kaasumaiseen muotoon ja palaa, jolloin jäljelle jää niin sanottu jäännöshiili. Pyrolyysituotteet kulkeutuvat hiukkasen sisältä pintaan diffuusion ja paine-eron avulla. Kaasuuntuva osuus

riippuu polttoaineesta, kuumennusnopeudesta ja loppulämpötilasta, ja on esimerkiksi puulla noin 80 % kuivamassasta. Pyrolysoituva osuus kasvaa hiukkasen saavuttaman lämpötilan tai kuumennusnopeuden kasvaessa (Saastamoinen 2002, s. 192–197)

Toinen palamisvaihe on syttyminen. Kiinteä polttoaine voi syttyä heterogeenisesti eli kiinteä aine syttyy, minkä jälkeen liekki voi irrota hiukkasen pinnasta ja sytyttää ympärillä olevat pyrolyysituotteet, jotka ovat peräisin kaasuuntuvien aineiden haihtumisesta. Homogeenisessä syttymisessä pyrolyysituotteet syttyvät hiukkasen ulkopuolella. Syttyminen voi tapahtua apuenergian avulla, jolloin lähellä on jo liekki tai hiukkanen voi syttyä itsestään, kun se kuumenee tarpeeksi. Syttymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat hiukkaskoko, kaasun lämpötila ja happipitoisuus ja polttoaineen ominaisuudet. Hiukkaskoon kasvaessa kasvaa homogeenisen syttymisen todennäköisyys. Myös syttymisaika kasvaa hiukkaskoon kasvaessa. Polttoaineet, joissa on runsaasti haihtuvia aineita, syttyvät yleensä matalammissa lämpötiloissa. (Saastamoinen 2002, s. 192)

Viimeinen vaihe on jäännöshiilen palaminen. Tällöin esimerkiksi hiili muodostaa hapen kanssa hiilidioksidia tai hiilimonoksidia. Tässä reaktiossa vaikuttava voima on hapen diffuusio polttoaineen pintaan ja sisäosiin, missä ne reagoivat heterogeenisesti jäännöshiilen kanssa. Rajoittavia tekijöitä ovat palamiskinetiikka ja hapen diffuusio hiukkasen pinnalle. (Saastamoinen 2002, s. 202–214)

2.5.3 Palamisilmantarve

Polttoaine tarvitsee palaessaan happea reaktioyhtälön osoittaman moolimäärän verran, esimerkiksi 1 mooli hiiltä tarvitsee 2 moolia happea. Kertomalla tämä moolimäärä 3,77:llä saadaan palamisilmantarve. Palamisilmantarve ilmoitetaan yhtä polttoainekiloa kohti. Teoreettista palamisen tarvitsemää ilmamäärää sanotaan stökiometriseksi ilmamääräksi, jolloin ilmakerroin = 1. Palaminen ei ole täydellistä ilmakertoimella 1 johtuen puutteellisesta sekoittumisesta ja rajallisesta ajasta. Palamisilmaa tarvitaankin ylimäärä eli ilmakertoimen on oltava esimerkiksi 1,2. (Huhtinen et al. 2000, s. 83–86)

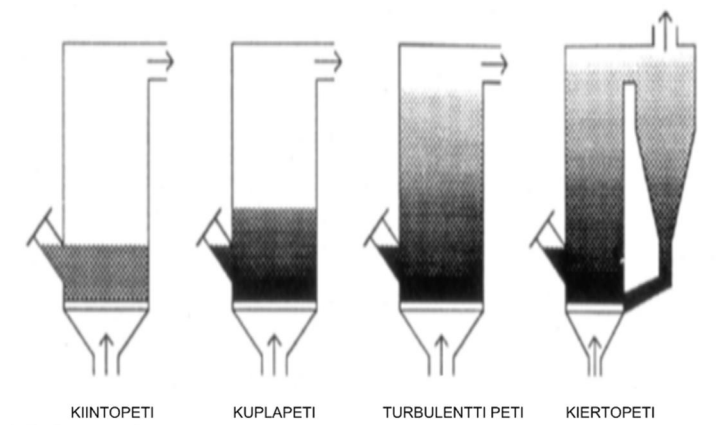
2.5.4 Palamiseen vaikuttavat tekijät

Lämpötila, paine, reagoivan kaasun pitoisuus ja palavan partikkelin koko vaikuttavat palamisnopeuteen. Partikkelikoon pienentäminen ja lämpötilan nostaminen tehostavat palamista, kuten myös hapen pitoisuuden nostaminen. Paineen nosto vaikuttaa vain vähän lämmön- ja aineensirtoon, kun painetaso on alle 1 MPa. Paineen kasvattaminen nostaa hapettavien kaasujen osapaineita partikkelin pinnalla, mutta reaktionopeus ei kuitenkaan kasva samalla tavalla kuin hapen konsentraatiota lisättäessä. Paineen ylittäessä 5 MPa palamisnopeus voi jopa pienentyä, kun hapen diffuusio pintaan vähenee. (Saastamoinen 2002, s. 214–215)

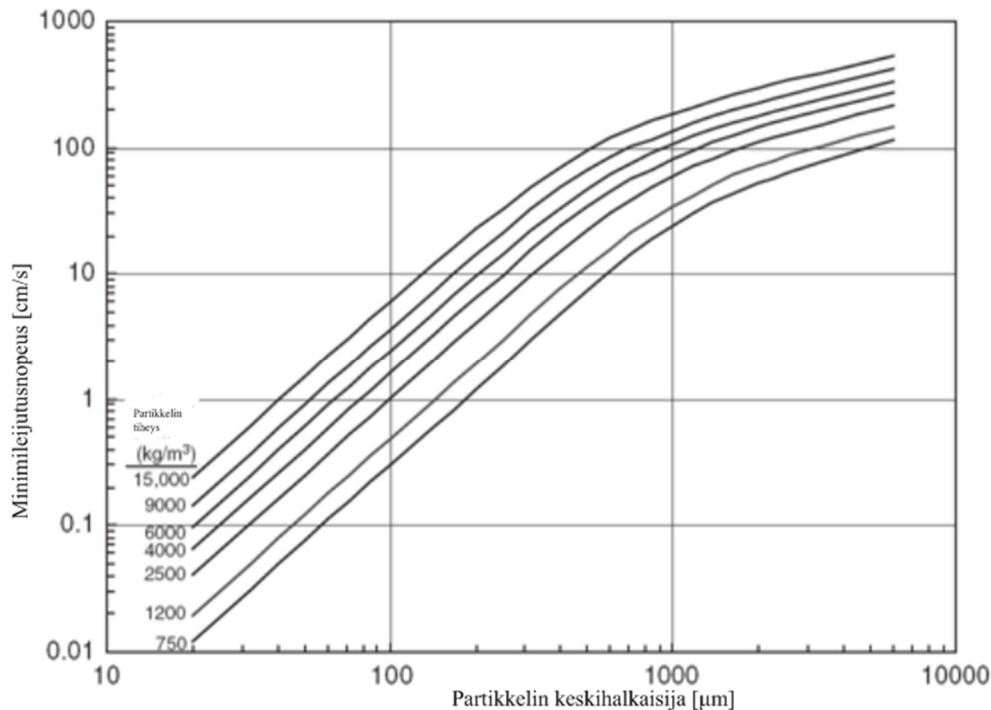
2.6 Leijutus

2.6.1 Leijutusnopeus ja vastuskerroin

Kun rakeisen materiaalikerroksen läpi puhalletaan kaasua riittävän suurella nopeudella, alkaa kerros leijua. Tätä pienintä leijutusnopeutta sanotaan minimileijutusnopeudeksi, u_{mf} . Kun leijutus aloitetaan kaasun nopeudella u_{mf} , partikkelit alkavat liikkua toisiinsa nähden. Kun leijutusnopeutta kasvatetaan entisestään, alkaa materiaalikerroksessa esiintyä kaasukuplia, jotka kohoavat ylöspäin. Tässä vaiheessa leijutusta leijukerroksella on selkeä kupliva pinta. Kun leijutusnopeus alkaa saavuttaa terminaalinopeutta, selkeä kupliva pinta häviää, ja koko leijutila muuttuu turbulentiksi leijutilaksi. Leijutusnopeuden ylittäessä terminaalinopeuden, entistä suurempi osa partikkeleista tempautuu ylöspäin virtauksessa. Terminaalinopeus u_t on partikkelien vapaa putoamisnopeus. Minimileijutusnopeudelle on laadittu koetulosten perusteella useita eri korrelaatioita. (Hyppänen & Raiko 2002, s.491–492) Kuvassa 3 on esitetty eri leijutustyyppit. Kuvassa 4 on esitetty minimileijutusnopeuden kasvaminen tiheyden ja partikkelin halkaisijan funktiona.



Kuva 3. Eri leijutustyyppit. (Zhang & Teir 2010, s. 156)



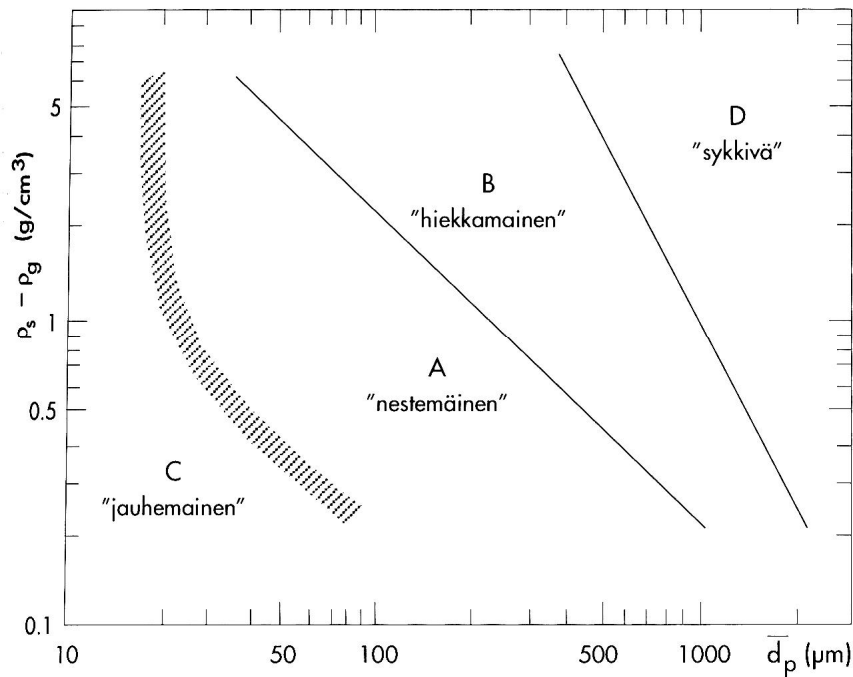
Kuva 4. Minimileijutusnopeus partikkelin halkaisijan funktiona eri tiheyksillä. (Grace et al. 2006, s. 5-7)

Leijutettavaan partikkeliin vaikuttaa useita voimia: painovoima, nostevoima, fluidin painegradientin voima, virtuaalinen massavoima ja vastusvoima. (Zastawny et al. 2011, s. 2-3) Tässä työssä kuitenkin merkitystä on vain vastusvoimalla, nosteella ja painolla. Tasapainotilanteessa: paino-noste = vastusvoima eli $F_g - F_L = F_D$.

Partikkelit oletetaan yleensä pallomaisiksi leijutuksen teoreettisessa tarkastelussa. Todellisuudessa partikkelit eivät kuitenkaan ole pallomaisia. Tällöin niiden koko voidaan muuttaa vastaavat leijutusominaisuudet omaavaksi pallomaiseksi partikkeliksi määrittämällä partikkelin pallomaisuus, ϕ . (Hyppänen & Raiko 2002, s. 492) Pallomaisuus saadaan jakamalla pallon, jolla on sama tilavuus kuin partikkelilla, pinta-ala partikkelin todellisella pinta-alalla. (Mandö & Rosendahl 2010, s. 3) Täysin pallomaisen kappaleen $\phi = 1$, erittäin hioituneelle hiekalle $\phi = 0,86$ ja karkealle hiekalle noin 0,66. (Hyppänen & Raiko 2002, s. 492)

Partikkelien leijutilat voidaan jaotella Geldartin leijutiladiagrammin avulla. Hiukkaskoon ja hiukkasten sekä leijutuskaasun tiheyden perusteella on saatu neljä tyyppiä: A, B, C ja D.

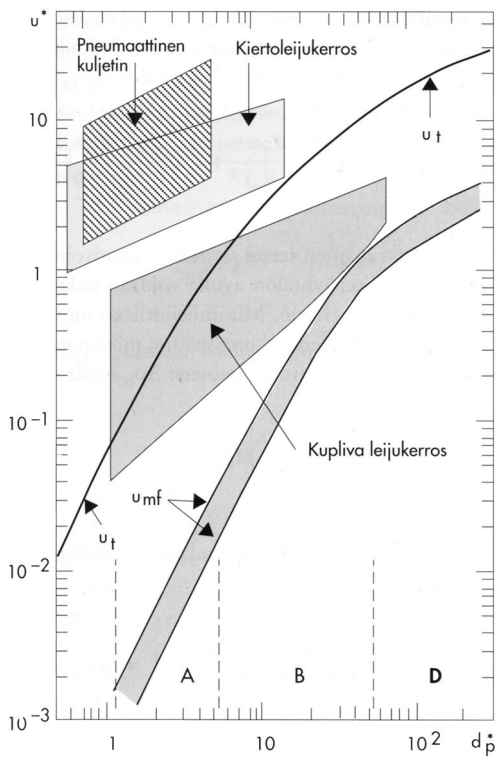
(Hyppänen & Raiko 2002, s. 492-494) Kuvassa 5 on x-akselilla on partikkelien halkaisija ja y-akselilla partikkelin ja leijutuskaasun tiheysero.



Kuva 5. Geldartin leijutiladiagrammi. (Hyppänen & Raiko 2002, s. 493)

- C-tila esiintyy hyvin hienoilla jauheilla, kuten talkilla. Leijutus on erittäin hankalaa.
- A saavutetaan suhteellisen pienillä hiukkasilla ja/tai alhaisella hiukkasten tiheydellä. Leijutilla saadaan aikaan helposti ja kuplat ovat pieniä.
- B esiintyy hiekalla. Syntyy hiukkaskoolla 50–500 μm ja suhteellisen suuritiheyksisillä hiukkasilla. Leijuminen on tehokasta ja kuplat voivat kasvaa hyvin suuriksi.
- D esiintyy suurilla hiukkasilla. Kuplat ovat hyvin suuria ja leijutuskaasun täytyy virrata hyvin nopeasti. Kuplat saattavat täyttää koko leijutuskammion poikkileikkauksen. (Hyppänen & Raiko 2002, s. 494)

Leijutiladiagrammi voidaan esittää myös dimensiottomilla muuttujilla. Kuvassa 6 on yleinen leijutilakaavio, jossa x – akselilla on dimensioton hiukcashalkaisija ja y-akselilla on dimensioton leijutusnopeus. (Hyppänen & Raiko 2002, s. 494–495)



Kuva 6. Yleinen leijutilakaavio. (Hyppänen & Raiko 2002, s. 495)

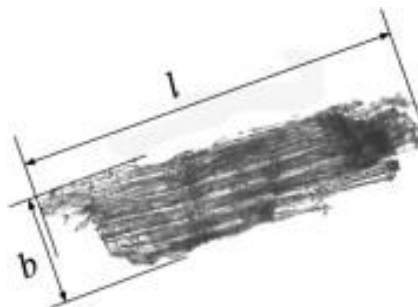
2.6.2 Muodon määrittely

On olemassa lähes rajaton määrä erilaisia partikkelien muotoja. Siksi tarvitaan erilaisia parametreja niiden määrittelemiseen. Yksi tapa määrittellä kappaleet on jakaa ne pallomaisiin ja ei-pallomaisiin sekä säännöllisiin ja epäsäännöllisiin. Jako on subjektiivinen ja voidaan tehdä esimerkiksi sivusuhteen avulla. Pallomaisille partikkeleille tarvitsee määrittellä vain ekvivalentti halkaisija. Taulukossa 3 on muotojen luokittelu. (Mandø & Rosendahl 2010, s. 2)

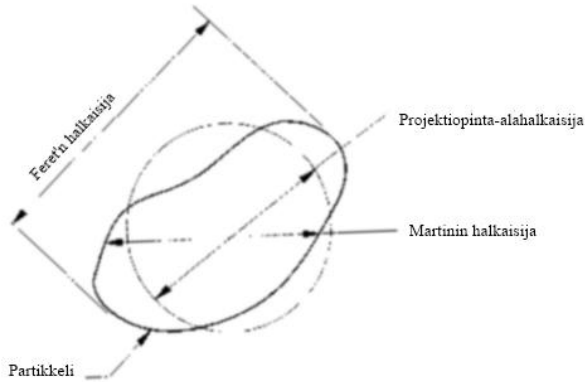
Taulukko 3. Muotojen luokittelu. (Mandø & Rosendahl 2010, s. 2)

	Pallomaisia	Ei-pallomaisia
Säännöllisiä	Polygonit, pyörähdyskappaleet, joilla on matala sivusuhte	Kuutiot, sylinterit, levyt, tetraedrit, pyörähdyskappaleet, joilla on korkea sivusuhte
Epäsäännöllisiä	Jauhettu hiili, hiekka, monet jauheet	Jauhettu biomassa, hiutaleet, tikut, agglomeraatit

Sivusuhteella tarkoitetaan kappaleen pituuden ja leveyden välistä suhdetta eli $A = l/b$. (Guo et al. 2011, s. 2) Kuvasta 7 nähdään, kuinka sellainen voidaan määrittää biomassapartikkelille. Tarvitaan myös ekvivalentti halkaisija. Taulukossa 4 on usein käytettyjä halkaisijoita. Kuva 8 selventää eri halkaisijoita.



Kuva 7. Biomassapartikkelin pituus ja leveys. (Guo et al. 2011, s.2)



Kuva 8. Feret'n ja Martinin halkaisijat sekä projektio-pinta-alahalkaisija. (Yang 2003, s. 2)

Taulukko 4. Yleisesti käytössä olevien halkaisijoiden määritelmiä. (Mandø & Rosendahl 2010, s. 2)

Halkaisija	Määritelmä
Aerodynaaminen halkaisija	Pallon, jolla on yksikkötiheys ja sama terminaalinopeus kuin partikkelilla, halkaisija
Stokesin halkaisija	Pallon, jolla on sama tiheys ja terminaalinopeus kuin partikkelilla, halkaisija
Projektio-pinta-alahalkaisija	Ympyrän, jolla on sama pinta-ala kuin partikkelin projektiolla, halkaisija
Feret'n halkaisija	Keskimääräinen etäisyys partikkelin projektion tangenttien välillä
Martinin halkaisija	Keskimääräinen janteen pituus partikkelin projektiolle
Pinta-alaekvivalenttihalkaisija	Pallon, jolla on sama pinta-ala kuin partikkelilla, halkaisija
Tilavuusekvivalenttihalkaisija	Pallon, jolla on sama tilavuus kuin partikkelilla, halkaisija
Seulan halkaisija	Leveys pienimmälle seulan aukolle, josta partikkeli vielä pääsee läpi
Laserdiffraktiohalkaisija	Halkaisija lasketaan Mie'n tai Fraunhoferin diffraktioteorian mukaan

Partikkelien muodon määrittämisessä ongelmana ei ole muodon luokittelu vaan mittaus. Aerodynaamista erotusta ja sedimentaatiota käytetään muun muassa hienoille jauheille. Kuva-analyysi on tehokas, mutta virheet kasvavat mitä enemmän partikkelit eroavat pallomaisesta ideaalitapauksesta. Täysi 3D-analyysi, jossa käytetään useaa eri kameraa eri kulmista, antaisi tarkan tuloksen, mutta koska tämä menetelmä on vaikea, ei sellaista ole vielä kaupallisesti

saatavilla. Seulat ja laserdiffraktio ovat suosittuja menetelmiä, joilla on omat ongelmansa: pitkä ja ohut partikkeli voi päästä seulan aukosta läpi ja lasermittaus voi tulkita hiutalemaisen partikkelin halkaisijaksi sen suurimman dimension. Tällaisten halkaisijoiden käyttö kuitenkin hävittää tiedon partikkelin muodosta. Siksi on kehitetty muotokertoimia. Ne sopivat erityisesti epäsäännöllisten partikkelien kuvaamiseen, koska niiden muotoa ei voi ilmaista millään muulla tavalla. Automaattinen kuvankäsittely kykenee laskemaan nopeasti muotokertoimet. Taulukossa 5 on esitetty yleisesti käytössä olevia muotokertoimia. Näistä pallomaisuus on eniten käytetty. (Mandø & Rosendahl 2010, s. 2-3)

Taulukko 5. Eri muotokertoimia. Mandø & Rosendahl 2010, s. 3)

