

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Minimileijutusnopeuden arviointi

Evaluation of minimum fluidization velocity

Työn tarkastaja: Markku Nikku

Työn ohjaaja: Markku Nikku

Lappeenranta 29.10.2018

Tuomo Nummela

TIIVISTELMÄ

Tuomo Nummela

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Markku Nikku

Kandidaatintyö 2018

39 sivua, 12 kuvaa, 15 taulukkoa ja 1 liite

Hakusanat: Leijutus, minimileijutusnopeus, korrelaatiot

Tässä kandidaatintyössä käsitellään kiinteistä hiukkasista muodostuvien materiaalien leijutusta kaasun avulla. Erityisesti keskitytään leijutuksen alkamiskohdan kaasun virtausnopeuden niin sanotun minimileijutusnopeuden määrittämiseen. Tavoitteena on määrittää minimileijutusnopeus kokeellisten mittausten perusteella ja vertailla saatuja tuloksia kirjallisuudesta löytyvien korrelaatioiden perusteella laskettuihin arvoihin. Työ koostuu pääosin minimileijutusnopeuden korrelaatioiden esittelystä, mittausten toteutuksesta sekä korrelaatioiden ja mittaustulosten vertailusta.

Minimileijutusnopeuden määrittäminen suoritettiin kokeellisesti kvartsihiekkalle, lasikuulille sekä kalkkikivelle. Vertaillen saatuja tuloksia 23:lla eri korrelaatioilla laskettuihin arvoihin huomattiin, että lähes kaikki korrelaatiot antoivat huomattavasti mittaustuloksia pienempiä minimileijutusnopeuksia. Vain muutamalla korrelaatiolla päästiin alle 10 % suhteelliseen virheeseen mittaustuloksiin verrattaessa. Lisäksi huomattiin suurimman osan korrelaatioista antavan suhteellisesti pienemmän virheen suuremman hiukkaskoon mittaustuloksille.

Mittaustulosten ja korrelaatioilla laskettujen arvojen verrattain suurista eroista johtuen suositellaan suorittamaan minimileijutusnopeuden määrittäminen useaan kertaan, ja mahdollisesti usealle erilaisella mittauslaitteistolla. Tämän työn puitteissa ei pystytty toteamaan, mikä tai minkä muotoinen korrelaatio olisi tarkin kaikille mittaustuloksille. Näin ollen suositellaan valitsemaan korrelaatio aina tapauskohtaisesti leijutustilanteen materiaalista ja olosuhteista riippuen.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	5
1 Johdanto	6
2 Yleistä Leijutuksesta	7
2.1 Leijutustilat.....	7
2.2 Leijutettavan materiaalin ominaisuuksista	8
2.2.1 Hiukkaskoko	8
2.2.2 Muotokerroin	9
2.2.3 Kaasun tilavuusosuus	10
2.3 Petimateriaalien luokittelu.....	11
2.3.1 Luokka C.....	12
2.3.2 Luokka A.....	12
2.3.3 Luokka B.....	13
2.3.4 Luokka D.....	13
2.4 Leijutuksen sovelluskohteita teollisuudessa.....	13
3 Minimileijutusnopeuden korrelaatiot	14
3.1 Painehäviö kiintopedissä	14
3.2 Korrelaatioiden määrittäminen	14
3.3 Korrelaatiot muotoa Wen & Yu	16
3.4 Yhtälön (12) muotoiset korrelaatiot	17
3.5 Muun tyyppiset korrelaatiot	18
3.6 Muotokertoimen ja kaasun tilavuusosuuden arvoja vaativat korrelaatiot	19
4 Minimileijutusnopeuden määrittäminen kokeellisesti	21
4.1 Painehäviö-virtausnopeuskuvaaja	21
4.2 Koemateriaalit	23
4.3 Mittausjärjestelyt	24
4.4 Mittausten toteutus	25
5 Mittaustulokset	27
5.1 Tyhjän putken mittaus	27
5.2 Kalkkikiven mittaus	27
5.3 Kvartsihiekan mittaus.....	29
5.4 Lasikuulien mittaus	30
5.5 Huomioita mittaustulosten tulkinnoista.....	31
6 Korrelaatioiden vertailu mittaustuloksiin	32
6.1 Korrelaatiot muotoa Wen & Yu	32
6.2 Yhtälöiden (12), (13) ja (14) muotoiset korrelaatiot	34
6.3 Muotokertoimen ja kaasun tilavuusosuuden arvoja vaativat korrelaatiot	36

6.4 Johtopäätöksiä korrelaatioiden ja mittaustulosten vertailusta	38
7 Yhteenveto	39
Lähdeluettelo	40
Liite 1.	42

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

d_p	keskimääräinen hiukkaskoko	[m]
g	normaaliputoamiskiihtyvyys	[m/s ²]
H	pedin korkeus	[m]
m	massa	[kg]
u	kaasun virtausnopeus	[m/s]
V	tilavuus	[m ³]

Kreikkalaiset aakkoset

Δp_b	paine-ero pedin yli	[Pa]
Δp_{fr}	kaasuvirtauksen painehäviö	[Pa]
ε	kaasun tilavuusosuus pedissä	[-]
μ	dynaaminen viskositeetti	[kg/(m·s)]
ϕ	muotokerroin	[-]
ρ	tiheys	[kg/m ³]

Dimensiottomat luvut

Ar	Arkhimedeen luku
Re	Reynoldsin luku

Alaindeksit

b	peti
g	kaasu
mf	minimileijutustila
p	materiaalin hiukkanen
t	terminaali

1 JOHDANTO

Minimileijutusnopeus on tärkeä parametri leijutusteknisten laitteiden käytössä ja suunnittelussa. Se määrittää materiaalin leijutuksen alkamiskohdan, mikä on tärkeä mitoitusparametri monien leijutusta hyödyntävien sovelluskohteiden toimivuuden kannalta. Optimaalisiin käyttöolosuhteisiin päästään määrittämällä minimileijutusnopeus mahdollisimman tarkasti. Aiheesta julkaistujen tutkimusten määrä on kasvanut eksponentiaalisesti 2000-luvun aikana. Kirjallisuudesta löytyykin yli 100 korrelaatiota minimileijutusnopeuden arvioimiseksi (Anantharaman et al. 2017, 455).

On syytä pohtia, miksi yhden parametrin määrittämiseksi on julkaistu monta erilaista korrelaatiota. Minimileijutusnopeus on yksinkertaisesta määritelmästä huolimatta herkkä leijutustilanteen parametrien muutoksille. Tästä johtuen useat korrelaatiot sopivat vain rajattuihin leijutustilanteisiin, joka osaltaan vaikuttaa niiden suureen määrään. Korrelaatioiden määrän kasvaessa tarve arvioida tarkkuutta ja pätevyysaluetta kasvaa. Suurin osa julkaisuista keskittyy uusien korrelaatioiden määrittämiseen tai olemassa olevien parantamiseen. Kirjallisuudessa onkin niukasti tutkimuksia, jotka tarkastelisivat korrelaatioita vertailevalla otteella. Jotta arvioita korrelaatiosta voidaan tehdä, täytyy niitä verrata toisiinsa sekä kokeellisiin mittauksiin.

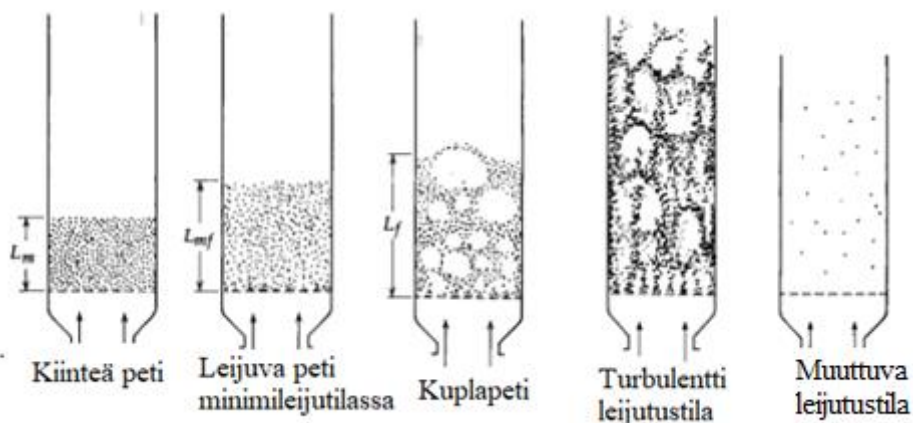
Tämän työn tavoitteena on arvioida kirjallisuudessa julkaistuja korrelaatioita vertailemalla niiden arvoja kokeellisten mittausten tuloksiin. Aluksi työssä käsitellään leijutusta yleisesti ilmiönä sekä esitellään kirjallisuudesta löytyviä korrelaatioita. Näiden jälkeen käydään läpi minimileijutusnopeuden määrittäminen kokeellisesti, työssä käytetyt koejärjestelyt ja mittaustulokset. Lopuksi vertaillaan korrelaatioita ja mittaustuloksia keskenään. Tarkoituksena on esitellä kattavasti minimileijutusnopeuden määrittämistä sekä kokeellisesti että korrelaatioiden kautta, ja tehdä arviota minimileijutusnopeuden arvon luotettavuudesta.