Muotokerroin	Määritelmä
Coreyn muotokerroin	Partikkelin pienimmän pääpituusakselin suhde partikkelin keskimääräisen ja pisimmän pääpituusakselin neliöjuureen
Tilavuuksinen muotokerroin	Partikkelin tilavuuden suhde pallon halkaisijaan (joka on korotettu kolmanteen potenssiin), kun pallolla oletetaan olevan sama projektiopinta-ala kuin partikkelilla
Pyöreys	Kulmien keskimääräisen kaarevuussäteen suhde suurimman sisäänpiirretyn ympyrän säteeseen
Pallomaisuus	Pallon pinta-alan suhde samantilavuuksiseen partikkelin pinta-alaan

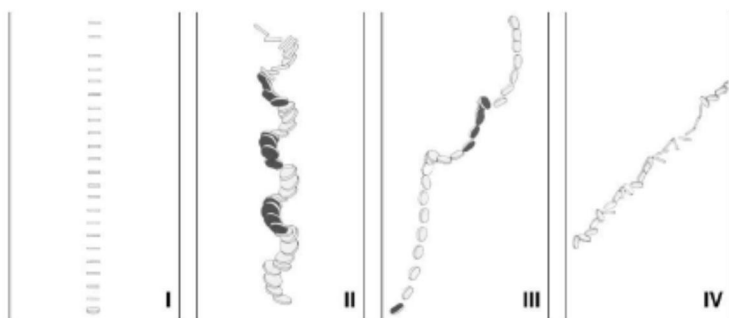
Pallomaisuuden huono puoli on se, että pinta-alan määrittäminen epäsäännölliselle kappaleelle on vaikeaa. Mitä enemmän sivusuhte poikkeaa 1:stä, sitä matalampi on pallomaisuus. Pyöreys voidaan määrittää helpommin mikroskoopi- tai valokuvatarkastelusta. (Yang 2003, s. 4)

Muotokertoimien, etenkin pallomaisuuden, määrittely on tärkeää, koska vastuserrointa kuvaavat yhtälöt perustuvat niihin. Yleisesti vastuserroin on Reynoldsin luvun ja partikkelin pallomaisuuden funktiona. (Mandø & Rosendahl 2010, s. 3)

2.6.3 Sekundääriliike

Vastuskertoimen määrittämisessä ongelmia aiheuttaa sekundääriliike. Pallomaisilla kappaleilla tätä ongelmaa ei juuri ole, koska sekundääriliike on vähäistä. Ei-pallomaisilla kappaleilla vastuskerroin kuitenkin riippuu voimakkaasti kappaleen orientaatiosta. Projektiopinta-ala voi olla moninkertainen toisella orientaatiolla. Monilla ei-pallomaisilla kappaleilla on karakteristinen sekundääriliike, joka riippuu Reynoldsin luvun alueesta ja kappaleen muodosta. Tietyillä Reynoldsin luvun alueilla partikkelit asemoituvat tiettyyn suuntaan. (Mandø & Rosendahl 2010, s. 4)

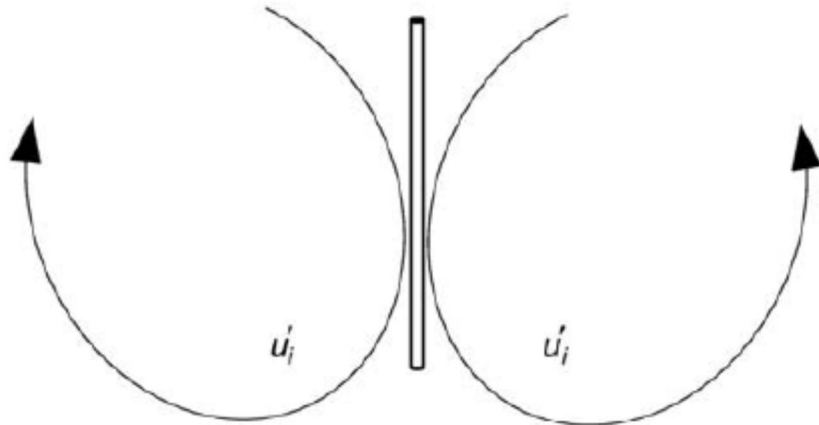
Hyvin alhaisilla Reynoldsin luvuilla ($Re < 0,1$) sekä suorakaiteen muotoiset että pitkulaiset kappaleet liikkuvat hitailla radoilla, niin sanotuilla Jefferyn radoilla. Kohtalaisilla Reynoldsin luvuilla ($0,1 < Re < 100$) inertian vaikutus kasvaa ja partikkelit asettuvat siten, että suurin poikkileikkauspinta-ala on kohtisuoraan virtausta vastaan. Suurilla Reynoldsin luvuilla liikkeen tulee merkittävä sekundääriliike. Sekundääriliikkeen laukaisee turbulenssi partikkelin vanassa. Liikkeen on havaittu korreloivan hyvin dimensiottoman hitausmomentin kanssa. Hitausmomentti on kappaleen taipumus vastustaa rotaatioliikettä toisin sanoen mitä pienempi hitausmomentti, sitä vähemmän kierroksia kappale tekee putoamisensa aikana. (Mandø & Rosendahl, 2010, s.4-5) Kuva 9 selventää kappaleen sekundääriliikettä



Kuva 9. Kappaleen liike eri Reynoldsin luvun alueilla. (Mandø & Rosendahl 2010, s. 5)

2.6.4 Turbulenssin vaikutus

Mahdollinen turbulenssi vaikuttaa merkittävästi kappaleen liikerataan. Tästä asiasta vallitsee suuri epävarmuus, mitä tulee ei-pallomaisiin kappaleisiin. Tässä asiassa on kuitenkin kaksi lähestymistapaa: toinen huomioi vain turbulenssin vaikutuksen kappaleeseen, ja toinen myös kappaleen vaikutuksen turbulenssiin. Turbulenssin vaikutus kappaleeseen on hyvin tunnettu, kun taas kappaleen vaikutus turbulenssiin ei ole. On havaittu, että pyöreät, pienet partikkelit heikentävät kantofaasin turbulenssia, kun taas suuret voimistavat sitä. Tämä johtuu luultavasti siitä, että pyörteistä siirtyy kineettistä energiaa kappaleeseen. On myös mahdollista, että ei-pallomaiset kappaleet, jotka putoavat Reynoldsin luvuilla >100 , pystyvät siirtämään mekaanista energiaansa pyörteiden kineettiseksi energiaksi. Toisaalta, on myös mahdollista, että sekundääriliike vaimentaa kantofaasin turbulenssia siirtämällä pyörteiden kineettistä energiaa sekundääriliikkeeseen. (Mandø & Rosendahl 2010, s. 10–11) Kuvasta 10 nähdään, mihin asentoon kuitu asettuu pyörteiden vaikutuksen takia.



Kuva 10. Kuidun asemoituminen pyörteissä. (Mandø & Rosendahl 2010, s. 11)

2.6.5 Partikkelien väliset voimat leijutuksessa

Leijupedin kiintoainehiukkasten välillä on monia voimia: van Der Waalsin voimat, nestesilta ja sintraantuminen. Van Der Waalsin voimilla tarkoitetaan kaikkia voimia, joihin sisältyy dipoli/dipoli-, dipoli/ei-polaarinen ja ei-polaarinen/ei-polaarinen-vuorovaikutuksia molekyylien välillä. Van der Waalsin voimat vaikuttavat aina. (Seville et al. 1998, s. 1-2)

Nestesiltavoima johtuu pintajännitysvoiman ja paineenvajauksen nestesillassa aiheuttaman voiman summasta. Tämän voiman suuruus on merkittävä esimerkiksi erilaisissa kuivainsovelluksissa. Nestesiltavoiman suuruutta on hyvin vaikea laskea. Yllättävää nestesillan aiheuttamassa voimassa on se, että voiman suuruus pienenee nestekuorman kasvaessa. (Seville et al 1998, s. 262–264)

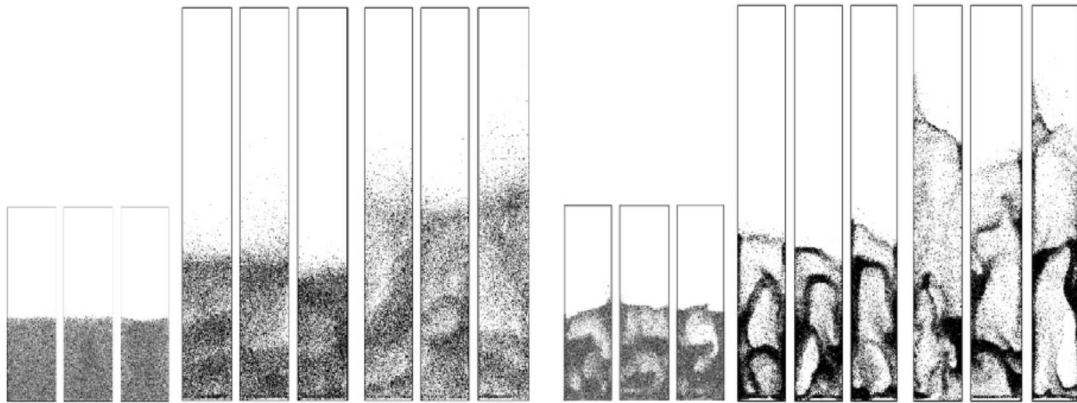
Sintraantuminen tarkoittaa partikkeleiden yhteensulautumista, joka johtuu muun muassa diffuusiosta. Partikkeleiden välille muodostuu niin sanottu kaula. Kaulan paksuus kasvaa ajan mukana. Sintraantuminen lisääntyy lämpötilan noustessa. (Seville et al 1998, s. 264–265)

Leijutuksessa vaikuttavat myös sähköstaattiset voimat. Varauksia syntyy partikkeli-partikkeli-, partikkeli-kaasu- ja partikkeli-seinä-kontakteista. Samat kontaktit myös purkavat varauksia. Ilmiö on hyvin monimutkainen ja sitä vaikeuttaa entisestään virtauksen heterogeeninen luonne. Jos varauksia syntyy enemmän kuin niitä purkautuu, syntyy nettovaraus esimerkiksi petiin. Varaus johtaa partikkelien segregatioon ja lopulta partikkelien agglomeroitumiseen ja seinämien likaantumiseen. (Bi 2005, s. 395–396)

2.6.6 Virtauksen muuttuminen heterogeeniseksi

Partikkelin väliset vuorovaikutukset tiheässä pedissä voidaan määrittää tilavuusosuuden ε avulla. Partikkelien välisen tyhjän tilan pienentyessä pienenee vastusvoima tietyllä Reynoldsin luvulla. Se, kuinka heterogeeniseksi virtaus muuttuu, riippuu siitä, kuinka epälineaarinen vastusvoima on. Mitä epälinearisempi vastusvoima on, sitä heterogeenisemmaksi virtaus muuttuu. Virtauksen heterogeenisuutta voidaan ilmaista Frouden luvulla, joka on satunnaisen hiukkasen kineettisen energian ja potentiaalienergian suhde. Virtauksen muuttumista heterogeeniseksi vahvistaa entisestään partikkelien törmäysten

hajaantuminen. Tämä tapahtuu siitä huolimatta, olivat törmäykset ideaalisia tai ei-ideaalisia. (Li & Kuipers 2003, s. 714–715) Kuvassa 11 on vasemmalla virtauksen muuttuminen heterogeeniseksi, kun törmäykset ovat ideaalisia. Oikealla olevassa kuvassa törmäykset eivät ole ideaalisia.

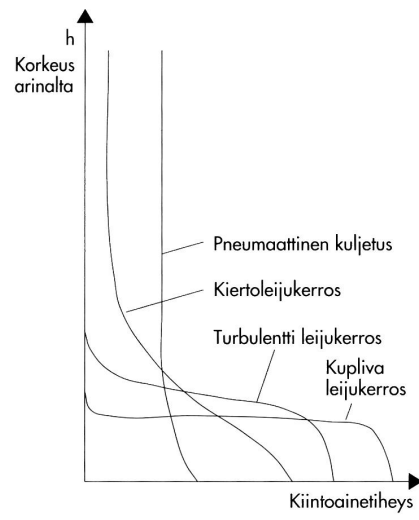


Kuva 11. Virtauksen muuttuminen heterogeeniseksi. (Li & Kuipers 2003, s. 714)

2.6.7 Kiintoainetiheys

Kun virtaavan kaasun nopeus kasvaa kiertoleijuvirtauksen alueelle, kiintoainetiheys reaktorin yläosissa kasvaa. Osa ylös virtaavista hiukkasista muodostaa tihentymiä, joista suurin osa laskeutuu alaspäin. Näitä tihentymiä kutsutaan myös nimellä klusteri. Klustereita syntyy ainakin reaktorin seinäpintojen läheisyydessä. Reaktoriin muodostuu sisäinen kierto, kun hiukkaset kulkeutuvat yksittäisinä ylös ja palaavat klustereina alas. (Hyppänen & Raiko 2002, s. 505)

Pystysuunnassa leijutila voidaan jakaa kahteen alueeseen: alaosan leijukerrokseen ja yläosan kiintoaineesta vapaaseen virtaustilaan. Virtausnopeuden kasvaessa tiheys yläosissa kasvaa ja alaosissa pienenee. Lopulta saatetaan päästä lähes vakioitiheyteen pystysuunnassa. (Hyppänen & Raiko 2002, s. 491–492) Kuva 12 selventää kiintoainepitoisuuden muutosta pystysuunnassa.

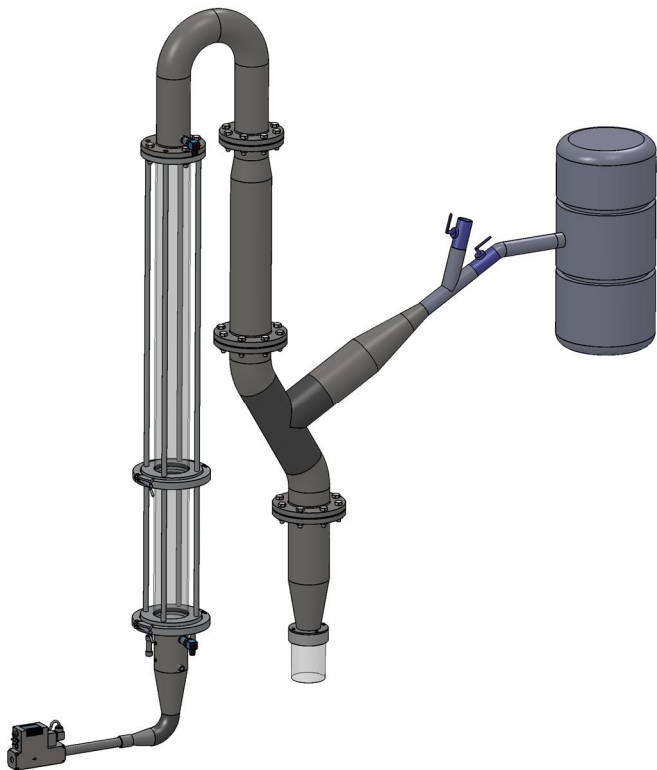


Kuva 12. Kiintoainepitoisuuden muutos pystysuunnassa eri leijukerrostyypeissä. (Hyppänen & Raiko 2002, s. 493)

3 KOKEELLINEN TUTKIMUS

3.1 Laitteistokuvaus

Tässä diplomityössä leijutettiin biomassaa kuvassa 13 näkyvällä laitteistolla. Laitteistossa on kolme mittausta: kaksi painemittaria ja yksi lämpötilamittari. Painemittarien mitta-alue on -100 mbar - 100 mbar paine-eroa ilmanpaineeseen. Ilmavirran määrää säädetään massavirtasäätimellä. Ilmavirran nopeutta voidaan säätää alueella 0 - 10,5 m/s. Laitteistoon tulee paineilmaa paineilmaverkosta (paine 9 bar). Lasiseen näytesäiliöön laitetaan näyte. Tietyllä nopeudella tietyn kokoiset ja muotoiset partikkelit päätyvät näyteastiaan (Kuvassa keskellä, alhaalla). Ilma johdetaan ulos ja mahdolliset ylijäämäpartikkelit päätyvät hienosuodattimeen. (kuvassa äärioikealla)



Kuva 13. Leijutuslaitteiston rakenne.

3.2 Leijutus ja seulonta

Näytteet kuivattiin(ei hiekkaa tai lasikuulia) ennen leijutusta uunissa lämpötilassa 115 °C 24 tunnin ajan. Seuraavaksi näyte punnittiin vaa'alla. Turvetta/haketta/hiekkaa/lasikuulia leijutettiin nopeuksilla 1-6 m/s niin kauan, että kaikki kyseisellä nopeudella näytteestä lähtevät partikkelit olivat lähteneet. Tässä työssä käytetty aika oli noin 5 minuuttia, jonka uskottiin riittävän. Näyteastian saatu massa punnittiin.

Seulontakokeissa oli samat alkutoimenpiteet kuin leijutuskokeissa, kuten punnitus ja kuivaus. Näytteet seulottiin(ei hiekkaa tai lasikuulia) seulontakoneessa 15 minuutin ajan. Laitteessa on seuraavat seula-aukon koot: 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,18, 0,125, 0,09 ja 0,063 mm. Hienoin aines päätyi laitteen pohjalle. Jokaiseen seulaan jäänyt näyte punnittiin ja laitettiin näytepussiin.

3.3 Partikkelien koon ja muodon analyysi

3.3.1 Mikroskooppikuvat

Partikkeleista otettiin kuvia kameralla, joka oli kytketty mikroskooppiin. Osa partikkeleista voitiin kuvata pelkästään kameralla. Mikroskoopilla otetuissa kuvissa suurennos oli 12,6-kertainen pois lukien seulan pohjalle jäänyt turve, joka vaati 20-kertaisen suurennoksen. Kuvan ottamisessa oli tarkoituksena saada mahdollisimman hyvä kuva eli partikkeleita oli paljon, kuitenkin niiden välissä täytyi olla riittävästi tilaa, jotta kuvankäsittely ja analyysi eivät myöhemmin vaikeutuisi. Oli siis vältettävä kuvia, joissa olisi paljon agglomeroituneita ja toisissaan kiinni olevia partikkeleita. Kuva 14 on mikroskooppikuva hakepartikkeleista ja kuva 15 on mikroskooppikuva turvepartikkeleista. Kuva 16 on kameralla otettu kuva hakepartikkeleista.



Kuva 14. Hakepartikkeleita 0,18 mm:n seualta, Suurenos 12,6-kertainen.



Kuva 15. Turvepartikkeleita seulan pohjalta. Suurenos 20-kertainen.



Kuva 16. Hakepartikkeleita 2 mm:n seualta.

3.3.2 Kuvankäsittely ja kuva-analyysi

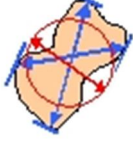
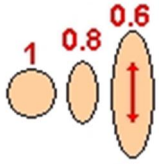


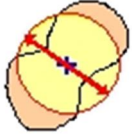
Kuvat käsiteltiin, jotta partikkelit saataisiin selkeästi esiin taustasta. Käytettyjä keinoja olivat esimerkiksi värien muuttaminen mustavalkoisiksi sekä kontrastin lisääminen. Toisissaan kiinni olevat ja agglomeroituneet partikkelit poistettiin, koska ne vääristävät tuloksia.

Käsitellyt kuvat analysoitiin analySIS -ohjelmalla. Ohjelmalla etsittiin partikkelit valitulta alueelta. Seuraavaksi valittiin halutut ominaisuudet mitä ohjelman haluttiin laskevan kuten massakeskipisteet, halkaisijat ja pinta-alat.

3.4 Käsitteet

Taulukossa 6 on esitetty diplomityössä käytettyjen mittojen määritelmät ja esitetty niitä havainnollistava kuva. Määritelmät ja kuvat on otettu analySIS-ohjelmasta.

Taulukko 6. Mittojen määritelmät.

	<p>Keskihalkaisija: Aritmeettinen keskiarvo kaikista halkaisijoista välillä 0-179 astetta, kun askel on 1 aste.</p>
	<p>Pallomaisuus: Partikkelin pallomaisuus tai ”pyöreys”, joka on laskettu keskimomenttien perusteella.</p>
	<p>Maksimihalkaisija: Partikkelin maksimihalkaisijan määrittämiseksi erilaisten arviointiakselien halkaisijat määritetään. Arviointiakselia muutetaan 1 asteen välein, ja joka kulmaa vastaava maksimihalkaisija määritetään.</p>
	<p>Minimihalkaisija: Partikkelien minimihalkaisija välillä 0-179 astetta, kun askel on 1 aste.</p>
	<p>ECD: Ympyrän, jolla on sama pinta-ala kuin partikkelilla, halkaisija.</p>

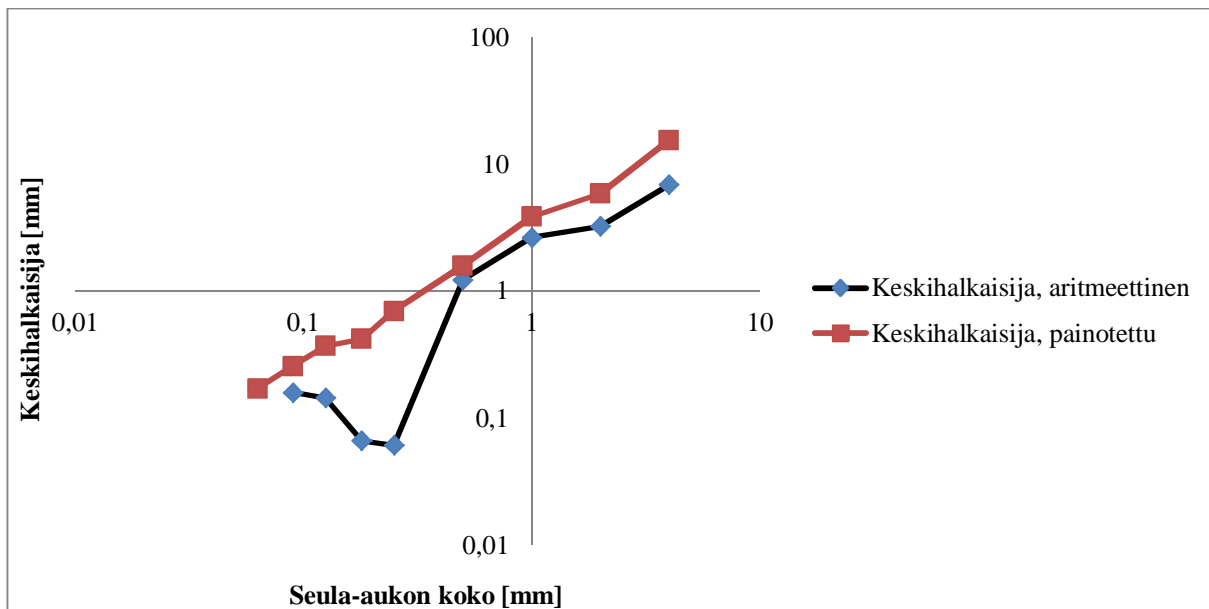
4 TULOKSET JA TULOSTEN KÄSITTELY

4.1 Keskiarvon valinta

Mittojen esittämisessä on käytetty painotettua keskiarvoa. Tämä eliminoi esimerkiksi seulotun turpeen tapauksessa vaikuttavien sähköstaattisten voimien häiriövaikutuksen. Osassa fraktioita oli paljon pientä pölyä, joka olisi kuulunut halkaisijansa perusteella pienemmälle seulalle. Painotetun keskiarvon laskennassa käytetään tässä työssä partikkelien pinta-alaa 2D-projektiosta. Keskiarvo lasketaan yhtälöstä 5, missä x_{kesk} on painotettu keskiarvo, A_p on projektiopinta-ala ja x_n on mielivaltainen muuttuja.

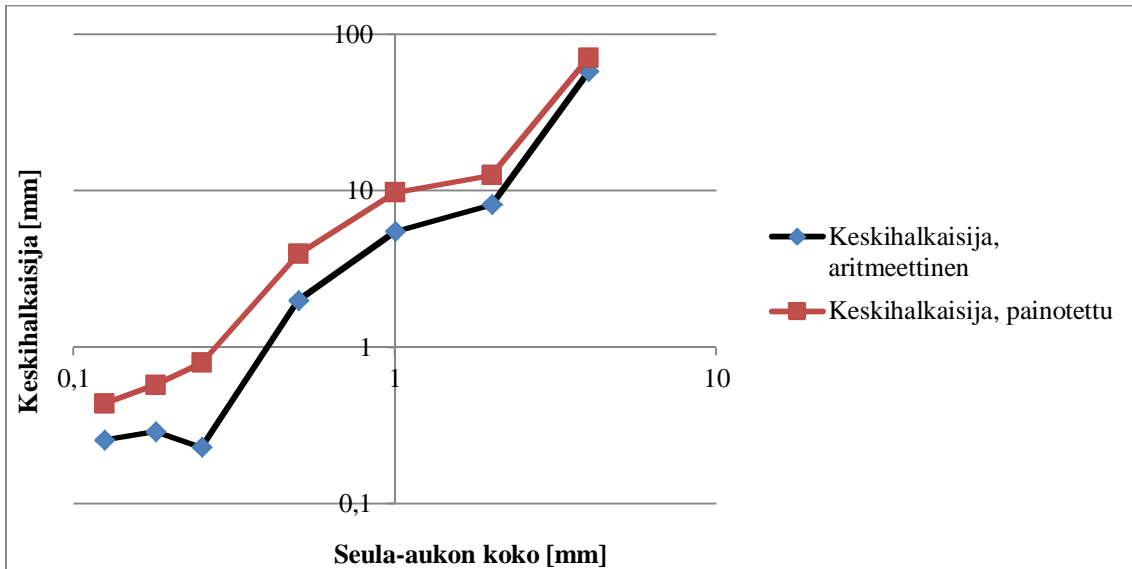
$$x_{\text{kesk}} = \frac{A_{p1}x_1 + A_{p2}x_2 + \dots + A_{pn}x_n}{A_{p1} + A_{p2} + \dots + A_{pn}} \quad (5)$$

Kuvassa 17 on esitetty turvepartikkelien aritmeettinen ja pinta-alalla painotettu keskihalkaisija eri seuloilla. 0,09 mm:n seulan jälkeen tulee raju lasku, joka johtuu hyvin pienistä turvepölyhiukkasista. Painotettua keskiarvoa käytettäessä lasku on hävinnyt.



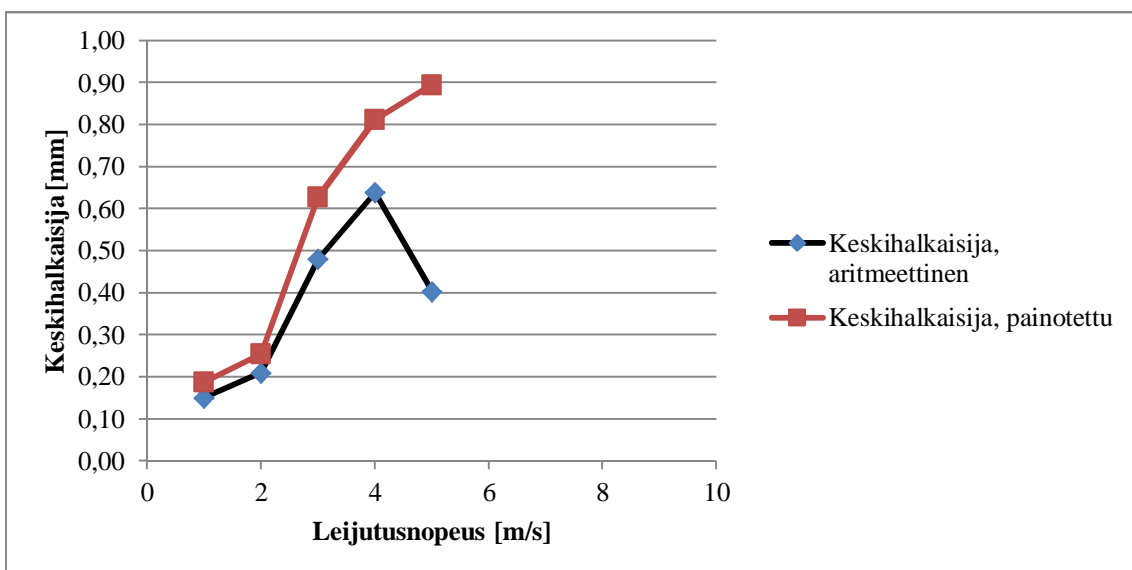
Kuva 17. Turvepartikkeleiden aritmeettinen ja pinta-alalla painotettu keskihalkaisija eri seuloilla.

Kuvassa 18 on hakepartikkelien aritmeettinen ja painotettu keskihalkaisija keskihalkaisija eri seuloilla. Aritmeettisessa keskihalkaisijassa on lasku kohdassa 0,25 mm. Painotettua keskihalkaisijaa käytettäessä ei ole laskua.



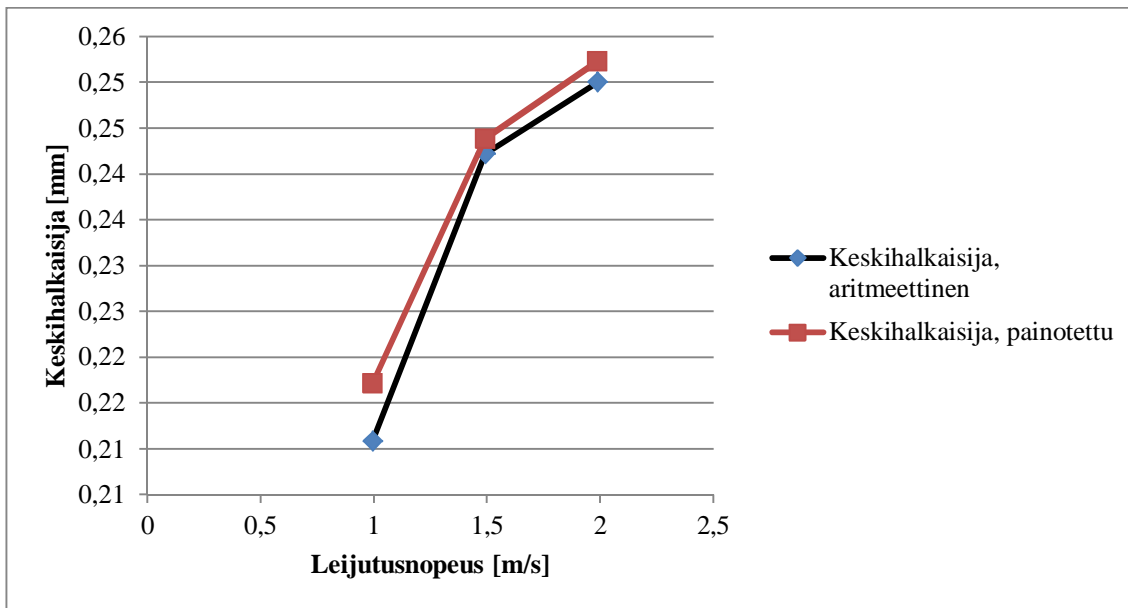
Kuva 18. Hakepartikkelien aritmeettinen ja pinta-alalla painotettu keskihalkaisija eri seuloilla.

Kuvassa 19 on hiekkapartikkelien aritmeettinen ja pinta-alalla painotettu keskihalkaisija. Kohdassa 5 m/s on huomattava lasku. Painotettua keskihalkaisijaa käytettäessä ei ole laskua.



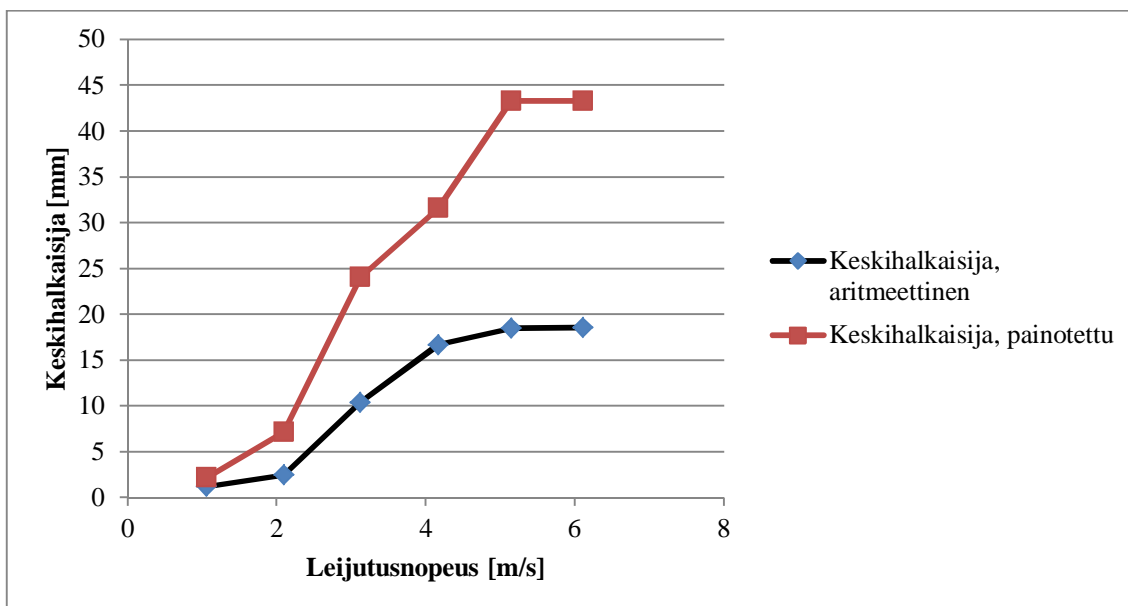
Kuva 19. Hiekkapartikkelien aritmeettinen ja pinta-alalla painotettu keskihalkaisija.

Kuvassa 20 on lasikuulien aritmeettinen keskihalkaisija. Käyrät ovat melkein yhtenevät.



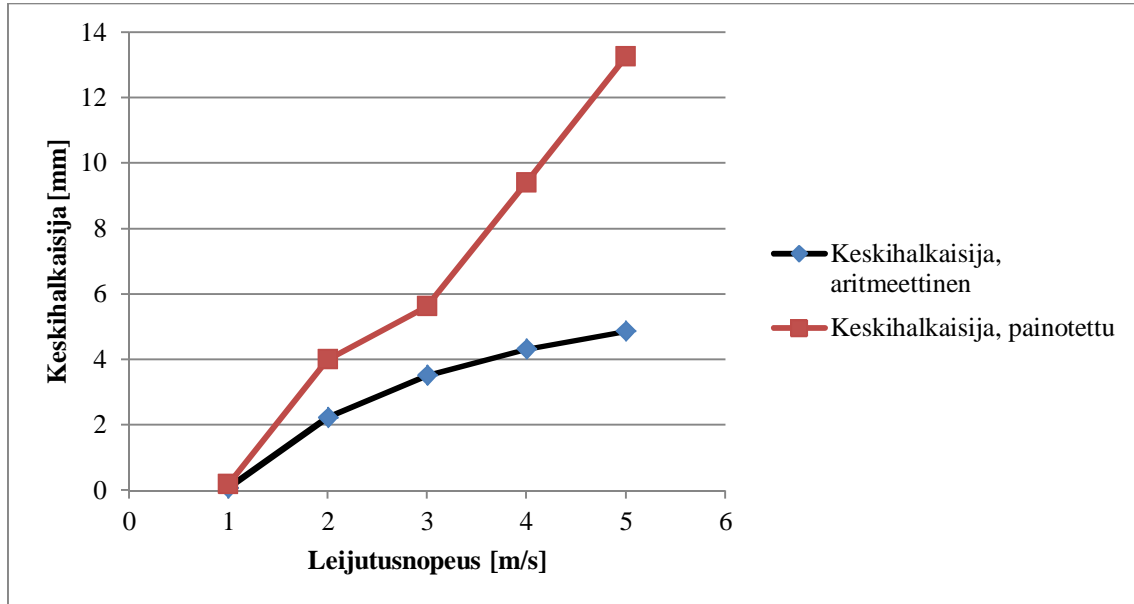
Kuva 20. Lasikuulien aritmeettinen ja pinta-alalla painotettu keskihalkaisija.

Kuvassa 21 on esitetty leijutettujen hakepartikkeleiden aritmeettinen keskihalkaisija ja pinta-alalla painotettu keskihalkaisija eri leijutusnopeuksilla. Painotettu keskihalkaisija on huomattavasti suurempi.



Kuva 21. Leijutettujen hakepartikkelien aritmeettinen ja pinta-alalla painotettu keskihalkaisija.

Kuvassa 22 on esitetty turvepartikkelien aritmeettinen keskihalkaisija ja pinta-alalla painotettu keskihalkaisija. Huomataan, että halkaisijat ovat pinta-alalla painotettaessa suuremmat.



Kuva 22. Leijutettujen turvepartikkelien aritmeettinen ja pinta-alalla painotettu keskihalkaisija.

4.2 Seulontakokeiden tulokset

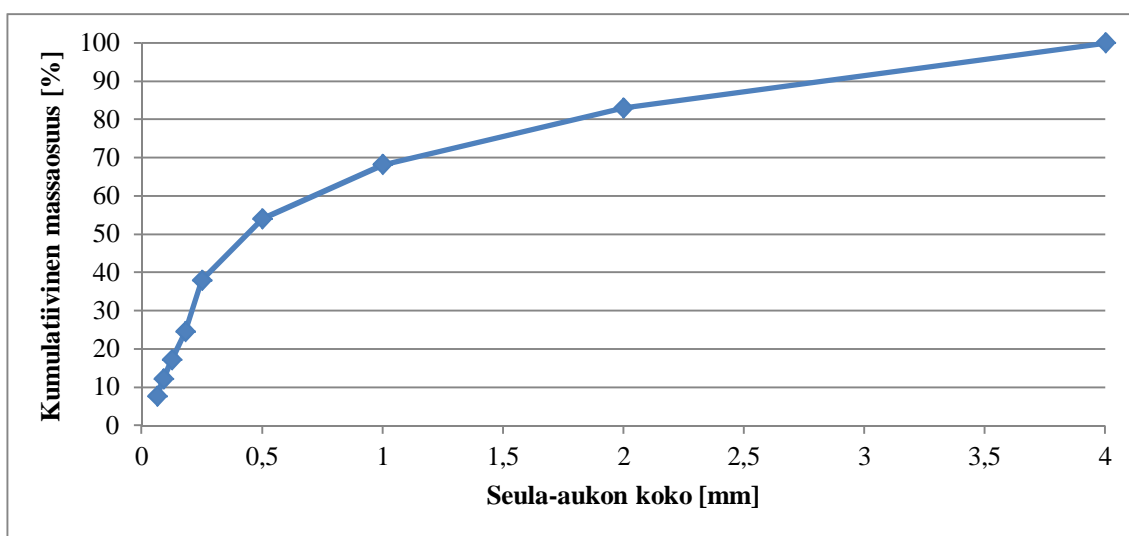
4.2.1 Turve

Taulukossa 7 on esitetty seulotun turpeen eri seuloille jäänyt massa. Näiden massojen perusteella on laskettu kumulatiivinen massaosuus alkaen pohjalla kertyneen turpeen massasta. Taulukosta nähdään, että yli puolet näytteen massasta on jäänyt seulalle, jonka aukon koko on 0,5 mm tai sitä pienempiin.

Taulukko 7. Eri seuloille kertyneen turpeen massa sekä kumulatiivinen massaosuus seula-aukon koon mukaan.

Seula-aukon koko(mm)	Massa(g)	Kumulatiivinen massaosuus(%)
pohja	3,3	3,55
0,063	3,9	7,74
0,09	4,2	12,25
0,125	4,57	17,16
0,18	6,87	24,54
0,25	12,51	37,98
0,5	15	54,09
1	13,17	68,24
2	13,75	83,01
4	15,81	100,00
yhteensä	93,08	-

Kuvassa 23 on esitetty taulukon 7 kumulatiivinen massaosuus käyrän muodossa.



Kuva 23. Kumulatiivinen massaosuus seula-aukon koon mukaan.

Taulukko 8. Turvepartikkelien maksimi-, keski- ja minimihalkaisijat.

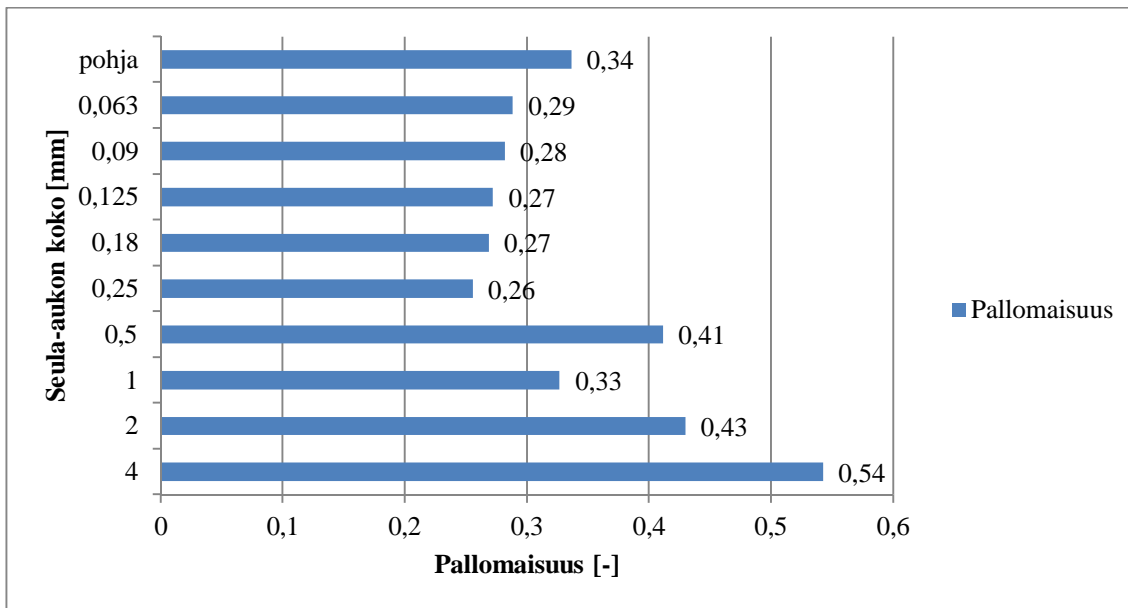
Seula-aukon koko(mm)	Maksimihalkaisija(mm)	Keskihalkaisija(mm)	Minimihalkaisija(mm)
pohja	0,092	0,081	0,050
0,063	0,193	0,171	0,099
0,09	0,291	0,256	0,148
0,125	0,418	0,370	0,209
0,18	0,479	0,422	0,247
0,25	0,794	0,698	0,392
0,5	1,816	1,588	1,042
1	4,398	3,860	2,361
2	6,661	5,877	4,052
4	17,219	15,490	11,728

Taulukossa 8 on esitetty turvepartikkelien maksimi-, keski- ja minimihalkaisijat. Maksimihalkaisija on lähempänä keskihalkaisijaa. Kaikissa kokoluokissa keskihalkaisija on suurempi kuin edeltävän seulan seula-aukon koko. Taulukosta nähdään myös, että minimihalkaisija on suurempi kuin edeltävän seula-aukon koko. Selitys tähän löytyy luultavasti analySIS-ohjelman tavasta määrittää minimihalkaisija.