2 YLEISTÄ LEIJUTUKSESTA

Leijutuksella tarkoitetaan tilannetta, jossa pienistä hiukkasista koostuva materiaali käyttäytyy nesteen omaisesti sen läpi johdetun kaasun tai nesteen vaikutuksesta (Kunii & Levenspiel 1991, 1). Leijutettavan aineen hiukkasista muodostuvaa materiaalikerrosta kutsutaan leijutustekniikassa pediksi. Leijutustilan saavuttamiseen ja muutoksiin vaikuttavat sekä virtaavan fluidin että leijutettavan materiaalin ominaisuudet. Virtausnopeutta, jolla pedin minimileijutustila saavutetaan, kutsutaan minimileijutusnopeudeksi u_{mf} . Kasvattaessa nopeutta yli minimileijutusnopeuden yleensä pedissä havaitaan ensin kuplimista ja tarpeeksi suurella nopeudella lopulta materiaalin hiukkasten kulkeutumista virtaavan fluidin mukaan. (Raiko & Hyppänen 2002, 491.)

2.1 Leijutustilat

Tässä työssä keskitytään leijutustilanteeseen, jossa virtaavana fluidina toimii kaasu. Kaasun virtaustapauksessa kiinteistä hiukkasista muodostuva peti voidaan leijutustilan mukaan jakaa karkeasti viiteen osaan: kiinteään, leijuvaan, kuplivaan, turbulenttiin ja muuttuvaan. Kiinteä peti eli kiintopeti on muuttumaton pedin tila, joka saavutetaan matalilla virtaavan kaasun nopeuksilla. Virtaus kulkee pedin läpi, mutta virtaavan kaasun nopeus ei ole riittävä erottamaan pedin hiukkasia toisistaan. Toisin sanoen virtaavan kaasun aiheuttaman vastusvoima hiukkasiin on pienempi kuin niihin vaikuttava painovoima. Leijutustiloja havainnollistetaan kuvassa 1. (Kunii & Levenspiel 1991, 1.)



Kuva 1. Leijutustilat. (Kunii & Levenspiel 1991, 2.)

Siirtymä kiintopedistä leijuvaan petiin tapahtuu, kun kaasun aiheuttama vastusvoima materiaalin hiukkasiin kumoaa niihin vaikuttavan painovoiman. (Kunii & Levenspiel 1991, 68). Tällöin hiukkaset irtoavat toisistaan, mikä on havaittavissa pedin tiheyden pienenemisenä ja korkeuden kasvamisena. Kasvatettaessa edelleen kaasun virtausnopeutta saadaan aikaan pedin kuplimista, jota havaitaan materiaalista riippuen joko heti minimileijutusnopeudessa tai vasta suuremmalla virtausnopeudella. Esimerkiksi hiekkamaisten aineiden, joiden hiukkaskoko on yleensä 50–500 μm ja hiukkastiheys 1400–4000 kg/m^3 , kupliminen alkaa heti minimileijutusnopeudessa. (Raiko & Hyppänen 2002, 494.)

Turbulentti leijutustila saavutetaan, kun kaasun virtausnopeus lähestyy materiaalihiukkasten vapaata putoamisnopeutta niin kutsuttua terminaalinopeutta u_t . Tällöin pedissä ei ole havaittavissa selviä yksittäisiä kuplia vaan jatkuvaa turbulenttia sekoittumista. Pinnasta alkaa irrota yksittäisiä hiukkasia kaasun mukaan ja materiaalikerroksen selkeä pinta häviää. Terminaalinopeutta suuremmilla nopeuksilla pedistä irrottaa selkeästi hiukkasia virtauksen mukaan. Tällöin voidaankin puhua muuttuvasta leijutilasta tai pneumaattisesta kuljettumisesta. (Kunii & Levenspiel 1991, 2–3.)

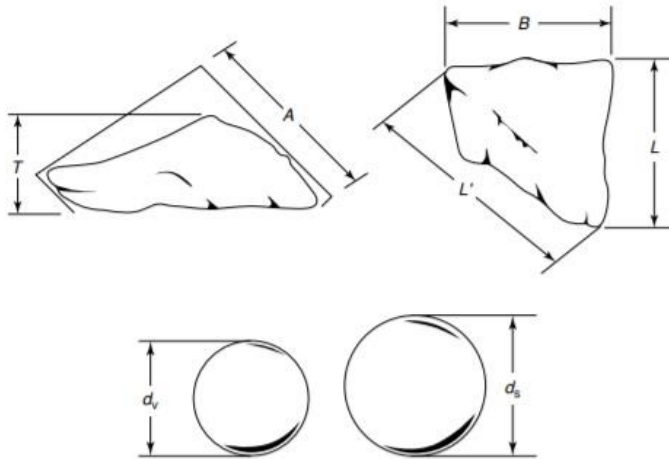
2.2 Leijutettavan materiaalin ominaisuuksista

Leijutuksen kannalta tärkeitä materiaalin ominaisuuksia ovat hiukkaskoko, materiaalin tiheys, muotokerroin (eng. sphericity) ja kaasun tilavuusosuus (eng. voidage). Yleisesti ottaen eri materiaalien hiukkaskokojen sekä tiheyksien arvoja on paljon saatavissa kirjallisuudesta toisin kuin muotokertoimia. Tilavuusosuus on ominaisuuksista epävarmin määrittää, sillä se riippuu materiaalin muista ominaisuuksista.

2.2.1 Hiukkaskoko

Kun hiukkasen koko kasvaa, sen massa myös kasvaa. Näin ollen suurempien hiukkasten leijutukseen tarvitaan suurempi voima, ja täten vaadittava minimileijutusnopeuskin kasvaa. McGlinchey (2005) esittää, että hiukkaskoolle ei ole yhtä tarkkaa määritelmää, jota voitaisiin pitää vertailukelpoisena kaikkien materiaalien välillä. Määritelmänä hiukkaskoko on ongelmallinen, sillä eri aineiden arvoja pidetään vertailukelpoisina, kun niiden muoto on sama. Käytännössä tämä tarkoittaa, että säännöllisen muotoiset

hiukkaset olisivat vain vertailukelpoisia keskenään. (McGlinchey 2005, 3.) Kuvasta 2 on nähtävissä tämä ongelmallisuus yksittäisten hiukkasten kokojen määrittämisen kohdalla.



Kuva 2. Erilaisten hiukkasten kokojen vertailua. (McGlinchey 2005, 4.)

Hiukkaskoko käsitelläänkin yleensä keskimääräisenä hiukkaskokona, joka määritetään materiaalin hiukkaskokojakauman perusteella. Jakauma saadaan esimerkiksi tekemällä materiaalille hiukkaskokoanalyysi seulomalla materiaalia erikokoisilla seuloilla. Keskimääräisen hiukkaskoon määritetään esimerkiksi kumulatiivisen hiukkasen koko-esiintymistodennäköisyys -jakauman perusteella. (McGlinchey 2005, 4–5.)

2.2.2 Muotokerroin

Muotokertoimen arvo kertoo, kuinka paljon hiukkasen muoto muistuttaa matemaattisesti täydellisen pallon muotoa. Se on määritelmän mukaisesti samassa tilavuudessa olevien täydellisen pallon ja hiukkasen pinta-alojen välinen suhde. Muotokerroin on määritelmän mukaisesti:

$$\phi = \frac{d}{D} \quad (1)$$

missä ϕ muotokerroin [-],

- d sellaisen ympyrän halkaisija, jonka pinta-ala on yhtä suuri kuin tarkasteltavan hiukkasen projektiopinta-ala tasolla [m],
- D pienimmän mahdollisen hiukkasen tasoprojektion rajoittavan ympyrän halkaisija [m] (McGlinchey 2005, 29.).

Muotokerroin voidaan määrittää kaasun tilavuusosuuden avulla Narsimhan (1965) esittämän yhtälön (2) muodossa olevan korrelaation avulla (Kaluderović Radoičić et al. 2013, 65).

$$\phi = \frac{0,768 - \varepsilon_{mf}}{0,42} \quad (2)$$

missä ε_{mf} kaasun tilavuusosuus pedissä minimileijutustilassa [-].

2.2.3 Kaasun tilavuusosuus

Kaasun tilavuusosuuden arvo kertoo kuinka pedin hiukkaset ovat järjestäytyneet. Mitä tiiviimpi järjestys pedissä vallitsee sitä pienempi kaasun tilavuusosuuden arvo on. Geldart (1986) määrittää pedin kaasun tilavuusosuuden yhtälön (3) mukaisesti.

$$\varepsilon = \frac{V_b - V_p}{V_b}, \quad (3)$$

missä ε kaasun tilavuusosuus pedissä [-],

V_b pedin tilavuus [m³],

V_p hiukkasten tilavuus [m³].

Yhtälö (3) voidaan esittää tiheyden määritelmän avulla yhtälön (4) mukaisesti:

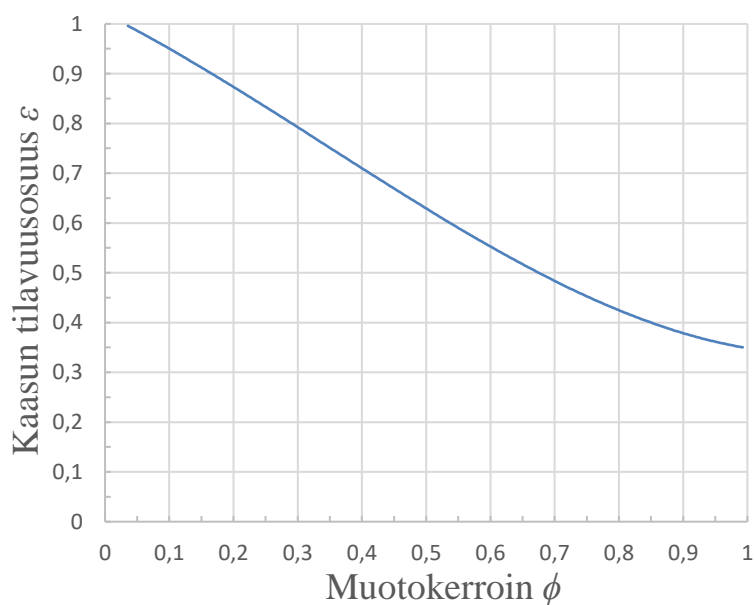
$$\varepsilon = 1 - \frac{m_b}{\rho_p V_b}, \quad (4)$$

missä m_b pedin massa [kg],

ρ_p hiukkasen tiheys [kg/m³].