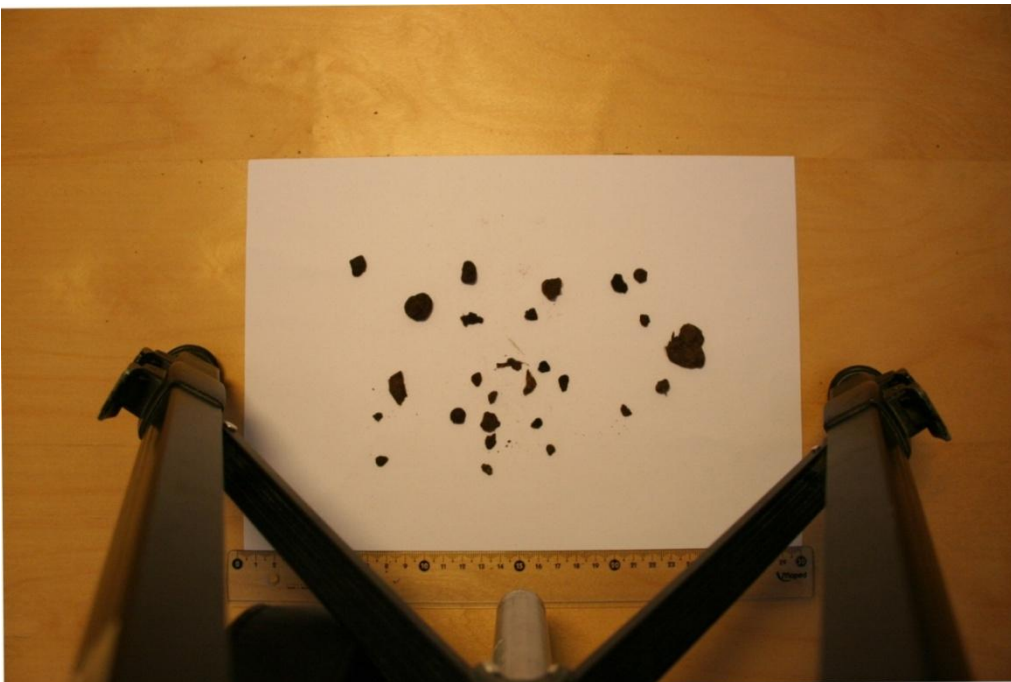
Painotettu keskiarvo on eliminoinut kokoluokissa 0,125 mm, 0,18 mm ja 0,25 mm olleen hienojakoisen pölyn vaikutuksen. Seulontaan ovat vaikuttaneet sähköstaattiset voimat, jotka olivat erittäin voimakkaita. Turvepöly tarttui näytepussien ja seulojen seiniin hyvin herkästi. Turvepartikkeleita, jotka kuuluisivat kokonsa puolesta pienemmille seuloille, jäi suuremmille seuloille.

Turvetta on mahdollisesti myös murskaantunut, koska partikkelit ovat hyvin hauraita, mikä voi myös vääristää seulonnan tulosta. Seulontaan vaikuttaa myös partikkelin muoto: pitkä ja ohut, neulamainen kappale voi päästä seula-aukosta läpi. Seulojen eroosiota ei ole syytä epäillä eikä seula-aukkojen tukkeutumista seulottaessa. Turve myös kuivattiin, joten kosteuden aiheuttamaa agglomeraatiota tuskin on tapahtunut.

Kuvassa 24 on esitetty turvepartikkelin pallomaisuus. Pallomaisuus pienenee pohjalle jääneestä turpeesta 0,25 mm:n seulalle asti. Siitä se kasvaa suurempiin kokoluokkiin siirryttäessä. Tulos on odotettu, koska käytetty turve oli erittäin pyöreää suurimmissa kokoluokissa. Kuvassa 25 esitetty turvepartikkeleita 4 mm:n seualta.



Kuva 24. Turvepartikkeleiden pallomaisuus eri seuloilla.



Kuva 25. Turvepartikkeleita 4 mm:n seualta.

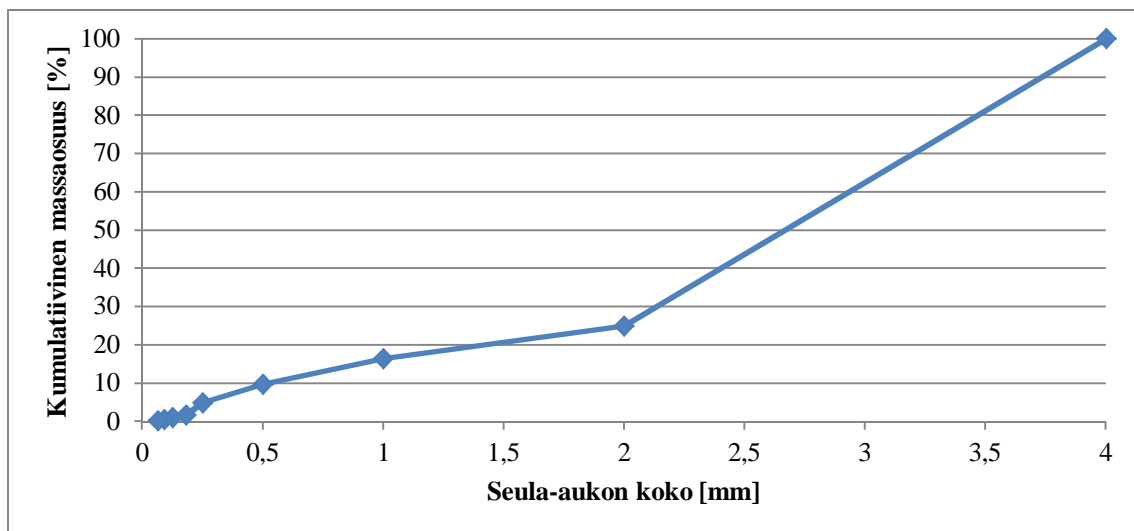
4.2.2 Hake

Taulukossa 9 on esitetty eri seuloille kertyneen hakkeen massa. Näiden massojen perusteella on laadittu kumulatiiviset massaosuudet seula-aukon koon mukaan. Taulukosta nähdään, että noin 75 % hakkeesta on jäänyt 4 mm:n seulalle. Tulos on odotettu, koska käytetty hake oli erittäin karkeaa.

Taulukko 9. Hakkeen massa eri seuloilla ja kumulatiivinen massaosuus.

Seula-aukon koko(mm)	Massa(g)	Kumulatiivinen massaosuus(%)
pohja	0,2	0,09
0,063	0,25	0,21
0,09	0,49	0,43
0,125	1,07	0,93
0,18	1,51	1,62
0,25	7,09	4,88
0,5	10,44	9,69
1	14,7	16,45
2	18,49	24,96
4	163,11	100,00
yhteensä	217,35	-

Kuvassa 26 on taulukon 9 tuloksista piirretty käyrä. Käyrästä nähdään selkeästi, miten epätasaisesti hake jakautuu eri seuloille.



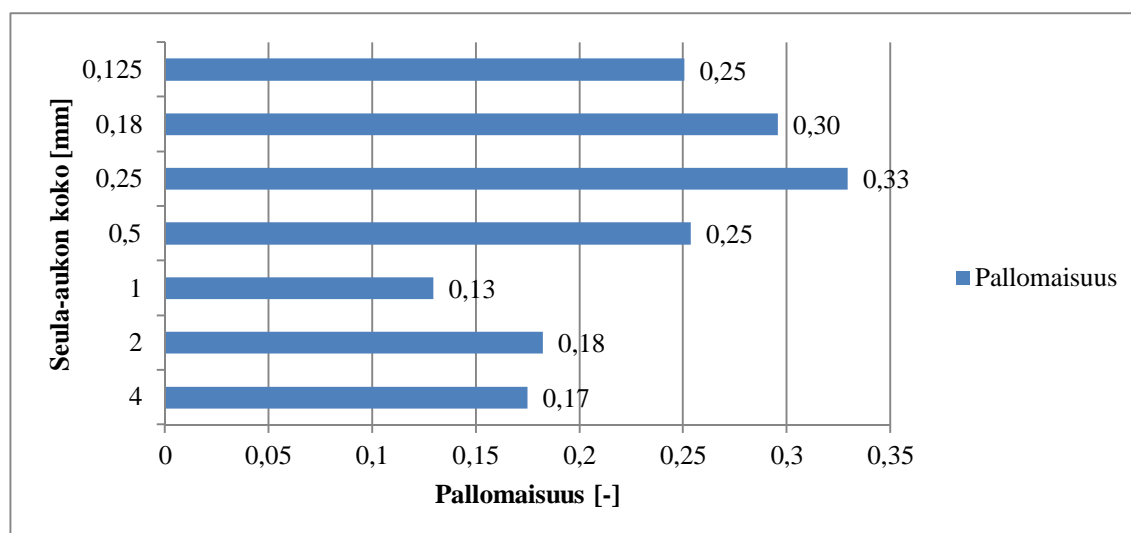
Kuva 26. Seuloille jääneen hakkeen kumulatiivinen massaosuus seula-aukon koon mukaan.

Taulukko 10. Hakepartikkelien maksimi-, keski- ja minimihalkaisijat.

Seula-aukon koko(mm)	Maksimihalkaisija(mm)	Keskihalkaisija(mm)	Minimihalkaisija(mm)
0,125	0,493	0,438	0,209
0,18	0,650	0,578	0,302
0,25	0,907	0,800	0,490
0,5	4,404	3,951	1,870
1	10,873	9,793	3,967
2	14,026	12,590	5,485
4	78,537	70,824	33,018

Taulukossa 10 on esitetty hakepartikkelien maksimi-, keski- ja minimihalkaisijat. (Taulukossa ei ole seuloja, joiden seula-aukon koko on pienempi kuin 0,125 mm, koska näille seuloille jäi hyvin vähän haketta, joten se päätettiin yhdistää 0,125 mm:n seulalle jääneeseen hakkeeseen.) Keskihalkaisija on kaikissa kokoluokissa suurempi kuin seula-aukon koko. Tässäkin tapauksessa on minimihalkaisija suurempi kuin edeltävän seulan seula-aukon koko. Painotetun keskiarvon käyttäminen eliminoi kuvissa näkyvän pienen pölyn vaikutuksen. Tätä pölyä oli erityisesti kokoluokissa 0,18 mm ja 0,25 mm. Kuten turpeen tapauksessa, sähköstaattiset voimat olivat häiritseviä. Muoto on voinut vaikuttaa merkittävästi. Kosteus ei ole aiheuttanut partikkelien agglomeroitumista ja siten häirinnyt seulontaa ainakaan merkittävästi, koska hakenäyte kuivattiin 24 tunnin ajan varsin kuivaksi.

Kuvassa 27 on esitetty hakepartikkelien pallomaisuus. Pallomaisuus näyttäisi nousevan 0,25 mm:n seulaan asti ja sitten laskevan huomattavasti 1 mm:n seulalle mentäessä. Isommissa kokoluokissa hakepartikkelit olivat erittäin pitkiä säleitä, jopa 10 cm:n mittaisia. Kuvassa 28 on esitetty hakepartikkeleita 4 mm:n seualta.



Kuva 27. Hakepartikkeleiden pallomaisuus eri seuloilla.



Kuva 28. Hakepartikkeleita 4 mm:n seualta.

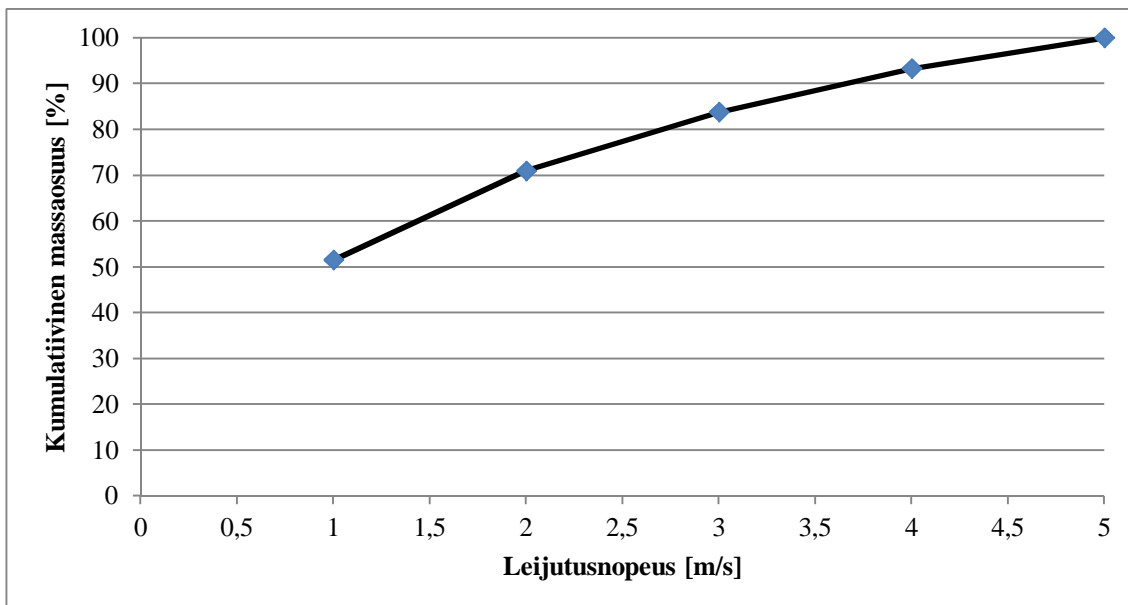
4.3 Leijutuskokeiden tulokset

4.3.1 Turve

Taulukossa 11 on esitetty eri leijutusnopeuksilla lähteneen turpeen massa sekä massaosuus että kumulatiivinen massaosuus. Turvetta leijutettiin nopeuksilla 1-5 m/s. Kuvassa 29 on esitetty kumulatiivinen käyrä eri leijutusnopeuksilla säiliöstä lähteneestä turpeesta. Yli 90 % turpeen massasta on lähtenyt nopeuteen 4 m/s mennessä.

Taulukko 11. Eri leijutusnopeuksilla poistuneen turpeen massa ja kumulatiivinen massaosuus. (* massaosuus)

Leijutusnopeus(m/s)	Massa(g)	Kumulatiivinen massaosuus(%)
arina	1,52	1,26*
puhdistus	12,66	10,45*
hienosuodatin	2,11	1,74*
1	46,06	51,49
2	23,65	71,02
3	15,47	83,79
4	11,52	93,30
5	8,11	100
yhteensä	121,1	-



Kuva 29. Leijutetun turpeen kumulatiivinen massaosuus leijutusnopeuden mukaan.

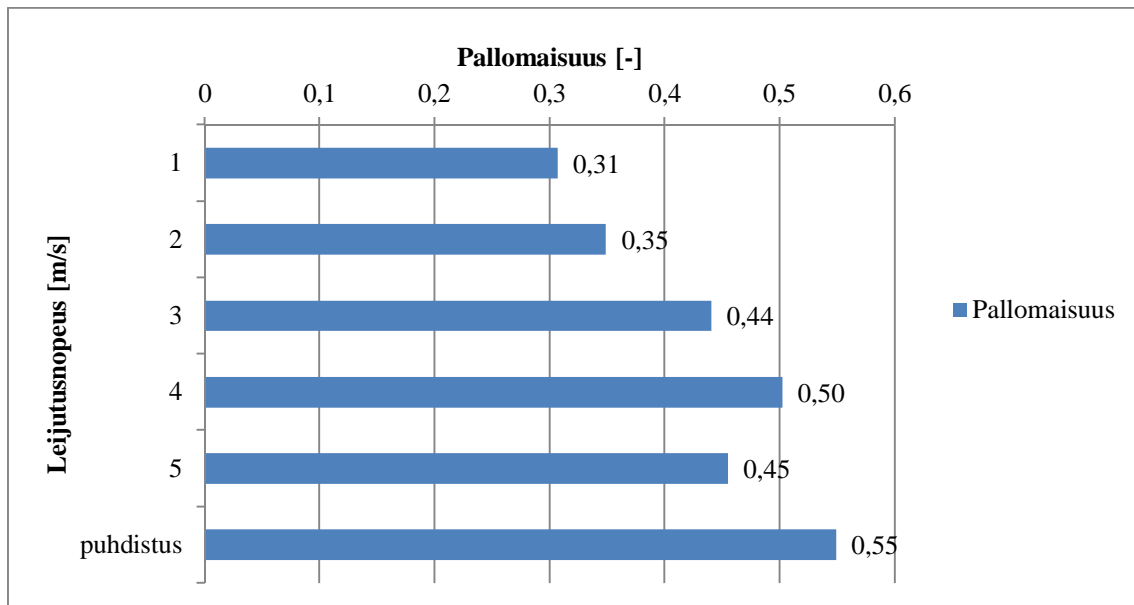
Taulukossa 12 on esitetty turvepartikkelien maksimi-, keski- ja minimihalkaisijat.

Taulukko 12. Turvepartikkelien maksimi-, keski- ja minimihalkaisijat.

Leijutusnopeus(m/s)	Maksimihalkaisija(mm)	Keskihalkaisija(mm)	Minimihalkaisija(mm)
1	0,220	0,194	0,117
2	4,529	4,002	2,447
3	6,357	5,625	3,992
4	10,424	9,402	7,079
5	14,811	13,255	8,633
puhdistus	18,578	16,664	13,239

Taulukossa 12 on esitetty turvepartikkelien maksimi-, keski- ja minimihalkaisijat. Halkaisijoissa tapahtuu hyppy 1 m/s:n ja 2 m/s:n välillä. Siitä eteenpäin nousu on hyvin tasaista, ja keskihalkaisija on lähempänä maksimihalkaisijaa. Partikkelien halkaisija vaikuttaa leijuvuuteen eli mitä isompi partikkeli, sitä suurempi leijutusnopeus tarvitaan.

Kuvassa 30 on esitetty turvepartikkelien pallomaisuus. Pallomaisuus kasvaa 4 m/s:n asti, sitten seuraa lasku. Pallomaisuus on toinen leijuvuuteen vaikuttava tekijä. Mitä pienempi pallomaisuus, sitä pienempi leijutusnopeus tarvitaan. Kaikkein suurin pallomaisuus on puhdistuksessa poistetulla turpeella. Kuvassa 31 on esitetty 4 m/s:n leijutusnopeudella saatuja turvepartikkeleita.



Kuva 30. Turvepartikkeleiden pallomaisuus eri leijutusnopeuksilla.



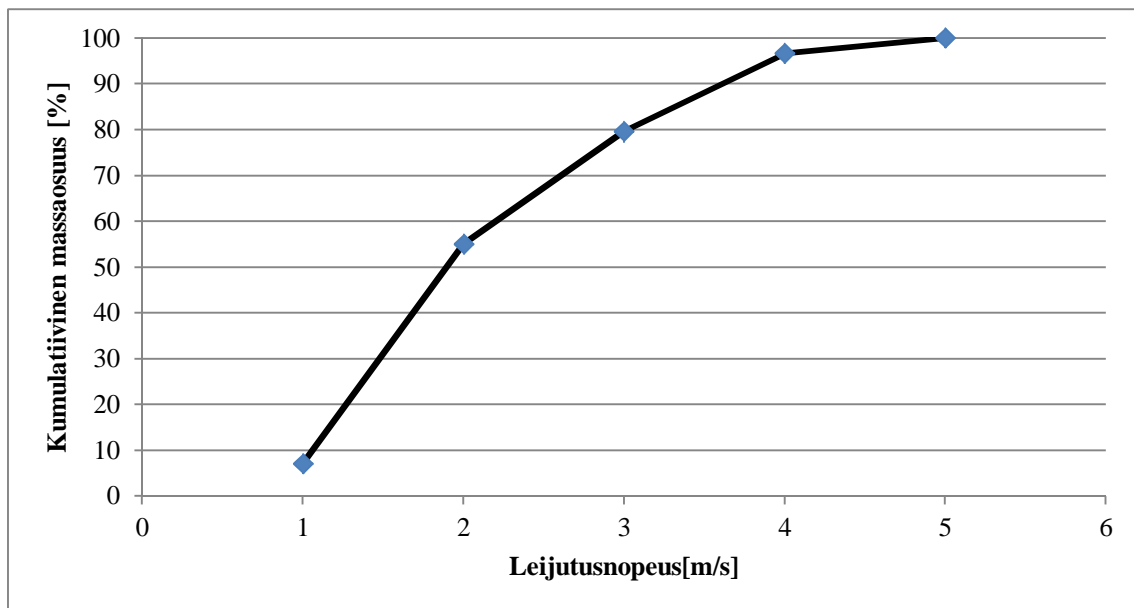
Kuva 31. Leijutettuja turvepartikkeleita(leijutusnopeus 4 m/s).

4.3.2 Hiekka

Taulukossa 13 on esitetty eri leijutusnopeuksilla lähteneen hiekan massa ja kumulatiivinen massaosuus. Hiekkaa leijutettiin nopeuksilla 1-5 m/s. Suurin osa hiekasta on lähtenyt nopeuteen 2 m/s mennessä. Hyvin pieni osa täytyi puhaltaa ulos puhdistuksessa tai jäi arinalle. Kuvassa 32 on esitetty taulukon tuloksista piirretty käyrä.

Taulukko 13. Hiekan massa ja kumulatiivinen massaosuus eri leijutusnopeuksilla. (* massaosuus)

Leijutusnopeus(m/s)	Massa(g)	Kumulatiivinen massaosuus(%)
Puhdistus	15,65	0,84*
Arina+suodatin	28,12	1,50*
1	46,07	7,13
2	941,95	55,07
3	461,43	79,70
4	317,05	96,63
5	63,22	100,00
yhteensä	1873,49	-



Kuva 32. Kumulatiivinen massaosuus eri leijutusnopeuksilla.

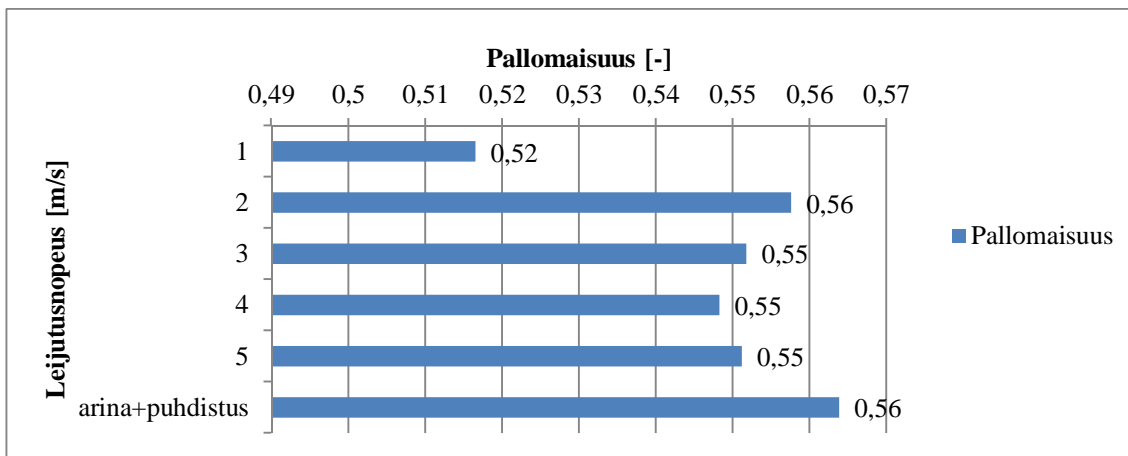
Taulukossa 14 on esitetty hiekkapartikkelien maksimi- keski- ja minimihalkaisijat. Nopeuksilla 1 m/s ja 2 m/s lähtenyt hiekka on hyvin samankokoista. Nopeudella 3 m/s lähtenyt hiekka on 2,5 kertaa suurempaa keskihalkaisijaltaan. Puhdistuksessa lähtenyt hiekka on kooltaan nopeuksilla 2 m/s ja 3 m/s lähteneiden hiekkojen välissä. Tämä hiekka oli

kooltaan hyvin vaihtelevaa. Tähän fraktioon joutunut hiekka on peräisin leijutusputken seinistä, joihin se kiinnittyi sähköstaattisten voimien takia.

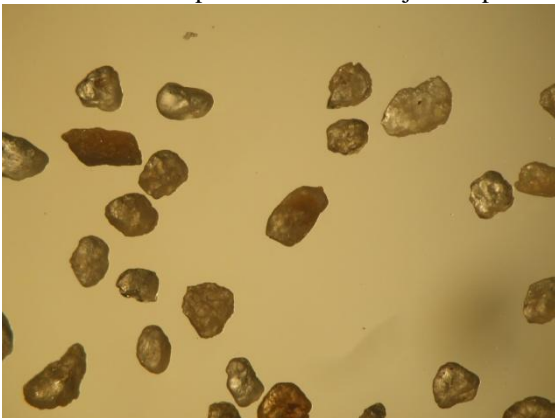
Taulukko 14. Maksimi-, keski- ja minimihalkaisijat eri leijutusnopeuksilla.

Leijutusnopeus(m/s)	Maksimihalkaisija(mm)	Keskihalkaisija(mm)	Minimihalkaisija(mm)
1	0,210	0,188	0,146
2	0,283	0,255	0,204
3	0,696	0,629	0,499
4	0,900	0,813	0,652
5	0,992	0,896	0,721
Arina+puhdistus	0,415	0,376	0,304

Hiekan pallomaisuus vaihtelee välillä 0,52-0,56. Kaikkein pienin pallomaisuus on hiekalla, joka on lähtenyt nopeudella 1 m/s. Hiekan pallomaisuus välillä 2 m/s – 5 m/s on lähes vakio. Hiekan pallomaisuus on esitetty kuvassa 33. Kuvassa 34 on esitetty 5 m/s:n leijutusnopeudella saatua hiekkaa.



Kuva 33. Hiekan pallomaisuus eri leijutusnopeuksilla.



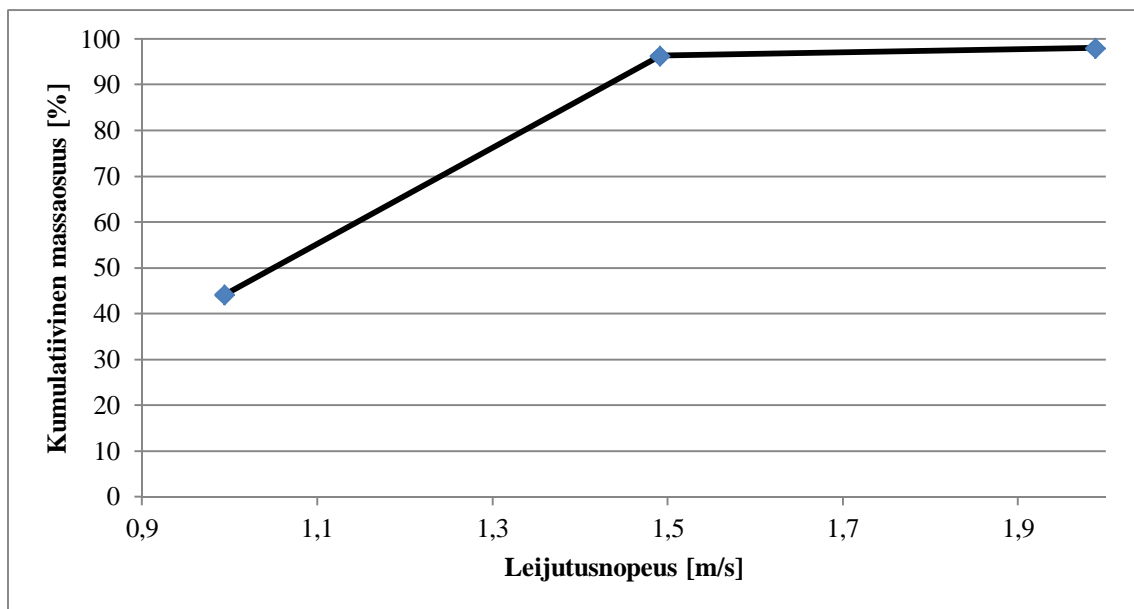
Kuva 34. Leijutettuja hiekkapartikkeleja(leijutusnopeus 5 m/s).

4.3.3 Lasikuulat

Lasikuulia leijutettiin nopeuksilla 0,21–1,99 m/s. Nopeudella 0,21 m/s saatiin näyteastiaan vain lasimurskaa. Nopeuksilla 0,99–1,99 m/s saatiin lasikuulat leijumaan. On huomattava, että kuviin saatujen, toisistaan erillisten lasikuulien määrä on ollut erittäin pieni näillä nopeuksilla. Tämä johtui erittäin voimakkaista sähköstaattisista voimista. Lasikuulat muodostivat ketjuja. Koska tarkasteltavia kuulia on vähän, se vaikuttaa tuloksen luotettavuutta heikentävästi. Melkein kaikki lasi lähti nopeuksilla 0,99 m/s ja 1,49 m/s. Taulukossa 15 on eri leijutusnopeuksilla saatu massa ja niistä laskettu kumulatiivinen massa sekä kuvassa 35 taulukon 15 tuloksista piirretty käyrä.

Taulukko 15. Lasikuulien massa eri leijutusnopeuksilla.

Leijutusnopeus(m/s)	Massa(g)	Kumulatiivinen massaosuus(%)
0,21	4,96	0,45
0,99	483,11	44,17
1,49	576	96,31
1,99	18,75	98,01
10,52(puhdistus)	10,63	98,97



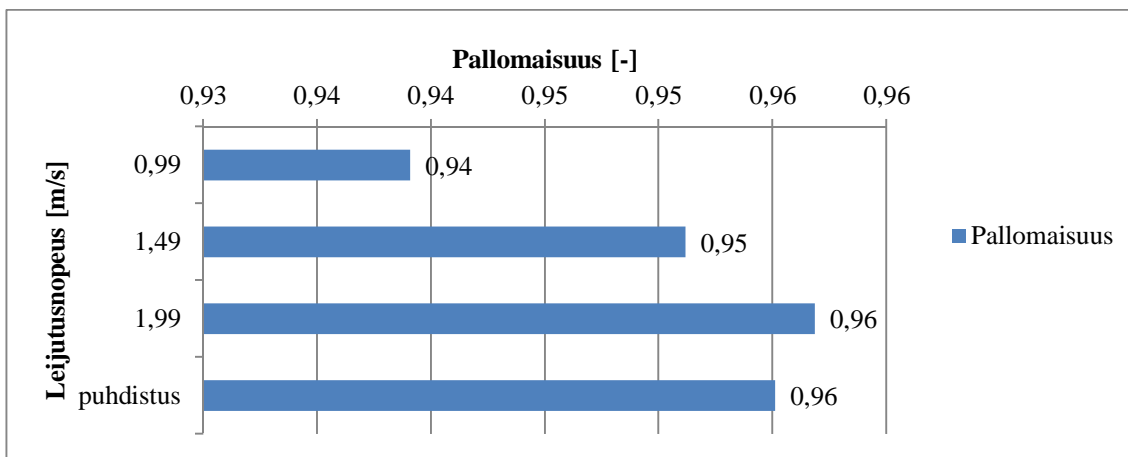
Kuva 35. Kumulatiivinen massaosuus eri leijutusnopeuksilla.

Taulukossa 16 on esitetty lasikuulien maksimi-, keski- ja minimihalkaisijat. Erot ovat hyvin pieniä, koska kuulat ovat muodoltaan lähellä täydellistä palloa. Kohta 0,21 m/s on tyhjä, koska tällä nopeudella saatiin vain lasimurskaa.

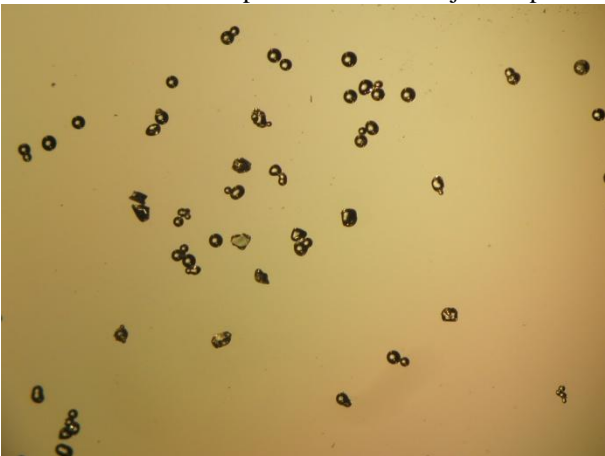
Taulukko 16. Maksimi-, keski- ja minimihalkaisijat eri leijutusnopeuksilla.

Leijutusnopeus(m/s)	Maksimihalkaisija(mm)	Keskihalkaisija(mm)	Minimihalkaisija(mm)
0,21	-	-	-
0,99	0,222	0,217	0,210
1,49	0,248	0,244	0,236
1,99	0,259	0,252	0,244
10,52(puhdistus)	0,236	0,231	0,224

Kuvassa 36 on esitetty lasikuulien pallomaisuus eri leijutusnopeuksilla. Ero on hyvin pieni, noin 0,02. Kuvassa 37 on esitetty leijutusnopeudella 1,99 m/s saatuja lasikuulia.



Kuva 36. Lasikuulien pallomaisuus eri leijutusnopeuksilla.



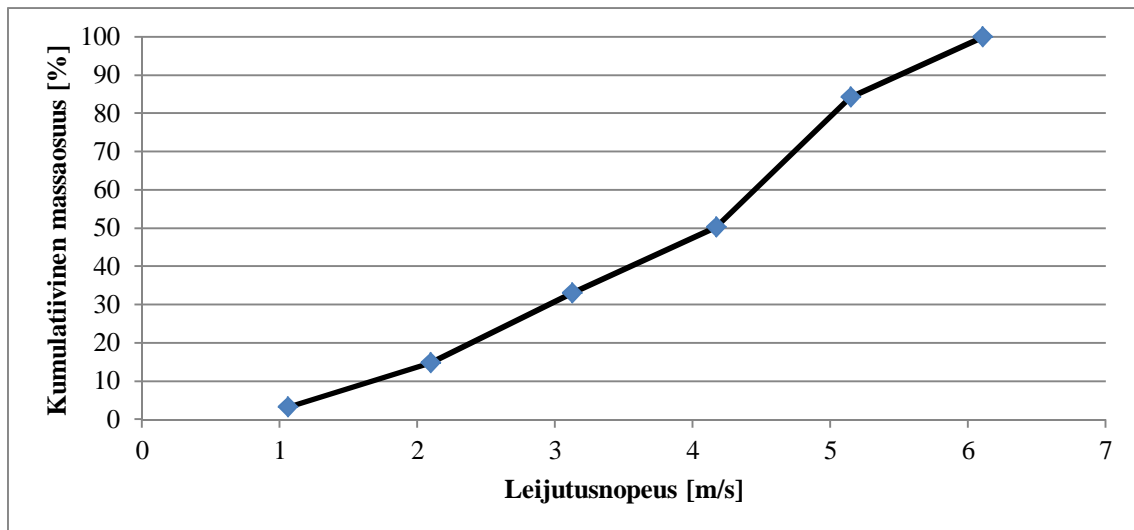
Kuva 37. Leijutettuja lasikuulia(leijutusnopeus 1,99 m/s).

4.3.4 Hake

Haketta leijutettiin nopeuksilla 1,1–6,1 m/s. Ennen leijutusta otettiin kaikkein suurimmat hakepartikkelit pois näytteestä, jotta leijutus kapeassa lasiputkessa olisi mahdollista. Näiden partikkelien massa on taulukossa kohdassa rejekti. Suurilla hakepartikkeleilla oli taipumus muodostaa lasiputkeen tulppa, joka esti pienempiä hakepartikkeleita poistumasta putkesta. Käyrä on varsin tasaisesti nouseva, kunnes nopeudella 5,1 m/s lähtee runsaammin haketta. Taulukossa 17 on eri leijutusnopeuksilla saatu massa ja niistä laskettu kumulatiivinen massaosuus ja kuvassa 38.

Taulukko 17. Hakkeen massa ja kumulatiivinen massaosuus eri leijutusnopeuksilla.

Leijutusnopeus(m/s)	Massa(g)	Kumulatiivinen massaosuus(%)
1,1	3,58	3,23
2,1	12,89	14,86
3,1	20,20	33,08
4,2	19,06	50,28
5,1	37,70	84,29
6,1	17,42	100
yhteensä	110,85	-
rejekti	59,37	ei leijutettu



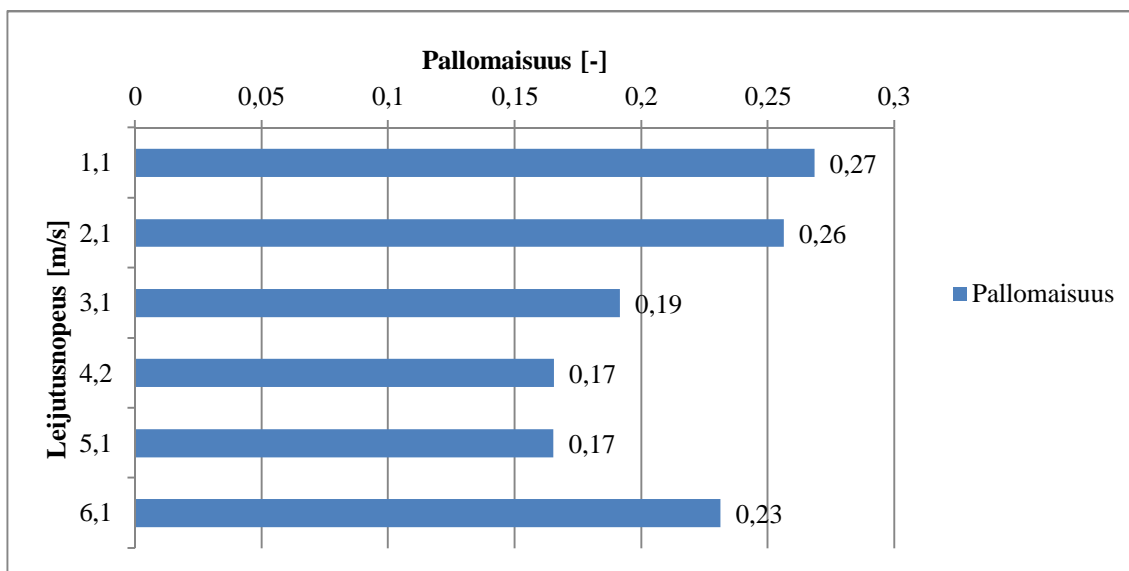
Kuva 38. Kumulatiivinen massaosuus eri leijutusnopeuksilla.

Taulukossa 18 on esitetty hakepartikkelien maksimi-, keski- ja minimihalkaisijat eri leijutusnopeuksilla. Halkaisija kolminkertaistuu nopeuden 2,1 m/s jälkeen. Halkaisijat kasvavat kohti suurempaa leijutusnopeutta. 6,1 m/s:n nopeudella lähteneen hakkeen määrä oli niin pieni, että näytteen koko muuttaa tulosta. Taulukosta nähdään, että nopeudella 6,1 m/s lähtenyt hake on hieman pienempää kuin nopeudella 5,1 m/s lähtenyt.

Taulukko 18. Maksimi-, keski- ja minimihalkaisijat eri leijutusnopeuksilla.

Leijutusnopeus(m/s)	Maksimihalkaisija(mm)	Keskihalkaisija(mm)	Minimihalkaisija(mm)
1,1	2,512	2,203	1,282
2,1	8,230	7,183	4,583
3,1	26,911	24,083	13,513
4,2	35,199	31,619	16,263
5,1	48,447	43,305	20,362
6,1	47,687	43,298	20,451

Hakepartikkelien pallomaisuus pienenee kohti suurempaa leijutusnopeutta. Tulos on päinvastainen turpeeseen verrattuna. Vaihteluväli on 0,17–0,27. Kuvasta nähdään, että myös pallomaisuus laskee nopeuden 2 m/s jälkeen huomattavasti. Suurin pallomaisuus on nopeudella 6,1 m/s lähteneellä hakkeella. Tässä näytteessä oli niin vähän partikkeleita, että määrän vähäisyys vääristää tulosta. Kuvassa 39 on hakepartikkelien pallomaisuus eri leijutusnopeuksilla. Kuvassa 40 on 6,1 m/s:n leijutusnopeudella saatuja hakepartikkeleita.