Kaasun tilavuusosuuden määrittäminen suositellaan tekemään tilannekohtaisesti. Usein tämä ei kuitenkaan onnistu luotettavasti, sillä tilavuusosuuden arvo riippuu useasta

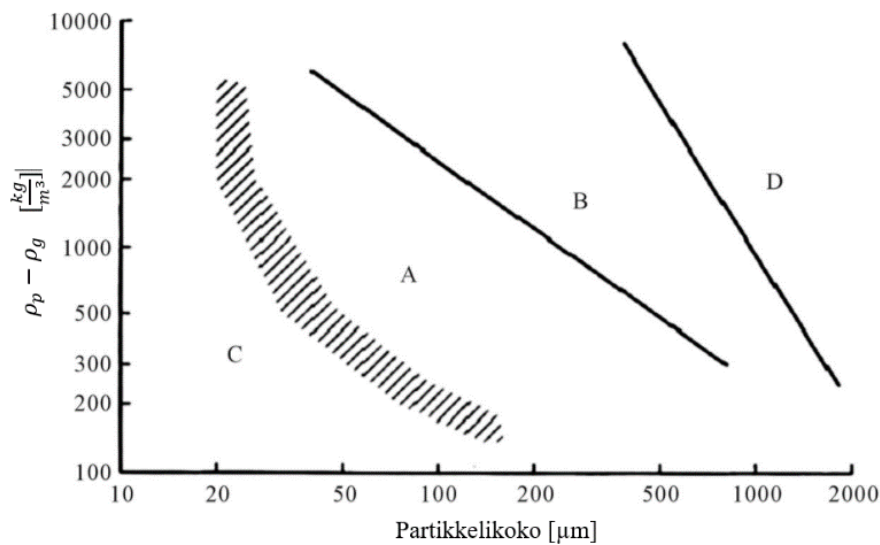
epävarmuustekijästä kuten muotokertoimesta, hiukkaskoosta, pedin pakkautuneisuudesta ja leijutustilasta. Käyttämällä hyödyksi tietoa, että pedin kaasun tilavuusosuus riippuu materiaalin muotokertoimen arvosta, voidaan määrittäessä käyttää apuna kuvaa 3 luokan B ja D (kts. kappale 2.3) leijutusmateriaaleille. (Geldart 1986, 17–18.) Kuvassa 3 esitetään teoreettisen mallin pohjalta satunnaisesti pakkautuneen pedin materiaalin kaasun tilavuusosuuden arvo muotokertoimen funktiona. Mallin suhteellinen virhe on pienempi kuin 20 %. (Lanfrey et al. 2009).



Kuva 3. Kaasun tilavuusosuuden arvo muotokertoimen funktiona satunnaisesti pakkautuneessa pedissä (Lanfrey et al. 2009).

2.3 Petimateriaalien luokittelu

Materiaalien minimileijutusnopeus riippuu voimakkaasti kappaleessa 2.2 esitettyjen ominaisuuksien arvoista. Materiaalin käyttäytymistä minimileijutustilassa voidaan arvioida Geldartin (1986) tekemän petimateriaalien luokitusten avulla. Hän havaitsi tutkimuksissaan, että jakamalla materiaalit neljään eri luokkaan materiaalin tiheyden ja hiukkaskoon mukaan, kunkin luokan materiaaleilla on samankaltaisia ominaisuuksia leijutustilanteessa. Materiaalien jakoa neljään kategoriaan A, B, C ja D havainnollistetaan yleensä kuvaajasta, jossa toisella akselilla on keskimääräinen hiukkaskoko ja toisella hiukkasen tiheyden sekä virtaavan kaasun tiheyden erotus. Kuvassa 4 esitetään leijutusmateriaalien luokittelu tällaisilla argumenteilla.



Kuva 4. Geldartin leijutusmateriaalien luokittelu hiukkaskoon ja tiheyseron avulla (Raiko & Hyppänen 2002, 493).

2.3.1 Luokka C

Luokan C materiaaleihin kuuluvat erittäin hienojakoiset jauheet, joiden hiukkaskoko on pääsääntöisesti $< 20 \mu\text{m}$. Tämän luokan materiaalien leijuttaminen on erittäin vaikeaa, koska hiukkasten väliset sisäiset voimat vaikuttavat merkittävästi verrattuna kaasuvirtauksen hiukkasiin kohdistamaan voimaan. Tästä seuraa, että minimileijutusnopeuden määrittäminen on hankalaa, joskus jopa mahdotonta. Tyypillisesti petiin syntyy leijutustilanteessa kanavoita, joiden kautta virtaava fluidi pääsee kulkemaan pedin lävitse. Leijutus saatetaan saada tapahtumaan rikkomalla nämä kanavat esimerkiksi mekaanisella värinällä. Luokan C materiaaleja ovat muun muassa hienojakeiset jauhot, meikkiuuterit sekä talkki. (Kunii & Levenspiel 1991, 77.)

2.3.2 Luokka A

Luokkaan A kuuluvat sellaiset materiaalit, joilla on pieni hiukkaskoko ja/tai alhainen tiheys. Tähän luokkaan kuuluvat materiaalit ovat helposti leijutettavia. Kuplintaa saavutetaan vasta minimileijutusnopeuden merkittävän ylityksen jälkeen, johtuen hiukkasten välisistä sisäisistä voimista. Samasta syystä peti laajenee huomattavasti ennen minimileijutustilaa verrattuna muiden luokkien materiaaleihin. Kun leijutusfluidin syöttö petiin katkaistaan, peti järjestyy takaisin lähtötilaan verrattain hitaalla nopeudella. Tästä

johtuen Luokan A materiaalit soveltuvat hyvin kiertävän leijutuksen sovelluskohteisiin. (Kunii & Levenspiel 1991, 77.)

2.3.3 Luokka B

Luokan B materiaalit ovat hiekkamaisia aineita, joiden hiukkaskoot ovat 40–500 μm ja tiheydet 1400–4000 kg/m^3 . Tällaisilla materiaaleilla on yleisesti hyvät leijutusominaisuudet. (Kunii & Levenspiel 1991, 77.) Materiaalin sisäiset voimat ovat merkityksettömiä luokan B materiaaleille, jonka takia materiaalin kuplimista havaitaan heti minimileijutusnopeudessa (Geldart 1986, 37).

2.3.4 Luokka D

Luokka D sisältää materiaalit, joiden hiukkaskoko on yli 500 μm . Siihen kuuluu materiaaleja, joiden hiukkastiheys on korkea ja/tai hiukkaset ovat leijutuksen kannalta isoja. Vaadittava minimileijutusnopeus on huomattava verrattuna muihin materiaaliluokkiin. Leijutettaessa luokan D materiaaleja, havaitaan yleensä pedissä sykkivää ja epävakaata liikettä, mitkä tekevät leijutuksesta vaikeasti hallittavaa. (Kunii & Levenspiel 1991, 77.)

2.4 Leijutuksen sovelluskohteita teollisuudessa

Leijutuksella on monia erilaisia käyttötarkoituksia teollisuuden prosesseissa. Sitä käytetään laajasti erilaisissa sovelluskohteissa, sillä leijutus muun muassa kasvattaa huomattavasti materiaalin lämmön- ja massansiirtokykyä. Tässä työssä tarkasteltavalla kaasunvirtauksen kiinteiden materiaalihiukkasten leijutuksella on paljon sovelluskohteita muun muassa energiantuotannossa, kuivausprosesseissa, kaasutuksessa, leijukatalyyttisessä krakkauksessa (eng. fluid catalytic cracking) ja kalsinoinnissa. (Anantharaman et al. 2017, 455.) Esimerkiksi energiantuotannossa leijutustekniikkaa käytetään leijupetikattiloissa ja lämmönsiirtimissä (Kunii & Levenspiel 1991, 19; 42–44).

3 MINIMILEIJUTUSNOPEUDEN KORRELAATIOT

Minimileijutusnopeuden arvioimiseksi löytyy kirjallisuudesta useita kokeellisesti määritettyjä korrelaatioita. Tässä kappaleessa käsitellään, miten minimileijutusnopeuden korrelaatiot on muodostettu, ja esitellään tässä työssä tarkasteltavat korrelaatiot. Anantharamanin et al. (2017) mukaan vuoden 1950 jälkeen on julkaistu yli sata korrelaatiota minimileijutusnopeuden määrittämiseksi. Tämän työn laajuudessa esitellään 23 korrelaatiota ja vertaillaan niitä keskenään sekä saatujen mittaustulosten kanssa. Korrelaatiot pyrittiin valitsemaan mahdollisimman hyvin niin, että mitattavat materiaalit tiheyden ja hiukkaskoon puolesta sopisivat korrelaatioiden pätevyysalueelle. Valintoja pyrittiin tekemään myös laajalta julkaisuaanjaksolta.