Kuva 39. Hakepartikkelien pallomaisuus eri leijutusnopeuksilla.



Kuva 40. Leijutettuja hakepartikkeleita(leijutusnopeus 6,1 m/s).

4.3.5 Muita leijutuksessa vaikuttaneita tekijöitä

- Tiheydelle on oletettu vakioarvo eri materiaaleille, mutta todellisuudessa vaihtelua esiintyy. Etenkin hakkeen joukossa oli runkopuuta ja kuorta, joiden tiheydet poikkeavat toisistaan. Kuten aikaisemmin on todettu, alhaisempi tiheys pienentää tarvittavaa leijutusnopeutta.
- Partikkelien pinnankarheuden, kovuuden ja ilman kosteuden ei uskota vaikuttaneen merkittävästi leijutuksessa. Hauraita turvepartikkeleja on voinut murskaantua leijutuksessa.

4.4 Terminaalinopeus

4.4.1 Laskenta

Tässä työssä laskettiin partikkelien terminaalinopeudet kirjallisuudesta löytyvillä korrelaatioilla. Tuloksista laadittiin käyriä, joissa x-akselilla oli terminaalinopeus ja y-akselilla kumulatiivinen massaosuus. Käyriä verrattiin mitattuihin leijutuskäyriin. Ensin partikkelit oletettiin täydellisiksi palloiksi. Seuraavaksi käyriä korjattiin pallomaisuudella, jotta ne saataisiin lähemmäksi mitattuja käyriä.

Laskenta eteni seuraavasti:

1. Ensiksi annettiin alkuarvaus vastuskertoimelle C_D
2. Seuraavaksi laskettiin terminaalinopeus, joka saadaan voimatasapainosta

paino-noste = vastusvoima

$$F_g - F_L = F_D$$

$$m\vec{g} - \rho_g V\vec{g} = C_D \frac{1}{2} \rho_s w_t^2 A_p$$

missä

m = partikkelin massa [kg]

\vec{g} = gravitaatiovakio [m/s²]

ρ_s = partikkelin tiheys [kg/m³]

ρ_g = kaasun tiheys [kg/m³]

V = partikkelin tilavuus [m³]

C_D = vastuskerroin [-]

w_t = terminaalinopeus [m/s]

A_p = partikkelin projektiopinta-ala [m²]

Yhtälöstä 6 voidaan ratkaista terminaalinopeus w_t

$$w_t = \sqrt{\frac{\frac{4}{3}Dg(\rho_s - \rho_g)}{C_D\rho_g}} \quad (6)$$

3. Terminaalinopeuden avulla lasketaan Reynoldsin luku yhtälöstä 7

$$\text{Re} = \frac{\rho_g w_t D}{\mu_g} \quad (7)$$

Missä

Re = Reynoldsin luku [-]

D = halkaisija [m]

μ_g = kaasun viskositeetti [Pa•s]

4. Reynoldsin luvun avulla saadaan uusi vastuskerroin, jolla lasketaan uusi terminaalinopeus. Iterointia jatketaan kunnes terminaalinopeuksien erotus on 0. Taulukoissa 19 ja 20 on esitetty vastuskertoimen laskennassa käytetyt korrelaatiot ja niiden pätevyysalueet.

Taulukko 19. Terminaalinopeuden laskennassa käytettyjä korrelaatioita.

Korrelaatio		Pätevyysalue
Haider & Levenspiel (Chabra et al. 1998, s. 289)	$C_D = \frac{24}{Re} (1 + e_1 Re^{e_2}) + \frac{e_3}{1 + \frac{e_4}{Re}} \quad (8)$ <p>Missä kertoimet</p> $e_1 = e^{(2,3288 - 6,4581\psi + 2,4486\psi^2)} \quad (9)$ $e_2 = 0,0964 + 0,5565\psi \quad (10)$ $e_3 = e^{(4,905 - 13,8944\psi + 18,4222\psi^2 - 10,2599\psi^3)} \quad (11)$ $e_4 = e^{(1,4681 + 12,2584\psi - 20,7322\psi^2 + 15,8855\psi^3)} \quad (12)$	Re < 260000
Ganser (Chabra et al. 1998, s. 290)	$\frac{C_D}{K_2} = \frac{24}{ReK_1K_2} \{1 + 0,1118(ReK_1K_2)^{0,6567}\} + \frac{0,4305}{1 + \frac{3305}{ReK_1K_2}} \quad (13)$ <p>Missä kertoimet K_1 ja K_2</p> <p>Säännöllisille muodoille</p> $K_1 = [(1/3) + (2/3)\psi^{-0,5}]^{-1} \quad (14)$ $K_2 = 10^{1,8148(-\log\psi)^{0,5743}} \quad (15)$ <p>Epäsäännöllisille muodoille</p> $K_1 = [(d_n/3d) + (2/3)\psi^{-0,5}]^{-1} \quad (16)$ $K_2 = 10^{1,8148(-\log\psi)^{0,5743}} \quad (17)$ <p style="text-align: center;">$d_n = \text{ECD [m]}$</p> <p style="text-align: center;">$d = \text{tilavuusekvivalenttihalkaisija [m]}$</p>	Re < 250000
Swamee & Ojha (Chabra et al. 1998, s. 290 -291)	$C_D = \left[\frac{48,5}{(1 + 4,5\beta^{0,35})^{0,8} Re^{0,64}} + \left\{ \left(\frac{Re}{Re + 100 + 100\beta} \right)^{0,32} \frac{1}{\beta^{18 + 1,05\beta^{0,8}}} \right\} \right] \quad (18)$ <p>Missä</p> $\beta = \frac{c}{(ab)^{1/2}} \quad (19)$ <p style="text-align: center;">$\beta = \text{Coreyn muotokerroin (tilavuuksinen muotokerroin) [-]}$</p> <p style="text-align: center;">$a, b, c = \text{partikkelin kolmen pääakselin pituudet [m]}$</p>	Re < 10000 ja $0,3 < \beta < 1$
Schiller-Naumann (Hyppänen & Raiko 2002, s.497)	$C_D = \left(\frac{24}{Re} \right) \cdot (1 + 0,15Re^{0,687}) \quad (20)$	$2 < Re < 800$

Taulukko 20. Terminaalinopeuden laskennassa käytettyjä korrelaatioita.

Chien (Chabra et al. 1998, s. 291)	$C_D = \left(\frac{30}{Re}\right) + 67,289e^{(-5,03\psi)}$ (20)	Re < 5000 ja 0,2 < ψ < 1
Turton & Levenspiel (Yang 2003, s. 16)	$C_D = \left(\frac{24}{Re}\right) [1 + 0,173Re^{0,657}] + \frac{0,413}{1 + 16,3Re^{-1,09}}$ (21)	Re < 200000
Yow, Pitt & Salman (Yow et al. 2004, s. 368–371)	$C_D = \frac{a_1}{Re} + \frac{b_1}{\sqrt{Re}} + c_1$ (22) Missä kertoimet a_1 , b_1 ja c_1 $a_1 = 15,21 + \frac{10,82}{\psi} - \frac{0,14}{\psi^2}$ (23) $b_1 = 13,41 - \frac{10,64}{\psi} - \frac{0,06}{\psi^2}$ (24) $c_1 = -8,82 + \frac{5,70}{\psi} + \frac{0,23}{\psi^2}$ (25) Kertoimia on liitteessä 1.	Re < 100000 ja 0,006 < ψ < 1.

Muuta laskennassa tarvittavaa:

Ilman tiheys saadaan ideaalikaasun tilanyhtälöstä

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (26)$$

missä

$$p = \text{ilman paine [Pa]}$$

$$T = \text{ilman lämpötila [K]}$$

$$R = \text{kuivan ilman kaasuvakio, 287 J/kgK}$$

Ilman viskositeetti saadaan yhtälöstä 27 (Sutherlandin yhtälö) (Canuto et al. 2009, s. 9):

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T_0 + C}{T + C}\right) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (27)$$

Missä

μ_0 = viskositeetti referenssitilassa [Pa•s]

T_0 = referenssilämpötila(273,1) [K]

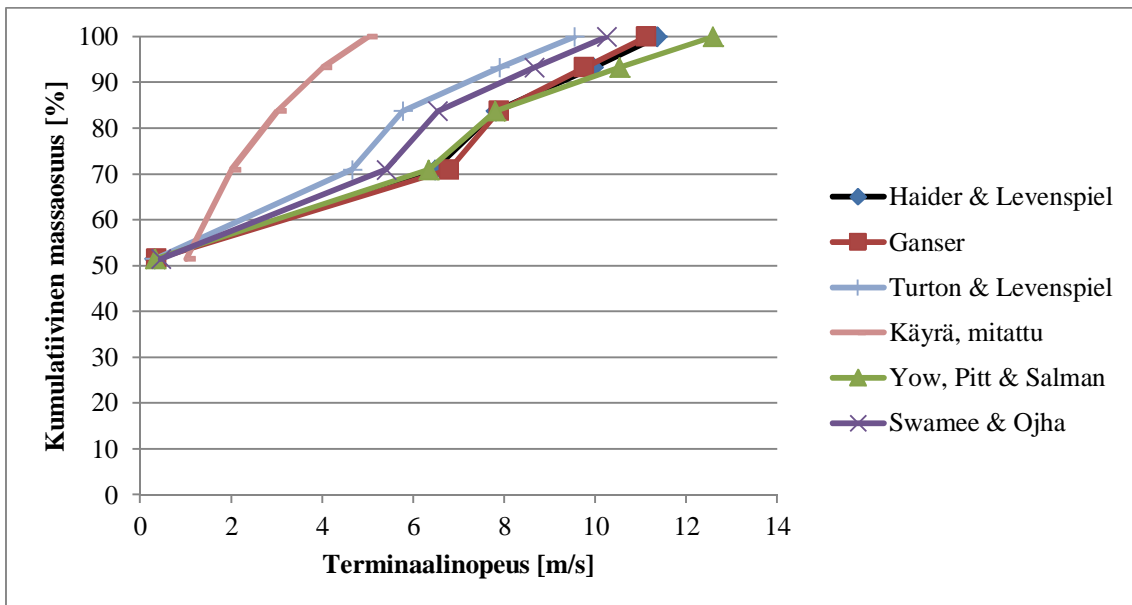
C = kaasukohtainen vakio(ilmalle 110,4)[K]

Tarvitaan myös tiheydet eri aineille: Lasi = 2600 kg/m³, hiekka = 2500 kg/m³, hake = 500 kg/m³ ja turve = 400 kg/m³.

Ilman paineet ja lämpötila saadaan leijutuslaitteiston painemittareista ja lämpömittarista. Paineena käytetään painemittari 1:n painetta. Partikkelien projektiopinta-alana käytetään pinta-alaa, minkä analySIS on laskenut. Partikkelin tilavuus lasketaan keskihalkaisijan perusteella olettamalla partikkeli palloksi.

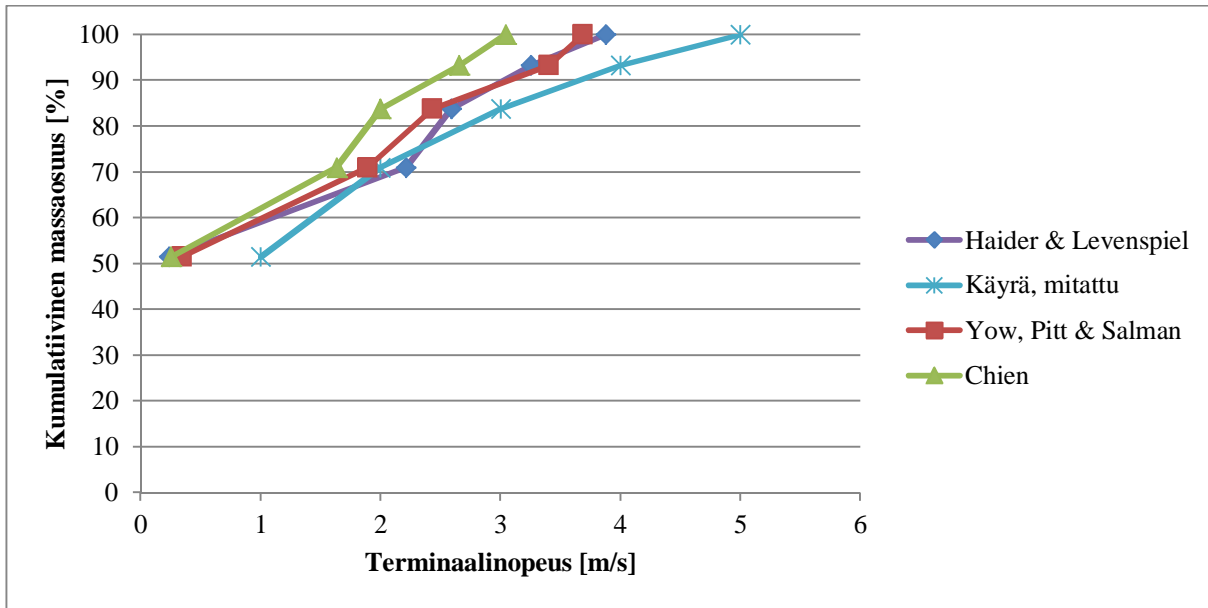
4.4.2 Tulokset

Kuvassa 41 on esitetty eri korrelaatioilla laskettu terminaalinopeus, kun turvepartikkelit on oletettu täydellisiksi palloiksi. Korrelaatiot Schiller-Naumann ja Chien eivät päde, koska niiden Reynoldsin luvun alueet ylittyvät. Lähimmäksi mitattua käyrää pääsee Turton & Levenspiel. Pienimmilläänkin laskettu nopeus on noin kaksinkertainen todelliseen verrattuna. Swamee & Ojha, jota on arvosteltu kirjallisuudessa huonoksi korrelaatioksi, antaa toiseksi parhaimman tuloksen. Huonoimman tuloksen näyttää antavan korrelaatio Yow, Pitt & Salman.



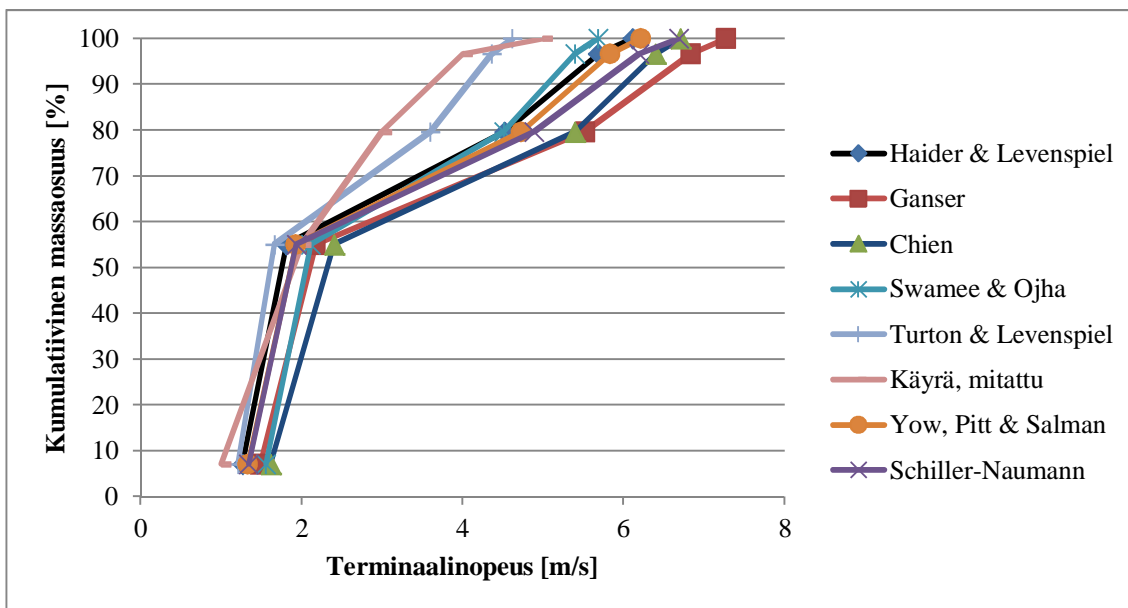
Kuva 41. Turvepartikkelien terminaalinopeus, kun pallomaisuus = 1.

Kuvassa 42 on esitetty terminaalinopeudet, kun pallomaisuus on otettu huomioon. Moni korrelaatio täytyy jättää tässä vaiheessa pois, koska partikkelien tilavuudesta ei ole tietoa. Chien on kauimpana (terminaalinopeus noin 3 m/s, kun todellinen on ollut 5 m/s). Lähimmäksi pääsee Haider & Levenspiel, joka antaa terminaalinopeudeksi noin 4 m/s, kun leijutusnopeus on ollut 5 m/s. Kaikki korrelaatiot alkavat samasta pisteestä.



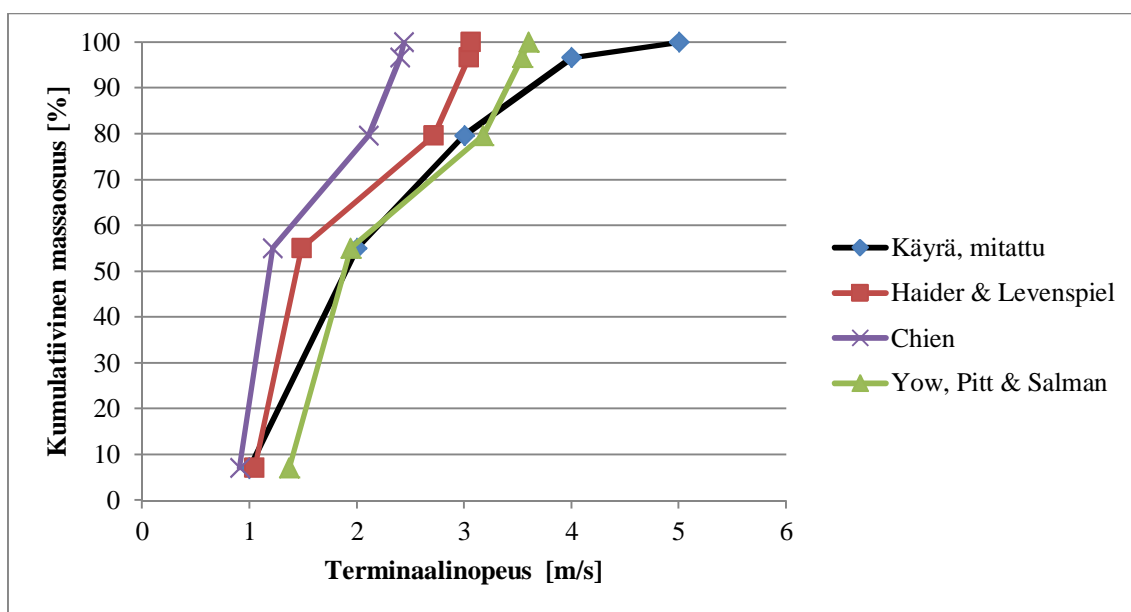
Kuva 42. Turvepartikkelien terminaalinopeus, kun käytetään mitattua pallomaisuutta.

Kuvassa 43 on esitetty lasketut terminaalinopeudet, kun hiekkapartikkelit oletetaan täydellisiksi palloiksi. Tässäkin tapauksessa Turton & Levenspiel pääsee lähimmäksi mitattua käyrää, ja Ganserin sekä Chienin korrelaatiot näyttäisivät poikkeavan eniten. Suurin terminaalinopeus on noin 7,3 m/s.



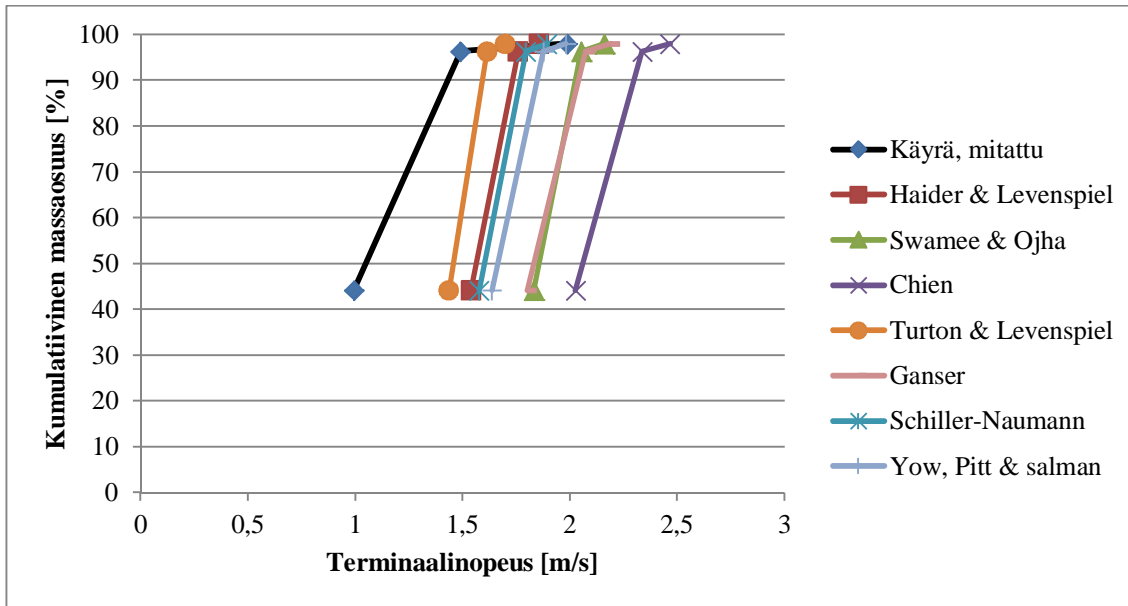
Kuva 43. Hiekkapartikkelien terminaalinopeus, kun pallomaisuus = 1.