3.1 Painehäviö kiintopedissä

Kaasun virratessa materiaalikerroksen läpi, se törmää materiaalin hiukkasiin, jonka seurauksena virtaukseen aiheutuu painehäviötä. Virtauksen painehäviö kiintopedissä voidaan ilmaista Ergunin yhtälön (5) mukaisesti (Raiko & Hyppänen 2002, 496).

$$\frac{\Delta p_{fr}}{H} = 150 \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu_g u}{(\phi d_p)^2} + 1,75 \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\rho_g u^2}{\phi d_p}, \quad (5)$$

missä	Δp_{fr}	kaasuvirtauksen painehäviö [Pa],
	H	pedin korkeus [m],
	d_p	keskimääräinen hiukkaskoko [m],
	μ_g	kaasun dynaaminen viskositeetti [kg/m·s],
	u	kaasun virtausnopeus [m/s].

3.2 Korrelaatioiden määrittäminen

Minimileijutusolosuhteet saavutetaan kappaleessa 1 mainitun voimatasapainon vallitessa. Kunii & Levenspiel (1991) esittää lisäksi, että minimileijutusolosuhteiden vallitessa leijutettavan pedin kokonaispaine on oltava yhtä suuri pedissä tapahtuvan painehäviön kanssa. Tällöin minimileijutusolosuhteissa on voimassa seuraava yhtälö:

$$\frac{\Delta p_b}{H_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g, \quad (6)$$

missä	Δp_b	paine-ero pedin yli [Pa],
	H_{mf}	pedin korkeus minimileijutustilassa [m],
	ϵ_{mf}	kaasun tilavuusosuus minimileijutustilassa [-],
	ρ_g	kaasun tiheys [kg/m ³],
	ρ_p	petimateriaalin hiukkaseen tiheys [kg/m ³],
	g	normaaliputoamiskiihtyvyyden [m/s ²].

Minimileijutusolosuhteissa kiintopedin painehäviö ja kaasuvirtauksen painehäviö ovat yhtä suuria. Näin ollen yhdistämällä yhtälöt (5) ja (6) saadaan minimileijutusnopeus ratkaistua yhtälöstä (7). (Kunii & Levenspiel 1991, 69.)

$$\frac{1,75}{\epsilon_{mf}^3 \phi} Re_{mf}^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})^2}{\phi^2 \epsilon_{mf}^3} Re_{mf} = Ar, \quad (7)$$

missä	Re_{mf}	Reynoldsin luku minimileijutustilassa [-],
	Ar	Arkhimedeen luku [-].

Yhtälö (7) on Ergunin (1952) virtauksen painehäviön yhtälön kautta muodostettu korrelaatio, joka on yksi ensimmäisistä minimileijutusnopeuden korrelaatioista. (Anantharaman et al. 2017, 456.)

Reynoldsin luku on määritelmänsä mukaisesti hiukkaseen vaikuttavan inertiaivoiman suhde siihen vaikuttaviin viskoosiin voimiin. Reynoldin luku minimileijutustilassa on yhtälön (8) mukaisesti (Raiko & Hyppänen 2002, 496).

$$Re_{mf} = \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu_g}, \quad (8)$$

missä	u_{mf}	minimileijutusnopeus = kaasun virtausnopeus tyhjässä putkessa minimileijutusolosuhteissa [m/s],
	d_p	keskimääräinen hiukkaskoko [m].

Arkhimedeen luku on määritelmän mukaan (Kunii & Levenspiel 1991, 69.):

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2}. \quad (9)$$

Erittäin pienille hiukkasille ($Re_{mf} < 20$) yhtälön (7) ensimmäinen termi voidaan jättää huomioimatta. Taas erittäin suurille hiukkasille ($Re_{mf} > 1000$) yhtälön (7) vasemman puolen jälkimmäinen termi on mitätön. Reynoldsin luvun ollessa 20–1000 on minimileijutusnopeus ratkaistavissa esimerkiksi iteroimalla yhtälön (7) molempia puolia (Raiko & Hyppänen 2002, 496).

Minimileijutusnopeuden ratkaiseminen yhtälöstä (7) vaatii tietoa leijutettavan materiaalin muotokertoimen ja kaasun tilavuusosuuden arvoista. Kirjallisuudessa yleisimmin esiintyvät korrelaatiot pohjautuvat yhtälön (7) muotoon, mutta ovat ratkaistavissa ilman kyseisiä arvoja. Näitä korrelaatioita esitetään tarkemmin kohdissa 3.3, 3.4 ja 3.5. Kohdassa 3.6 käsitellään korrelaatioita, joiden ratkaisemiseen tarvitaan muotokertoimen ja tilavuusosuuksien arvoja.

3.3 Korrelaatiot muotoa Wen & Yu

Suurin osa kirjallisuudesta löytyvistä korrelaatioista pohjautuu Wen & Yu:n (1966) tekemiin kokeellisiin mittauksiin. He havaitsivat, että yhtälön (7) muodossa Reynoldsin luvun edessä olevien kertoimien arvot pysyvät lähes vakiona laajalle joukolle erilaisia materiaaleja. Wen & Yu muodossa olevat korrelaatiot esitetään yhtälön (10) muodossa. (Kunii & Levenspiel 1991, 70.)

$$aRe_{mf}^2 + bRe_{mf} = Ar, \quad (10)$$

missä $a = \frac{1,75}{\epsilon_{mf}^3 \phi^2}$,

$$b = \frac{150(1-\epsilon_{mf})^2}{\phi^2 \epsilon_{mf}^3}.$$

Yhtälöiden (10) ja (8) mukaisesti minimileijutusnopeus muotoa Wen & Yu oleville korrelaatioille lasketaan ratkaisemalla yhtälö (10) minimileijutusnopeuden suhteen.

$$u_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \left(\sqrt{A^2 + BAr} - A \right), \quad (11)$$

missä $A = \frac{a}{2b},$

$$B = \frac{1}{a}.$$

Eri lähteet määrittelevät yhtälössä (11) olevat kertoimet A ja B omien kokeellisten tulosten perusteella. Taulukossa 1 on koottu tässä työssä. käytettävien Wen & Yu -muotoa olevien korrelaatioiden tietoja ja kertoimien arvoja.

Taulukko 1. Wen & Yu -muotoa olevien korrelaatioiden parametreja (Anantharaman et al. 2017, 457).

Julkaisija	Julkaisuvuosi	Hiukkasen koko [μm]	Hiukkasen tiheys [kg/m^3]	A	B
Wen & Yu	1966	2052–6350	2360–7840	33,7	0,0408
Saxena & Vogel	1977	650–704	1900–2460	25,3	0,0571
Richardson	1979	-	-	25,7	0,0365
Grace	1982	-	-	27,2	0,0408
Babu et al.	1987	50–2870	2560–3920	25,25	0,0651
Chyang & Huang	1988	699–6062	910–6860	33,3	0,033
Hillal et al.	2001	80–1230	1228–8000	13,07	0,0263
Hartman et al.	2007	125–800	2900	17,32	0,0216
Tannous & Lourenco 1	2015	331–2017	395–2636	33,9	0,051

3.4 Yhtälön (12) muotoiset korrelaatiot

Tämän tyyppisen korrelaatiot ovat seuraavaksi yleisimpiä kirjallisuudesta löytyviä korrelaatiota (Anantharaman et al. 2017, 461). Tässä työssä arvioidaan yhteensä kuuden yhtälön (12) muotoa olevan korrelaation arvoja saatuihin mittaustuloksiin. Näille taulukossa 2 esitetyille korrelaatioille minimileijutusnopeus voidaan määrittää seuraavasti:

$$u_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} N A r^M, \quad (12)$$

missä N, M korrelaatiokohtainen vakio [-].

Taulukko 2. Yhtälön (12) muotoa olevien korrelaatioiden parametreja (Anantharaman et al. 2017, 460–461).

Julkaisija	Julkaisuvuosi	Hiukkasen koko [μm]	Hiukkasen tiheys [kg/m^3]	N	M
Kumar & Sen Dupta	1974	359–677	2660–4570	0,0054	0,78
Barbosa et al.	1995	110–920	1480–3960	0,0019	0,87
Rabinovich & Kalman D	2008	-	-	0,015	0,667
Rabinovich & Kalman B	2008	-	-	0,0013	0,88
Seo et al.	2014	135–385	2500	0,0005757	1
Tannous & Lourenço 2	2015	331–2017	395–2636	0,0123	0,8086

3.5 Muun tyyppiset korrelaatiot

Kirjallisuudessa on myös erilaisia korrelaatiota verrattuna kohdissa 3.3 ja 3.4 esitettyihin. Esimerkiksi Todes et al. (1958), Davtyan et al. (1976) sekä Fletcher et al. (1992) esittävät yhtälön (13) muotoa olevia korrelaatiota. Taulukosta 3 löytyy näiden korrelaatioiden tietoja.

$$Re_{mf} = \frac{Ar}{X + Y\sqrt{Ar}}, \quad (13)$$

missä X, Y korrelaatiokohtainen vakio [-].

Taulukko 3. Yhtälön (13) muotoisten korrelaatioiden parametreja (Anantharaman et al. 2017, 463).

Julkaisija	Julkaisuvuosi	Hiukkasen koko [μm]	Hiukkasen tiheys [kg/m^3]	X	Y
Todes et al.	1958	-	-	1400	5,2
Davtyan et al.	1976	-	-	1040	4,86
Fletcher et al.	1992	75–3350	2500	790	7

Coltters & Rivas (2004) esittävät yhteensä 16 yhtälön (14) muotoa olevaa korrelaatiota. Korrelaatiot on määritetty erilaisten materiaalien mittausdatan perusteella. Tätä työtä varten valittiin hiekalle sekä lasille määritellyt korrelaatiot. Lisäksi yhtälön (14) muotoa olevia korrelaatioista tarkastellaan Oliveiran et al. (2013) sekä Shaon et al. (2013) julkaisemia.

$$u_{mf} = KR^z, \quad (14)$$

missä K, z korrelaatiokohtainen vakio [-],

$$R = \frac{d_p^2(\rho_p - \rho_g)g}{\mu_g} \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{1,2,3}.$$

Yhtälön (14) mukaisten korrelaatioiden arvoja esitetään taulukossa 4.

Taulukko 4. Yhtälön (14) mukaisten korrelaatioiden parametreja (Anantharaman et al. 2017, 464).

Julkaisija	Julkaisuvuosi	Hiukkasen koko [μm]	Hiukkasen tiheys [kg/m^3]	K	z
Coltters & Rivas (hiekalle)	2004	95–800	-	9,7119E-07	0,84268
Coltters & Rivas (lasille)	2004	23–569	-	4,3384E-07	0,89029
Oliveira et al.	2013	125–1400	-	0,000117	0,4916
Shao et al.	2013	180–10000	677–2560	0,00128	0,356

3.6 Muotokertoimen ja kaasun tilavuusosuuden arvoja vaativat korrelaatiot

Kirjallisuudesta löytyy myös korrelaatioita, joiden käyttö vaatii tietoja materiaalin muotokertoimen sekä kaasun tilavuusosuuden arvoista. Yhtälön (7) muotoinen ratkaisu voidaan katsoa yhdeksi tähän kategoriaan kuuluvaksi korrelaatioksi. Tämän tyyppisiä korrelaatioita on kuitenkin julkaistu huomattavasti vähemmän verrattuna muihin. Tässä työssä tarkastellaan Puspararin et al. (2013) julkaisemia yhtälön (15) muodossa olevia korrelaatioita. (Anantharaman et al. 2017, 467.)

$$Re_{mf} = q\phi^x(1 - \epsilon_{mf})^c \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^c Ar^c, \quad (15)$$

missä x, c, f, p korrelaatiokohtainen vakio [-].

Yhtälön (15) parametrit muuttuvat yhtälössä (16) esitetyn ehdon mukaan.

$$E = \ln \left[\phi^3(1 - \epsilon_{mf}) \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right) Ar \right]. \quad (16)$$

Taulukossa 5 esitetään yhtälön (14) parametreja erilaisilla yhtälön (15) ehdoilla.

Taulukko 5. Yhtälön (15) parametrien arvoja yhtälön (16) ehdoilla (Anantharaman et al. 2017, 467).

Ehto, Yhtälö (16)	q	x	c
$6 \leq E \leq 9$	$3,92 \cdot 10^{-6}$	1,826	0,942
$12,5 \leq E \leq 15$	$7,66 \cdot 10^{-10}$	3,734	1,578
$15 \leq E \leq 16,5$	$7,02 \cdot 10^{-7}$	1,958	0,986
$15 \leq E \leq 17$	2,42	-0,415	0,195
$17 \leq E \leq 24$	$6,69 \cdot 10^{-4}$	0,77	0,59

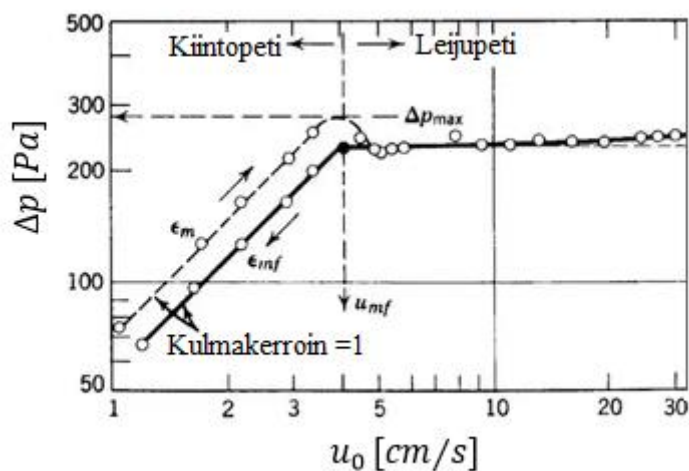
4 MINIMILEIJUTUSNOPEUDEN MÄÄRITTÄMINEN KOKEELLISESTI

Tässä kappaleessa käsitellään minimileijutusnopeuden määrittämistä kokeellisista tuloksista, ja esitellään käytetyt koejärjestelyt sekä mitattavien materiaalien ominaisuudet. Minimileijutusnopeuden määrittämisessä käytetään apuna painehäviövirtausnopeus kuvaajaa sekä pedin visuaalista havainnointia leijutustilanteessa.

4.1 Painehäviö-virtausnopeuskuvaaja

Kokeellisen datan pohjalta määritetään materiaalin minimileijutusnopeuden arvioimiseksi kuvaaja, jossa vaaka-akselilla on virtausnopeus tyhjässä putkessa ja pystyaskelilla virtauksen painehäviö materiaalihiukkasten pedissä. Kuvassa 5 esitetään tyypillinen painehäviö-virtausnopeuskuvaaja samankokoisille leijutettaville hiukkasille. Kiintopedissä painehäviö pedin yli kasvaa lineaarisesti virtausnopeuden kasvaessa. Saavutettaessa maksimipainehäviö Δp_{\max} peti on lähellä minimileijutustilaa u_{mf} . Kun virtausnopeutta kasvatetaan tästä, pedin korkeus kasvaa, mikä on havaittavissa kuvaajasta paine-eron laskuna. Tämän jälkeen leijutustilanne saavutetaan, jos paine-ero pedin yli pysyy muuttumattomana virtausnopeuden kasvaessa. Tämä on selitettävissä leijuvan materiaalikerroksen nestemäisten ominaisuuksien kautta. Johdettaessa kaasua matala viskositeettiseen nesteeseen, havaitaan, että kaasun staattinen paine on kuta kuinkin yhtä suurin kuin nesteen, ja se on riippumaton kaasun virtausnopeudesta. (Kunii & Levenspiel 1991, 71.)

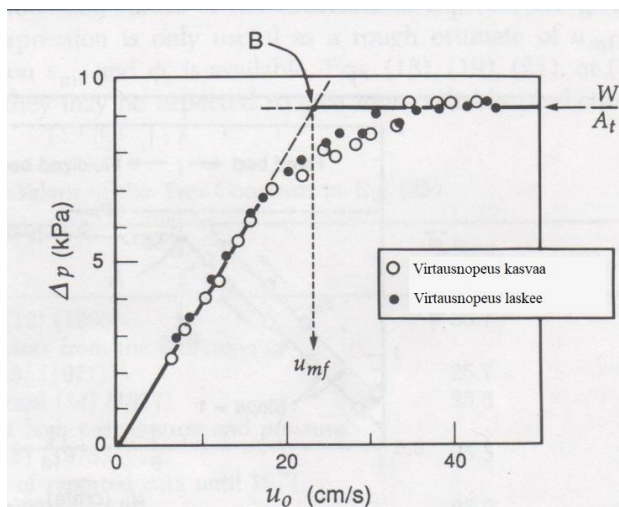
Kaasun virtausnopeuden laskiessa alle minimileijutusnopeuden, leijuva peti asettuu takaisin kiintopediksi. Peti on nyt harvempi kuin ennen leijutusta eli kaasun tilavuusosuus pedissä on tällöin suurempi kuin alkutilassa. Tästä johtuen painehäviö saa eri arvoja virtausnopeutta laskettaessa kuin alkutilan ja minimileijutustilan välillä. Huomattavaa on kuitenkin, että molempien kiintopetien painehäviöiden suorien kulmakerroin on sama.



Kuva 5. Tyypillinen samankokoisten hiukkasten leijutustilanteen painehäviö-virtausnopeuskuvaaja. (Kunii & Levenspiel 1991, 71.)

Kuvan 5 mukainen painehäviö-virtausnopeuskuvaaja ei päde materiaaleille, joilla on laaja hiukkaskokojakauma. Leijutettaessa tämän kaltaisia materiaaleja, materiaalin pienimmät hiukkaset saavuttavat leijutustilan ennen suurimpia hiukkasia. Laajan hiukkaskokojakauman materiaalien leijutustilanne onkin tyypillisesti enemmän kuvan 6 mukainen.

Kuvassa 6 pedin painehäviö ei muodosta selkeää laskukohtaa vaan painehäviö pienenee tasaisesti laskevana pistejoukkona. Tarpeeksi suurella virtausnopeudella pedin paine-ero tasaantuu, jolloin kaikki materiaalin hiukkaset ovat saavuttaneet leijutustilan. Minimileijutusnopeus määritetään kuvasta 6 kiintopedin pistejoukon suoran ja täydellisen leijutuksen pistejoukon suoran leikkauskohdasta (kuva 6 piste B).



Kuva 6. Tyypillinen laajan hiukkaskokojakauman materiaalin painehäviövirtausnopeuskuvaaja. (Kunii & Levenspiel 1991, 72.)