Kuvassa 44 on esitetty lasketut terminaalinopeudet, kun pallomaisuus on otettu huomioon. Parhaan tuloksen näyttää antavan korrelaatio Yow, Pitt & Salman. Välillä 2 m/s – 3 m/s asettuu tämä korrelaatio lähes päällekkäin mitatun käyrän kanssa. Chien on tässäkin tapauksessa huonoin. Kaikki korrelaatiot asettavat nopeuksia 4 m/s ja 5 m/s vastaavat nopeudet hyvin lähekkäin toisiaan. Korrelaatioiden lähtöpisteet ovat hyvin lähellä toisiaan. Nopeuden 4 m/s jälkeen korrelaatiot siirtyvät kaikki samaan suuntaan pois päin mitatusta käyrästä. Yow, Pitt & Salman antaa noin 3,6 m/s, kun leijutusnopeus on ollut 5 m/s.



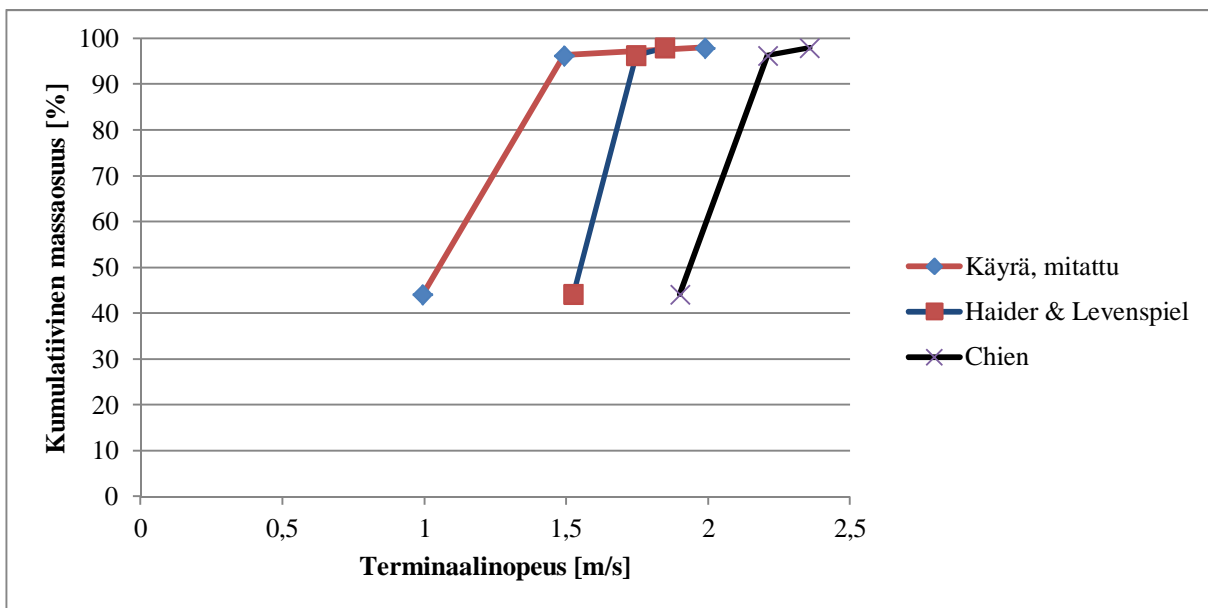
Kuva 44. Hiekkapartikkelien terminaalinopeus, kun käytetään mitattua pallomaisuutta.

Kuvassa 45 on esitetty terminaalinopeudet, kun lasikuulat on oletettu täydellisiksi palloiksi. Turton & Levenspiel antaa parhaan tuloksen, ja Chien huonoimman, noin 2 m/s, kun leijutusnopeus on ollut noin 1 m/s. Turton & Levenspielin jälkeen Haider & Levenspiel sekä Schiller-Naumann ovat lähimpänä mitattua käyrää.



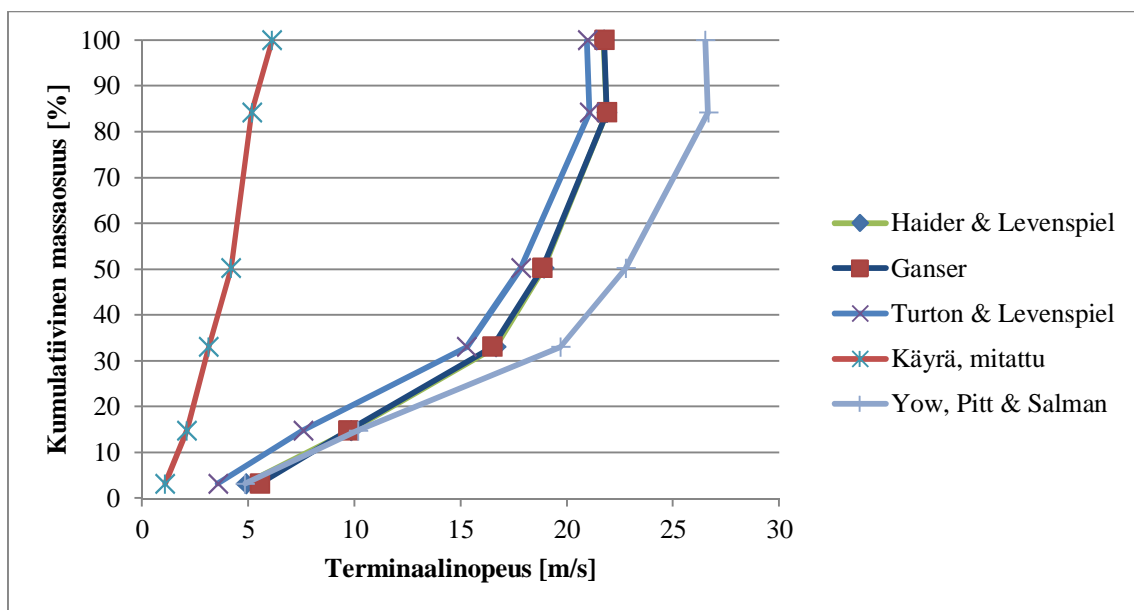
Kuva 45. Lasikuulien terminaalinopeus, kun pallomaisuus = 1.

Kuvassa 46 on esitetty lasketut terminaalinopeudet, kun pallomaisuus on huomioitu. Haider & Levenspiel antaa paremman tuloksen kuin Chien. Haider & Levenspiel menee osin päällekkäin mitatun käyrän kanssa. Virhe suurimmillaan, kun leijutusnopeus on ollut noin 1 m/s, jolloin Haider & Levenspiel antaa noin 1,5 m/s.



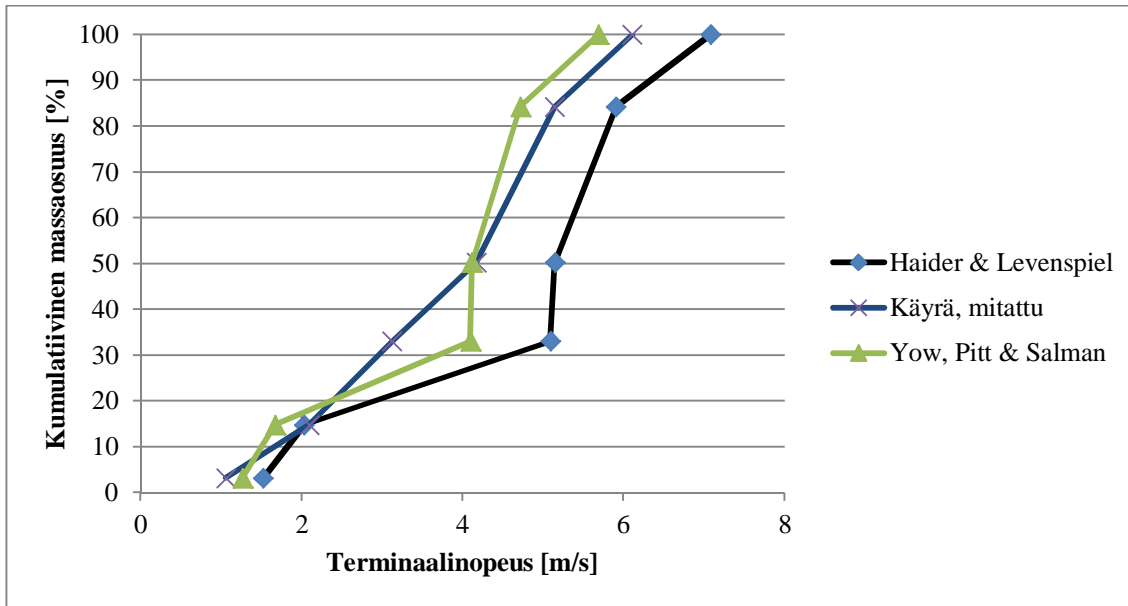
Kuva 46. Lasikuulien terminaalinopeus, kun käytetään mitattua pallomaisuutta.

Kuvassa 47 on esitetty hakepartikkelien lasketut terminaalinopeudet, kun pallomaisuus = 1. Turton & Levenspiel antaa parhaimman tuloksen, Yow, Pitt & Salman huonoimman. Viimeisen pisteen pienempi terminaalinopeus johtuu siitä, että partikkeleiden painotettu keskihalkaisija on kohdassa 5,1 m/s hieman suurempi kuin kohdassa 6,1 m/s. Pienimmilläänkin laskettu terminaalinopeus on noin neljä kertaa suurempi kuin todellinen. Korrelaatiot Chien, Swamee & Ojha ja Schiller-Naumann täytyy hylätä, koska niiden pätevyysalueet ylittyvät.



Kuva 47. Hakepartikkelien terminaalinopeus, kun pallomaisuus = 1.

Kuvassa 48 on esitetty hakepartikkelien terminaalinopeudet, kun pallomaisuus on huomioitu. Yow, Pitt & Salman antaa parhaimman tuloksen. Chien täytyy hylätä, koska koska korrelaation pätevyysalue ylittyy. Korrelaatioiden lähtöpisteet ovat melkein samat kuin todellisella käyrällä. Haider & Levenspiel antaa todellista leijutusnopeutta suuremman nopeuden toisin kuin turpeen tai hiekan tapauksessa. Kaikilla korrelaatioilla tapahtuu huomattava siirtyminen oikealle eli todellista leijutusnopeutta suuremmaksi kohdassa 3,1 m/s. Tämä johtuu suuresta noususta keskihalkaisijassa. Tämän siirtymän jälkeen Yow, Pitt & Salman siirtyy takaisin mitatun käyrän viereen, mutta Haider & Levenspiel ei.



Kuva 48. Hakepartikkelien terminaalinopeus, kun käytetään mitattua pallomaisuutta.

4.4.3 Terminaalinopeuden laskennan virhelähteitä

- Kuten aikaisemmin todettiin, tiheys ei ole vakio esimerkiksi hakkeella.
- Sekundääriliikettä esiintyy sitä enemmän, mitä enemmän partikkelin sivusuhte eroaa 1:stä. Etenkin hakkeessa oli partikkeleita, joilla oli suuri sivusuhte. Lasikuulien sekundääriliike on luultavasti ollut merkityksetöntä, koska ne olivat lähellä täydellistä palloa.
- Turbulenssin vaikutusta terminaalinopeuteen ei vielä täysin tunneta, joten tätä ilmiötä ei käsitellä enempää tässä työssä.
- Partikkelien kolmannen ulottuvuuden suuruutta ei tunneta.

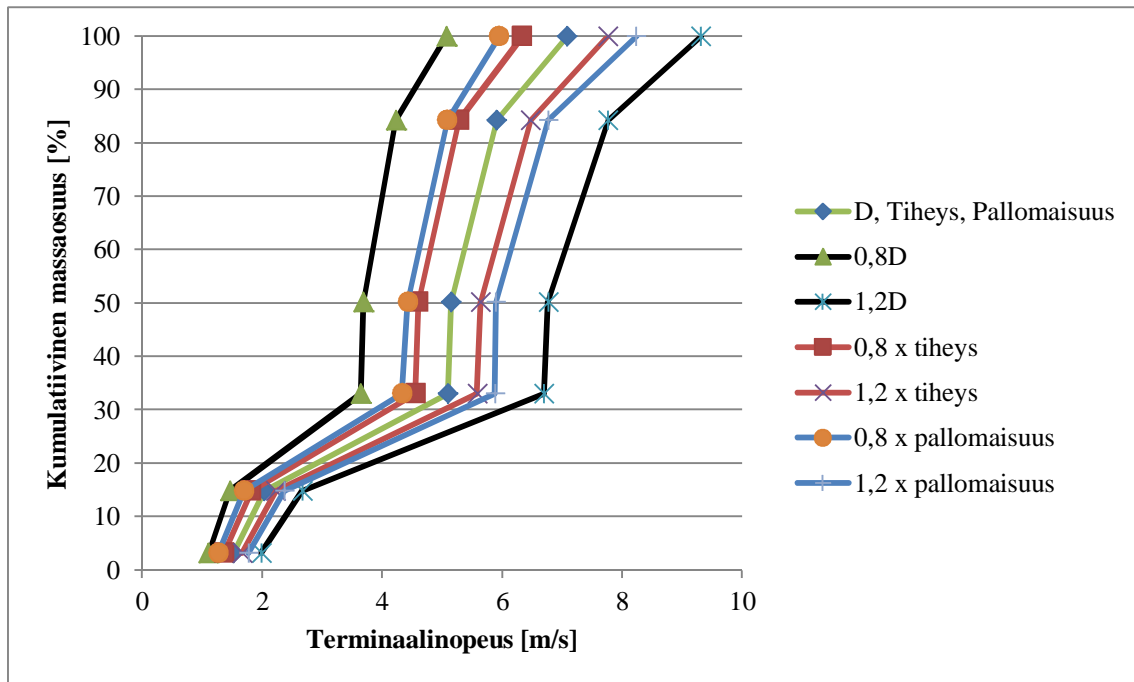
4.5 Herkkyystarkastelu

Valitaan korrelaatio Haider & Levenspiel herkkyystarkastelua varten. Tällä korrelaatiolla on suurin pätevyysalue. Valitun korrelaation muutosherkkyttä selvitetään seuraavilla muuttujilla: tiheys, halkaisija ja pallomaisuus. Taulukossa 21 on esitetty herkkyystarkastelun lähtöarvot. Herkkyystarkastelun lähtöarvot ovat leijutetusta hakkeesta.

Taulukko 21. Herkkyystarkastelun lähtöarvot.

Leijutusnopeus(m/s)	Keskihalkaisija(mm)	Pallomaisuus(-)	Tiheys(kg/m ³)
1,1	2,203	0,269	400
2,1	7,183	0,256	400
3,1	24,083	0,192	400
4,2	31,619	0,165	400
5,1	43,305	0,165	400
6,1	43,298	0,231	400

Kuvassa 49 on esitetty, miten terminaalinopeus muuttuu, kun halkaisijaa muutetaan välillä 0,8D-1,2D. Suurin terminaalinopeus vaihtelee välillä 5-9,3 m/s. Lähtöpisteessä vaihteluväli on 1-2 m/s.



Kuva 49. Terminaalinopeuden muuttuminen, kun halkaisijaa muutetaan.

Seuraavaksi muutettiin tiheyttä. Suurin terminaalinopeus vaihtelee välillä 6,3 – 7,8 m/s. Kaikilla tiheyksillä on melkein sama lähtöpiste. Lopuksi muutettiin pallomaisuutta välillä 0,8-12. Suurin terminaalinopeus vaihtelee välillä 5,9-8,2 m/s. Lähtöpiste vaihtelee välillä 1-2 m/s. Voidaan todeta, että halkaisijan muuttaminen vaikuttaa eniten ja tiheyden muuttaminen vähiten.

4.6 Karakterisointimenetelmä

Leijutetuille aineille on laskettu niin sanottu ominaisvoima. Tämä saadaan yhtälöstä 28

$$f_D = \frac{\bar{g}m_{\text{kum}}}{m_{\text{tot}}} \quad (28)$$

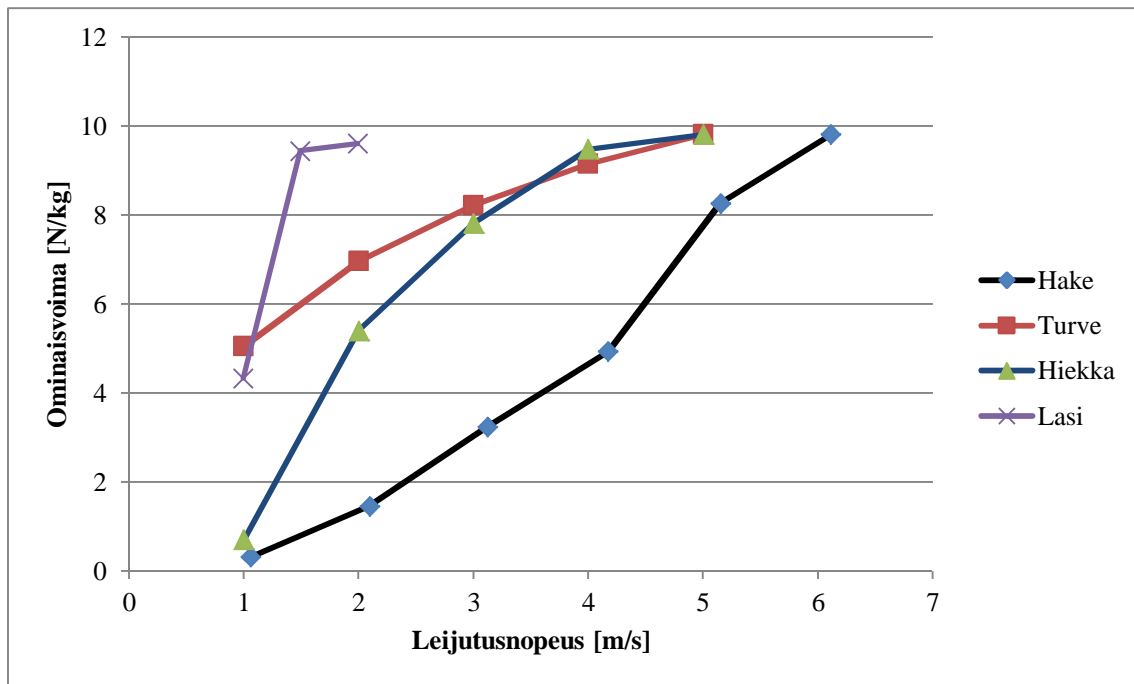
Missä

$$f_D = \text{ominaisvastus [N/kg]}$$

$$m_{\text{kum}} = \text{kumulatiivinen massa [kg]}$$

$$m_{\text{tot}} = \text{kokonaismassa [kg]}$$

Kuvassa 50 on esitetty eri aineisiin vaikuttava ominaisvoima.



Kuva 50. Eri aineisiin vaikuttava ominaisvoima leijutuksessa.