4.2 Koemateriaalit

Tässä työssä määritetään minimileijutusnopeudet kalkkikivelle, lasikuulille sekä kvartsihiekkalle. Materiaalit pyrittiin valitsemaan muun muassa laajalta hiukkaskokoalueelta (150–1000 μm). Valintaperusteena käytettiin myös materiaalien erilaisia ominaisuuksia: esimerkiksi lasikuulilla muotokerroin on 1, mutta kvartsihiekkalla sekä kalkkikivellä alhaisempi. Taulukkoon 6 on koottu mitattavien materiaalien ominaisuuksia.

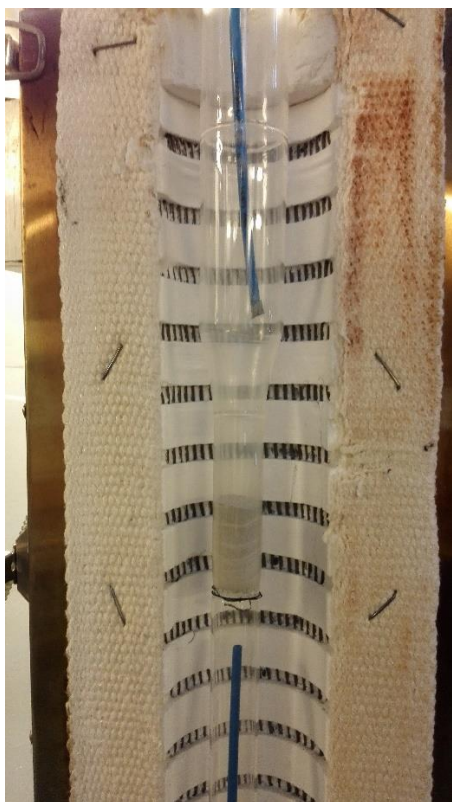
Taulukko 6. Materiaalien ominaisuuksia.

Materiaali	Luokka	Hiukkaskoon vaihteluväli [μm]	Keskimääräinen hiukkaskoko [μm]	Materiaalin tiheys [kg/m^3]	Muoto
Kvartsihiekkä	D	500–1000	845,6	2500	Likimain pyöreä
Lasikuulat	B	400–600	509,4	2517	Pyöreä
Kalkkikivi	B	150–350	239	2770	Likimain pyöreä

4.3 Mittausjärjestelyt

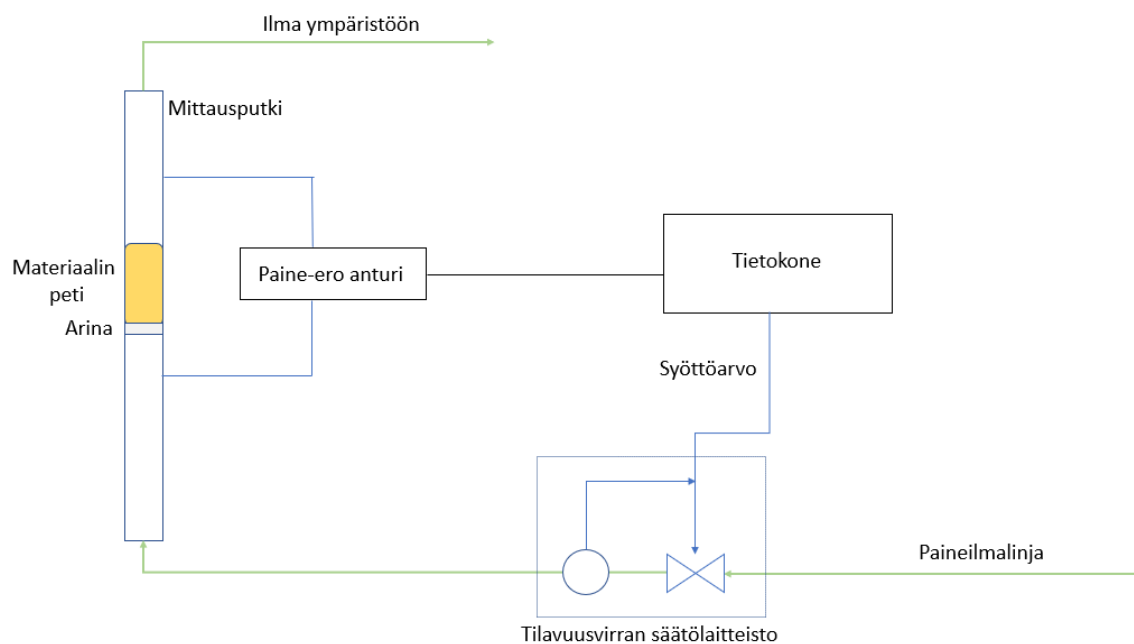
Minimileijutusnopeuden määrittäminen tehtiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston energiatekniikan osaston laboratoriotiloissa. Mittaukset toteutettiin sitä varten modifioidulla laitteistolla, joka mittaa paine-eron mitattavan materiaalikerroksen yli käyttäjän asettamalla tilavuusvirran arvolla. Saatava data kerätään tietokoneen LabView-ohjelmistolla.

Kuvassa 7 esitetään koejärjestelyt paine-eronmittauksen osalta. Mittauksissa käytettävän virtausputken halkaisija on 25 mm. Keskellä putkea on leijutettavan materiaan peti ja sen ylä- sekä alapuolelta löytyy siniset paineen mittausputket. Ylempi putki teipataan päältä, jotta saadaan staattisen paineen mittaukset pedin molemmille puolille. Kiintopeti saadaan pysymään paikallaan putkessa olevalla huokoisella ritilällä, joka päästää kaasuvirtauksen lävitseen, mutta ei petimateriaalia.



Kuva 7. Paine-eromittauksen järjestelyt mitattavan pedin yli.

Kuvan 8 kaaviossa on nähtävissä mittausten periaatteellinen toteutus. Laitteistoon johdetaan paineistettua ilmaa paineilmaverkosta kontrolliventtiilin kautta. Venttiilin säätö tapahtuu LabView -ohjelmistolla käyttämällä tilavuusvirtaa syöttöarvona. Ohjelmisto laskee putken halkaisijan ja tilavuusvirran avulla vastaavan kaasun virtausnopeuden tyhjässä putkessa. Ilma kulkeutuu virtausputkessa petimateriaalin läpi putken yläosan kautta ympäristöön.



Kuva 8. Mittausjärjestelyiden periaatteellinen toteutus.

4.4 Mittausten toteutus

Mittaukset aloitettiin tekemällä painehäviömittaus ilman petimateriaalia. Näin saatiin määritettyä tyhjän putken painehäviö virtausnopeuden funktiona. Tämä on välttämätön suorittaa, jotta voidaan määrittää pelkän pedin aiheuttama painehäviö leijutustilanteessa. Tyhjän putken mittaus suoritettiin askelittain $0,05 \text{ dm}^3/\text{s}$ nousuilla tilavuusvirran arvoon $0,4 \text{ dm}^3/\text{s}$ asti. Kahdeksan mittauspisteen avulla määritettiin tyhjän putken painehäviövirtausnopeus kuvaaja.

Kaikkien tässä työssä määritettävien materiaalien minimileijutusnopeuden mittaukset toteutettiin samalla tavalla. Ensin määritettiin petimateriaalin massa, ja asetettiin noin 4–6 cm:n korkuinen peti mitattavaa materiaalia virtausputken arinan päälle. Tilavuusvirtaa

kasvatettiin sopivilla materiaalikohtaisilla askelilla samalla petiä havainnoiden. Kun leijutustila saavutettiin visuaalisesti, mitattiin pedin korkeus ja määritettiin paine-ero pedin yli sekä minimileijutusnopeus. Nämä visuaalisiin havaintoihin perustuvat tulokset löytyvät liitteenä 1 olevasta mittauspöytäkirjasta. Leijutusnopeutta kasvatettiin muutaman askeleen yli visuaalisesti havaittavan leijutustilan, jotta voitiin varmistua materiaalin olevan täydellisesti leijutustilassa. Tämän jälkeen virtausnopeus laskettiin takaisin alkutilaan samankokoisilla tai harvemmillä askelilla kuin virtausnopeuden kasvaessa. Visuaalisiin havaintoihin perustuvien mittaustulosten epätarkkuuden takia tarkempi määrittäminen minimileijutusnopeudelle tehdään mittaustulosta saatavan painehäviövirtausnopeuskuvaajan perusteella kohdassa 4.1 esitettyjen periaatteiden mukaisesti.

Ennen mittauksia täytyi jokaiselle materiaalille määrittää sopivat tilavuusvirran nostoaskeleet. Jotta osatiin valita sopivat askeleet, jokaiselle materiaalille on tehtävä arvio minimileijutusnopeudesta kirjallisuuden korrelaatioiden mukaisesti. Sopivien askelien määrittäminen on tärkeää, sillä liian suurilla askelilla minimileijutusnopeutta ei voida määrittää tarkasti. Taas liian pienillä askelilla mittaus kestäisi kohtuuttoman pitkään.

Taulukossa 7 esitetään eri koemateriaaleille käytetyt tilavuusvirran nousuaskeleet. Askeleet määritetään niin, että nousuaskeleita olisi vähintään 10 ennen arvioitua minimileijutusnopeutta.

Taulukko 7. Materiaalien arvioidut minimileijutusnopeudet sekä tilavuusvirrat ja mittauksissa käytetyt askeleet.

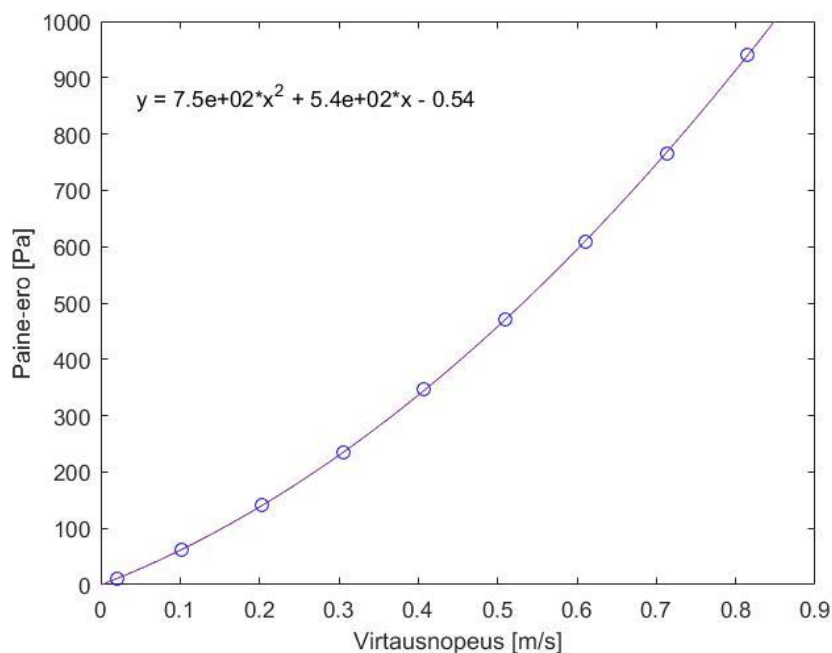
	Kvartsihiekkä	Lasikuulat	Kalkkikivi
Arvioitu minimileijutusnopeus [m/s]	0,589	0,197	0,113
Minimileijutusnopeutta vastaava tilavuusvirta [dm ³ /s]	0,289	0,097	0,055
Tilavuusvirran askel [dm ³ /s]	0,025	0,006	0,005

5 MITTAUSTULOKSET

Tässä kappaleessa esitetään ja tulkitaan mittausdatan perusteella tehtyjä painehäviövirtausnopeuskuvaajia. Minimileijutusnopeus määritetään kuvaajista kappaleen 4.1 periaatteiden mukaisesti. Mittausdatan käsittelyssä käytettiin Matlab -ohjelmistoa.

5.1 Tyhjän putken mittaus

Kuvassa 9 esitetään tyhjän putken mittausdatan perusteella määritetty kuvaaja. Paine-ero käyttäytyy parabolisesti virtausnopeuden suhteen tyhjässä putkessa kuvassa nähtävän sovituksen mukaisesti.

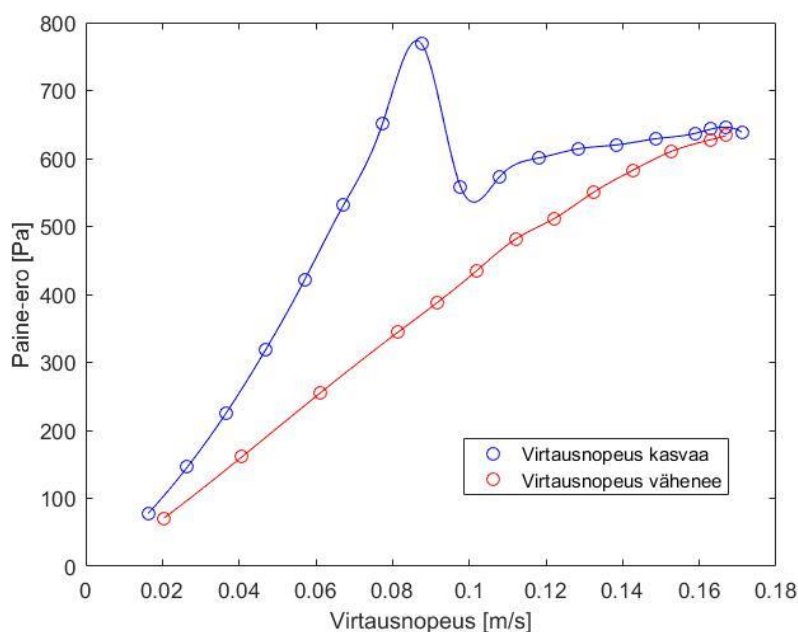


Kuva 9. Tyhjän putken mittauksen paine-ero-virtausnopeuskuvaaja.

5.2 Kalkkikiven mittaus

Kalkkikiven leijutuskäyttäytyminen on nähtävissä kuvassa 10. Paine-ero nousee virtausnopeuden funktiona likimäärin lineaarisesti virtausnopeuden arvoon 0,08 m/s asti. Kuvan 5 mukaisesti peti on tällöin vielä kiintotilassa. Paine-erossa havaitaan äkillinen tippuminen virtausnopeuden arvon 0,08 m/s jälkeen, joka voidaan tulkita petimateriaalin hiukkasten uudelleenjärjestymisenä. Kuvan 5 perusteella minimileijutusnopeus pitäisi määrittää tässä kohdassa paine-eron saavuttaessa suurimman arvonsa. Kuitenkin,

visuaalisiin havaintoihin perustuen, paine-eron äkillinen tippuminen havaitaan pedin nytkähdyksenä, jonka seurauksena kaasun tilavuusosuus pedissä kasvaa huomattavasti. Pedin hiukkaset ovat siis järjestyneet uudelleen, eikä voida vielä puhua minimileijutusstilasta. Tämän jälkeen virtaus pääsee helpommin kulkeutumaan materiaalikerroksen läpi, jonka seurauksena paine-ero kasvaa loivemmin suuremmilla kuin 0,1 m/s virtausnopeuden arvoilla. Virtausnopeuden kasvaessa arvoon 0,16 m/s paine-eron kasvu pysähtyy. Tällöin kalkkikivi leijuu täydellisesti, ja minimileijutusnopeuden arvoksi määritetään 0,16 m/s.

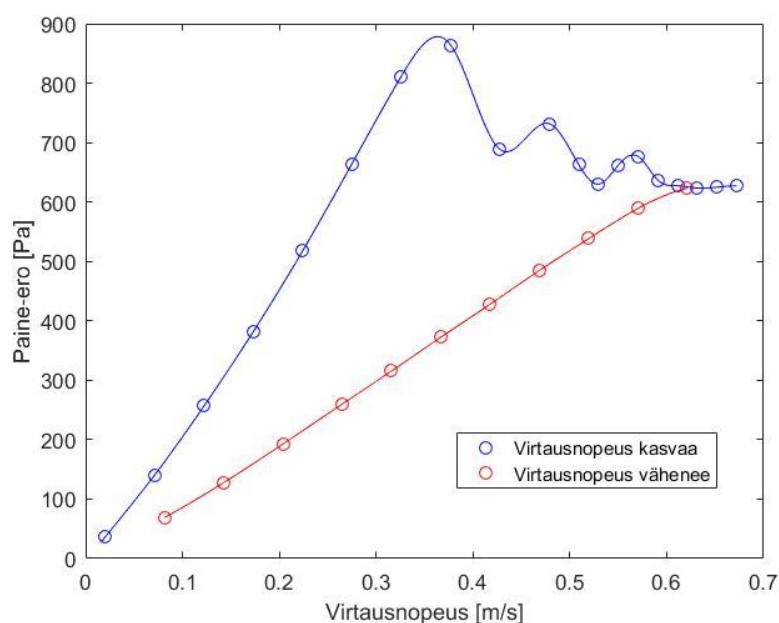


Kuva 10. Kalkkikiven mittauksen paine-ero-virtausnopeuskuvaaja.

Kun visuaalisesti täydellinen leijutus tila saavutetaan, virtausnopeutta aletaan laskea askeleittain. Kuvasta 10 havaitaan, että laskeva punainen käyrä on likimain lineaarinen 0,16 m/s pienemmillä virtausnopeuksilla. Tämä tukee havaintoja minimileijutusnopeuden arvosta, sillä laskettaessa nopeutta alle 0,16 m/s paine-eron käyttäytyminen virtausnopeuden funktiona on tyypillistä kiintopedille. On kuitenkin huomattavaa, että kiintopedin paine-erokäyrät virtausnopeuden noustessa (sininen) ja vähentyessä (punainen) eivät noudata kuvan 5 mukaista käyttäytymistä, jossa molemmilla on sama kulmakerroin. Tämä on selitettävissä petien hiukkasten erilaisella järjestymisellä ennen ja jälkeen leijutus tilanteen.

5.3 Kvartsihiekan mittaus

Kvartsihiekan käyttäytymistä leijutustilanteessa voidaan tulkita kuvasta 11. Paine-ero pedin yli nousee lineaarisesti virtausnopeuden arvoon noin 0,35 m/s, jonka jälkeen havaitaan virtausnopeuden kasvaessa kolme paine-eron äkillistä laskua. Nämä nähdään visuaalisesti useampana pedin hiukkasten uudelleenjärjestymisenä (vrt. kalkkikivi). Paine-eron vaihtelu tasaantuu selvästi 0,6 m/s suuremmilla virtausnopeuksilla. Tällöin voidaan todeta pedin saavuttaneen minimileijutusosan. Tämän perusteella käytetyn kvartsihiekan minimileijutusnopeus on 0,6 m/s.