Valitaan korrelaatio Haider & Levenspiel karakterisointiin. Seuraavaksi lasketaan ominaisvoima. Ominaisvoima voidaan laskea myös yhtälöstä 29.

$$f_D = \frac{C_D \frac{1}{2} \rho_g A w^2}{\rho_s V} \quad (29)$$

f_D = ominaisvoima [m²/s]

w = leijutusnopeus [m/s]

Korjauskerroin a , joka on teoreettisen nopeuden ja todellisen nopeuden suhde, joka saadaan yhtälöstä 30.

$$a = \frac{\vec{g}}{f_D} \quad (30)$$

missä

a = korjauskerroin [-]

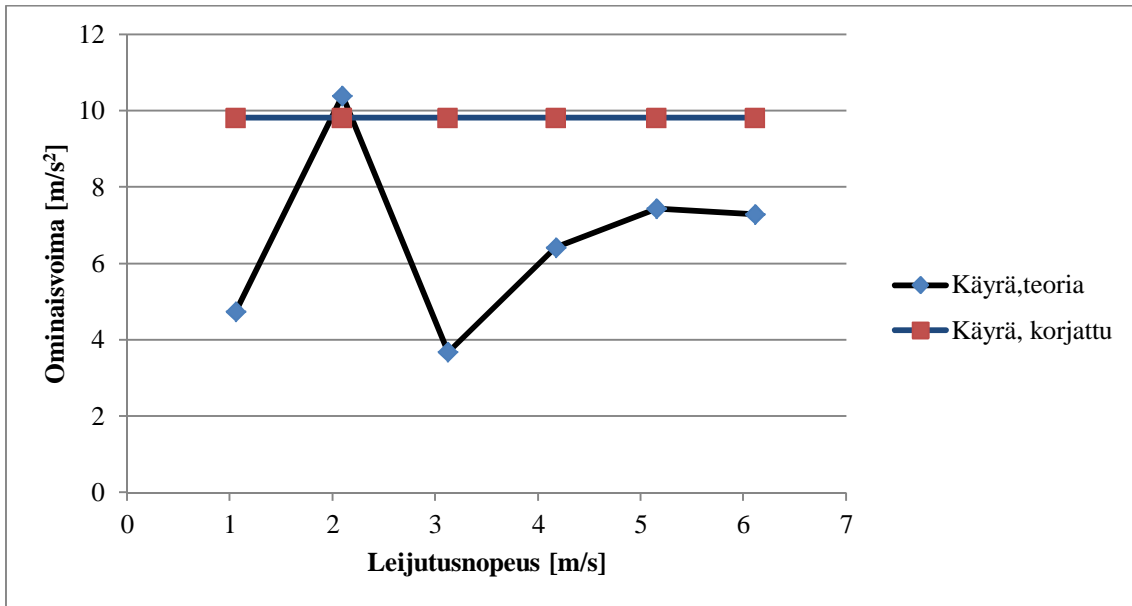
Laskettiin myös korjauskertoimella korjatut ominaisvoimakäyrät yhtälöllä 31.

$$f_D^* = a f_D \quad (31)$$

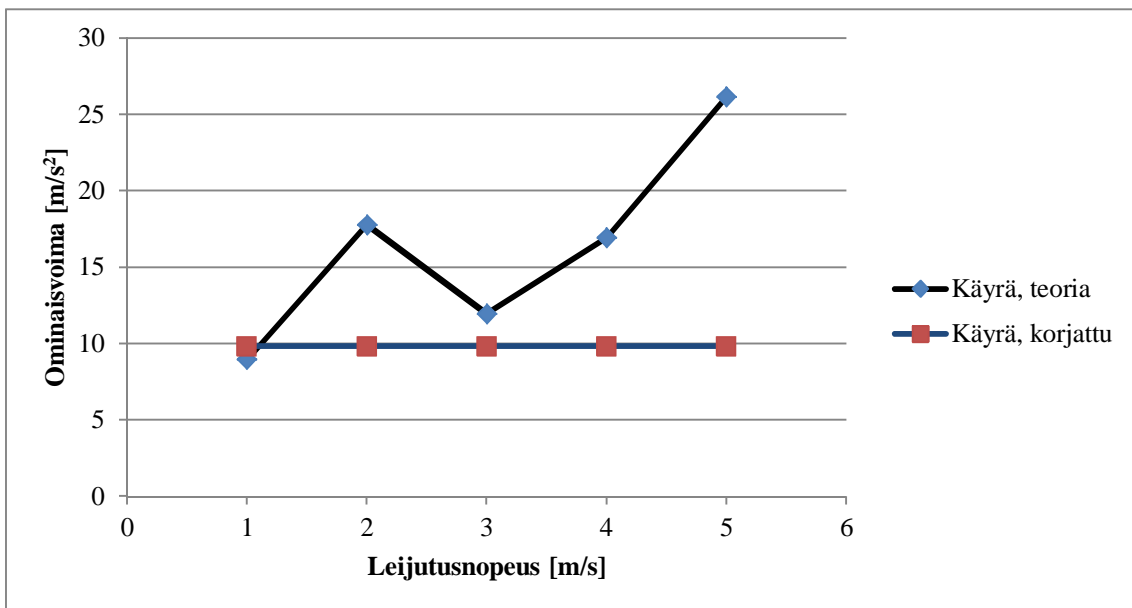
Missä

f_D^* = korjattu ominaisvoima [m²/s]

Kuvassa 51 on esitetty hakepartikkeleihin vaikuttava ominaisvoima eri leijutusnopeuksilla ja kuvassa 52 on esitetty hiekkapartikkeleihin vaikuttava ominaisvoima eri leijutusnopeuksilla. Samoin kuvissa on esitetty korjauskertoimella korjatut käyrät. Hakkeessa ei näytä olevan mitään selvää riippuvuussuhdetta eikä hiekassa. Hiekassa ominaisvoimalla on kuitenkin kasvava trendi

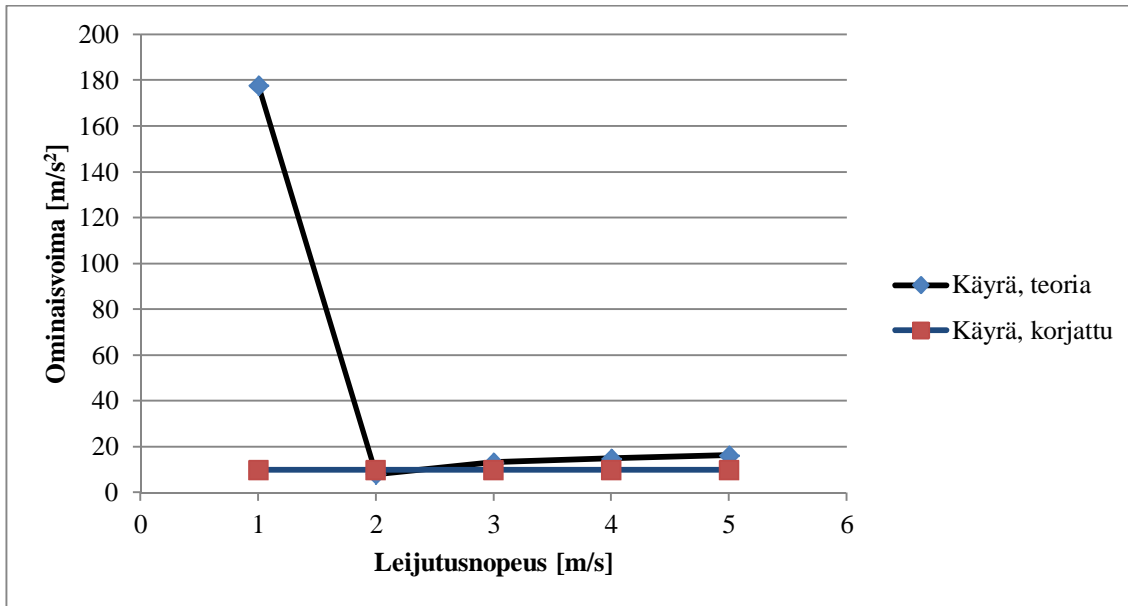


Kuva 51. Hakepartikkeleihin vaikuttava ominaisvoima leijutuksessa.

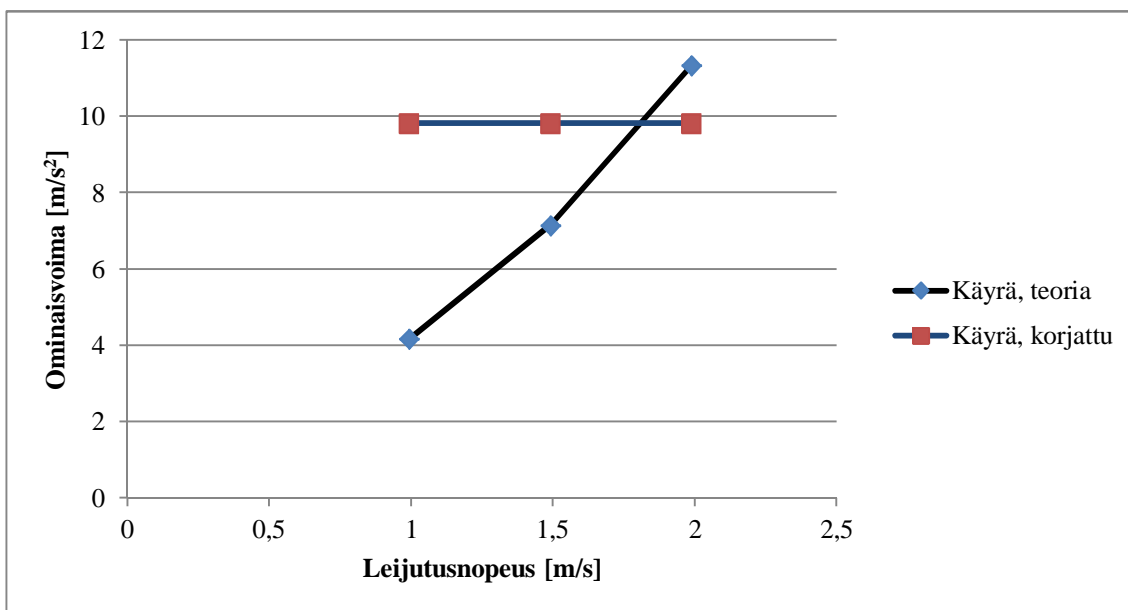


Kuva 52. Hiekkapartikkeleihin vaikuttava ominaisvoima leijutuksessa.

Kuvassa 53 on esitetty turvepartikkeleihin vaikuttava ominaisvoima ja korjauskertoimella korjattu käyrä ja kuvassa 54 on esitetty lasikuulista vastaavat käyrät. Turpeessa näyttäisi olevan alun jyrkän lasku jälkeen lievästi nouseva käyrä. Lasikuulien ominaisvoimakäyrä on suora .

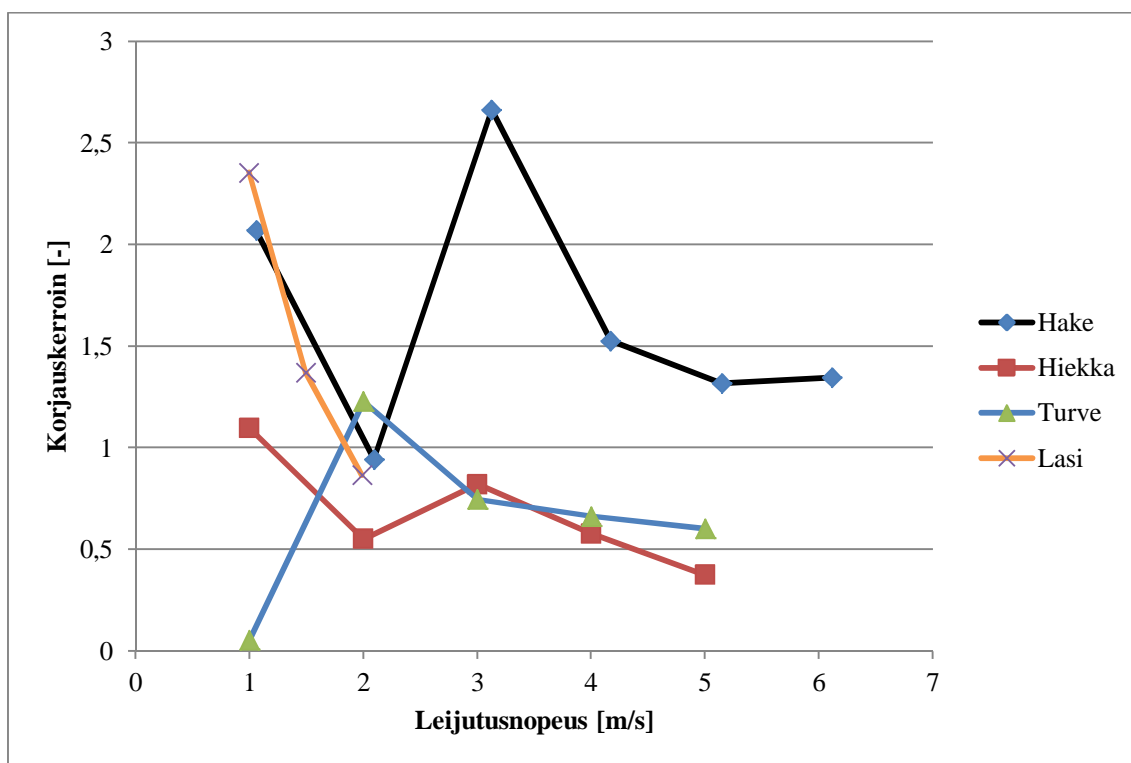


Kuva 53. Turvepartikkeleihin vaikuttava ominaisvoima leijutuksessa.



Kuva 54. Lasikuuliin vaikuttava ominaisvoima leijutuksessa.

Kuvassa 55 on esitetty korjauskerroin a leijutusnopeuden funktiona. Hakkeen ja hiekan käyrät laskevat alussa päinvastoin kuin turpeen. Hakkeella ei ole mitään selvää riippuvuusuhdetta. Hiekan käyrä alkaa laskea 3 m/s:n jälkeen ja turpeen käyrä 2 m/s:n jälkeen. Lasikuulilla on laskeva suora.



Kuva 55. Korjauskertoimet eri aineilla.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Tässä työssä analysoitiin biopolttoaineiden ominaisuuksia leijutuksen kannalta. Tämä toteutettiin seulomalla ja leijuttamalla haketta ja turvetta. Partikkelien kokoa ja muotoa kuvaavat mitat selvitettiin kuva-analyysillä. Seulonnan tuloksista havaittiin, että sähköstaattiset voimat ja partikkelien muoto ovat merkittäviä häiriötekijöitä. Leijutuksessa huomattiin myös suurten partikkelien taipumus muodostaa häiritseviä tulppia. Kirjallisuudesta saatujen korrelaatioiden avulla laskettuja terminaalinopeuksia verrattiin mitattuun leijutuskäyrään olettamalla ensin partikkelit täysin pallomaisiksi, ja seuraavassa vaiheessa ottamalla huomioon pallomaisuus. Pallomaisuuden mukaan ottaminen sai teorian ennustamat käyrät vastaamaan huomattavasti paremmin mitattuja. Eroa mitattuun jäi kuitenkin jonkin verran. Tämä johtuu muuan muassa kolmannen ulottuvuuden huomiotta jättämisestä. Partikkeleille annettiin tilavuus keskihalkaisijan perusteella, joka näkyi niiden 2D-projektiossa. Leijutusnopeus, jonka leijutustilassa laskettiin olevan, ei vastaa aivan todellisuutta, koska partikkelinäytteen mukaan tuominen muuttaa virtausolosuhteita verrattuna tilanteeseen, jossa tila olisi aivan tyhjä. Partikkeleille oletettu tiheys ei välttämättä vastaa todellisuutta. Hakkeessa etenkin oli hyvin erityyppisiä partikkeleita: puunsäleitä ja kuorta eli tiheys on vaihdellut mahdollisesti paljonkin. Jokaisella korrelaatiolla on myös omat virherajansa: Swamee & Ojha voi tuottaa jopa 100 % virheen kirjallisuuden mukaan. Korrelaatiot myös pätevät sitä huonommin, mitä vähemmän pallomaisempia partikkelit ovat. Partikkelien täydellä 3D-analyysillä saaduilla mitoilla voisi saada korrelaatiot täsmäämään paljon paremmin mitatun kanssa.

Tässä työssä laadittiin myös herkkyysanalyysi käyttäen apuna Haider & Levenspielin korrelaatiota. Kolmea parametria -tiheys, pallomaisuus ja keskihalkaisija- muutettiin, ja terminaalinopeuden muutosherkkyttä kyseisillä muuttujilla tarkasteltiin. Eniten vaikutusta havaittiin olevan halkaisijan muuttamisella, ja vähiten vaikuttaa tiheyden muuttaminen.

Lopuksi laskettiin leijutettujen materiaalien ominaisvoimat ja määritettiin korjauskerroin kullekin materiaalille. Korjauskertoimen ja leijutusnopeuden välillä ei havaittu selvää riippuvuussuhdetta.

LÄHDELUETTELO

Bi, T. Hsiaotao. 2005. Electrostatic phenomena in gas-solids fluidized beds. *China particuology*, vol 3, pp. 395-399.

Canuto, Claudio., Quarteroni, Alfio., Hussaini, M. Yousuff & Zang, Thomas A. 2007. Kappale 1, Fundamentals of fluid dynamics, teoksessa: Spectral methods: Evolution to complex geometries and applications to fluid dynamics. eISBN 978-3-540-30728-0.

Chhabra, R.P., Agarwal, L& Sinha, N.K. 1998. Drag on non-spherical particles: an evaluation of available methods. *Powder technology*, vol 101, pp. 288-295.

Decker, Stephen R., Sheehan, John., Dayton, David C., Bozell, Joseph J., Adney, William S., Hames, Bonnie., Thomas, Steven R., Bain, Richard L., Czernik, Stefan., Zhang, Min & Himmel, Michael E. 2007. Kappale 33, Biomass conversion, teoksessa: Kent and Riegel's Handbook of industrial chemistry and biotechnology. eISBN 978-0-387-27843-8.

Grace, John R., Leckner, Bo., Zhu, Jesse & Cheng, Yi. 2006. Kappale 5, Fluidized beds, teoksessa: Multiphase flow handbook. eISBN 978-1-4200-4047-0.

Guo, Qiang., Chen, Xueli & Liu, Haifeng. 2011. Experimental research on shape and size distribution of biomass particle. *Fuel*, vol 94, pp. 551-555.

Huhtinen, Markku., Kettunen Arto., Nurminen, Pasi & Pakkanen, Heikki. 2000. Höyrykattilatekniikka. ISBN 951-37-3360-2

Hyppänen, Timo & Raiko, Risto. 2002. Kappale 18, Leijupoltto, teoksessa: Poltto ja palaminen, toimittanut Raiko, Risto., Saastamoinen, Jaakko., Hupa, Mikko & Kurki-Suonio, Ilmari. Jyväskylä. ISBN 951-666-604-3

Li, Jie & Kuipers, J.A.M. 2003. Gas-particle interactions in dense gas-fluidized beds. *Chemical engineering science*, vol 58, pp. 711-718.

Mandö, Matthias & Rosendahl, Lasse. 2010. On the motion of non-spherical particles at high Reynolds number. *Powder technology*, vol 202, pp. 1-13.

Saastamoinen, Jaakko. 2002. Kappale 8: Kiinteän polttoaineen palaminen ja kaasutus, teoksessa: Poltto ja palaminen, toimittanut Raiko, Risto., Saastamoinen, Jaakko., Hupa, Mikko & Kurki-Suonio, Ilmari. Jyväskylä. ISBN 951-666-604-3

Seville, J.P.K., Willett, C.D & Knight, P.C. 2000. Interparticle forces in fluidisation: a review. Powder technology, vol 113, pp. 261-268.

Vakkilainen, Esa. 2010. Höyryn kehitys biomassalla. [opetusmateriaali] LTY. Päivitetty 12.08.2012, [viitattu 15.02.2012] Saatavissa:
https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bh50a0800/luennot,vaatii_kayttooikeudet

Van Loo, Sjaak & Koppejan, Jaap. 2008. The handbook of biomass combustion & co-firing. ISBN 978-1-84407-249-1

Vuori, Seppo., Abdurahikov, Rinat., Alanen, Raili., Baschwitz, Anne., Delpech, Marc., Forsström, Juha., Helynen, Satu., Hänninen, Seppo., Kirkinen, Johanna., Kiviluoma, Juha M., Koljonen, Tiina., Koreneff, Göran., Kärkkäinen, Seppo., Langlois, Jean-Paul., Lindroos, TomiJ., Loaëc, Christine., Rischerm Heiko., Rosenberg, Rolf., Ruska, Maija., Sahay, Arun., Similä, Lassi., Sipilä, Kari & Solanko, Laura. 2010. Kappale 5 Energy resources and supply systems, teoksessa: Energy visions 2050. 2. painos. ISBN 978-951-37-5595-9

Yang, Wen-Ching. 2003. Kappale 1, Particle characterization and dynamics, teoksessa: Handbook of fluidization and fluid-particle systems. eISBN 978-0-203-91274-4

Yow, H.N., Pitt, M.J & Salman, A.D. 2005. Drag correlations for particles of regular shape. Advanced powder technology, vol 16, No 4, pp. 363-372.

Zastawny, Marian., Mallouppas, George., Zhao, Wan & van Wachem, Berend. 2012. Derivation of drag and lift force and torque coefficients for non-spherical particles in flows. International journal of multiphase flow, vol 39, pp. 227-239.

LIITTEET

LIITE 1: KORRELAATION YOW, PITT & SALMAN KERTOIMIA

Taulukko 22. Korrelaation Yow, Pitt & Salman kertoimia. (Yow, et al. 2005, s. 368)

Pallomaisuus(-)	a(-)	b(-)	c(-)
0,034	217,8	-341,5	357,9
0,0690	135,9	-183,3	139,9
0,140	99,1	-14,4	25,3
0,360	50,3	-17,3	7,3
0,670	28,8	3,1	1,6
0,820	26,1	2,4	1,0
0,910	25,2	1,0	1,2
1,000	23,5	4,6	0,3