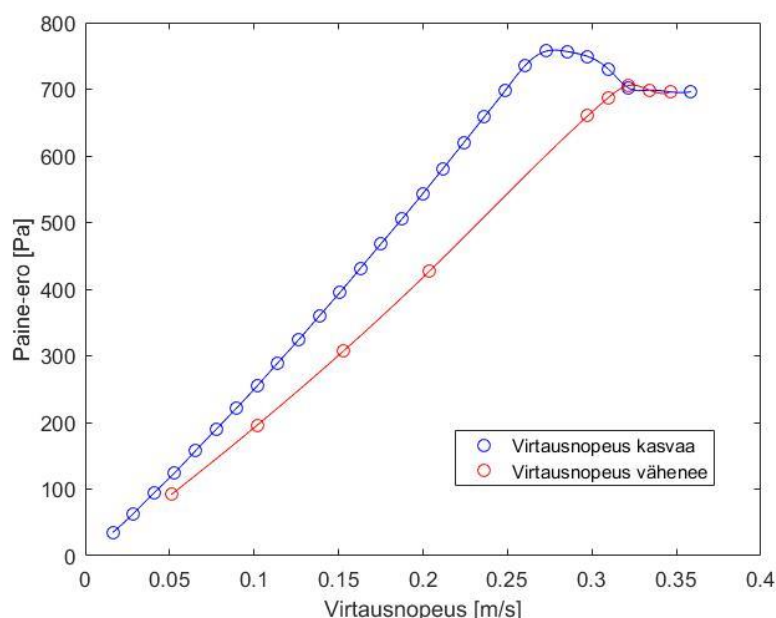


Kuva 11. Kvartsihiekan mittauksen paine-ero-virtausnopeuskuvaaja.

Määritettyä arvoa tukee paine-eron käyttäytyminen virtausnopeuden laskiessa alle 0,6 m/s. Virtausnopeutta laskettaessa paine-eron käyttäytyminen on samanlaista kuin kalkkikiven mittauksessa: paine-ero laskee lineaarisesti virtausnopeuden laskiessa ja käyrän kulmakerroin eroaa huomattavasti nousevan käyrän kulmakertoimesta. Tässäkään määrittämisessä ei voida täysin luottaa kuvan 5 teoriaan määrittää minimileijutusnopeus paine-eron maksimi arvon kohdalla. Määrittäystä tukee paremmin paine-eron lineaarisuus virtausnopeuden vähentyessä.

5.4 Lasikuulien mittaus

Lasikuulien leijutusteknisiä ominaisuuksia voidaan määrittää kuvasta 12. Lasikuulien paine-ero-virtausnopeuskuvaaja muistuttaa pääpiirteittäin kuvan 5 leijutuskuvan tilannetta. Paine-ero kasvaa lineaarisesti virtausnopeuden arvoon 0,25 m/s asti. Tämän jälkeen kiintopeti siirtyy leijutustilaan askeleittain, saavuttaen sen täydellisesti paine-eron tasautuessa. Minimileijutusnopeus määräytyy paine-eron tasaantumisen kohdasta, ollen täten 0,32 m/s.



Kuva 12. Lasikuulien mittauksen paine-ero-virtausnopeuskuvaaja.

Kuvan 5 perusteella minimileijutusnopeus voitaisiin määrittää maksimipaine-eron kohdassa, jolloin se olisi noin 0,27 m/s. Tämä arvo ei kuitenkaan tue paine-eron käyttäytymistä virtausnopeuden laskiessa. Kuvan 12 punainen käyrä käyttäytyy kiintopedille ominaisesti eli lineaarisesti jo alle 0,32 m/s virtausnopeuksilla. Vaikkakin lasikuulien paine-ero-virtausnopeuskuvaaja muistuttaakin eniten kuvan 5 leijutuskuvaa, ei kasvavan ja vähenevän lineaaristen käyrien kulmakerroin ole sama. Myös lasikuulien voidaan todeta pakkautuneen hieman harvemmin leijutuksen jälkeen verrattuna mittausten aloitukseen.

5.5 Huomioita mittaustulosten tulkinnoista

Kappaleissa 5.2, 5.3 ja 5.4 esitetyistä kuvista on nähtävissä minimileijutusnopeuden määrittämisen ongelmallisuutta. Kuvaajat eivät ole täysin samanlaisia verrattuna kirjallisuudessa esitettyihin leijutuskuviin (kuva 5 ja 6), joista minimileijutusnopeuden määrittäminen voitaisiin tehdä paine-eron maksimipisteen perusteella. On syytä huomata, että kuvat 5 ja 6 esittävät enemmänkin ilmiötä yleisesti ideaalisten leijutuskäyttäytymisten kautta. (Kunii & Levenspiel 1991, 71 –72.) Kuten edellä määritellyistä mittauskuvista huomataan, todelliset leijutusolot saattavat erota huomattavastikin ideaalitapauksesta.

Mittaustulosten tulkinnat tehtiin visuaalisten havaintojen ja ideaalisen leijutuskuvien perusteella. Tärkeintä oli löytää yksi yhtenäinen periaate minimileijutusnopeuden määrittämiseen. Kaikkien materiaalien minimileijutusnopeus määritettiin siis pisteessä, jossa leijuva peti siirtyy takaisin kiintopediksi – ei välttämättä pisteessä, jossa havaitaan ensimmäisen kerran materiaalikerroksen leijumista tai liikettä. Kaasun virtausnopeutta kasvatettiin niin kauan, että visuaalisesti pystyttiin varmasti toteamaan materiaalien olevan leijutusolossa.

6 KORRELAATIOIDEN VERTAILU MITTAUSTULOKSIIN

Tässä kappaleessa esitetään korrelaatiolla lasketut minimileijutusnopeudet, ja vertaillaan niitä kappaleessa 5 määritettyihin minimileijutusnopeuksiin. Korrelaatioita varten täytyy ensin määrittää ilman tiheys ja dynaaminen viskositeetti mittaushetken lämpötilassa ja paineessa. Näiden ja materiaalien Arkhimedeeseen lukujen avulla saadaan ratkaistua korrelaatioilla minimileijutusnopeudet kullekin materiaalille. Arkhimedeeseen luvut määritetään taulukon 6 materiaalien ominaisuuksien perusteella. Korrelaatioiden tulokset ja vertailut mittaustuloksiin esitetään taulukoituna.

Ilman tiheys ja dynaaminen viskositeetti saadaan interpoloimalla taulukkoarvoista olettamalla ympäristön paineeksi 1 atm. Näin ollen ilman tiheys on mittaustilan lämpötilassa 17,8 C° (liite 1) on 1,204 kg/m³ ja dynaaminen viskositeetti 1,801·10⁻⁵ Ns/m² (Incropera et al. 2017, 925.)

Arkhimedeeseen luku (Ar) lasketaan määritelmänsä mukaisesti yhtälöllä (9). Edellä määritetyillä ilman arvoilla sekä taulukon 6 materiaalien ominaisuuksilla saadaan määritettyä materiaalien Arkhimedeeseen luvut. Tulokset esitetään taulukossa 8.

Taulukko 8. Materiaalien Arkhimedeeseen luvut.

Materiaali	Ar
Kvartsihiekkä	55032
Lasikuulat	12113
Kalkkikivi	1377

6.1 Korrelaatiot muotoa Wen & Yu

Wen & Yu muotoa olevista korrelaatioista minimileijutusnopeus ratkaistaan sijoittamalla yhtälöön (11) materiaalin Arkhimedeeseen luku ja keskimääräisen hiukkaskoko sekä virtaavan ilman tiheys ja dynaamisen viskositeetti. Taulukkoon 9 on koottu kaikkien taulukossa 1 esitettyjen korrelaatioiden mukaisesti lasketut minimileijutusnopeudet sekä niiden erot mittauksissa määritettyihin tuloksiin.

Taulukko 9. Muotoa Wen & Yu olevien korrelaatioiden mukaisesti lasketut minimileijutusnopeudet. Jokaisen korrelaation suhteellinen virhe mittauksissa saatuihin tuloksiin ilmoitetaan korrelaatiolla lasketun minimileijutusnopeuden alla.

Korrelaatio	Minimileijutusnopeus [m/s]		
	Kvartsihiekkä	Lasikuulat	Kalkkikivi
Mittaukset	0,6	0,32	0,16
Wen & Yu	0,43	0,20	0,05
	-28 %	-67 %	-68 %
Saxena & Vogel	0,64	0,33	0,09
	7 %	3 %	-41 %
Richardson	0,46	0,22	0,06
	-23 %	-31 %	-62 %
Grace	0,49	0,23	0,06
	-19 %	-27 %	-60 %
Bady et al.	0,7	0,37	0,11
	17 %	15 %	-33 %
Chyang & Huang	0,37	0,16	0,04
	-39 %	-49 %	-74 %
Hillal et al.	0,48	0,27	0,08
	-20 %	-17 %	-48 %
Hartman et al.	0,38	0,19	0,05
	-37 %	-41 %	-67 %
Tannous & Lourenco 1	0,51	0,24	0,06
	-15 %	-25 %	-60 %

Taulukosta 9 nähdään, että lähes kaikki korrelaatiot antavat mittaustuloksia pienempiä minimileijutusnopeuksia. Vain Saxena & Vogel (1977) sekä Babu et al. (1987) julkaisemilla korrelaatioilla laskettu minimileijutusnopeus on suurempi kuin mittauksissa määritetty, ja tämäkin vain kvartsihiekan ja lasikuulien tapauksissa. Lisäksi huomataan, että suhteellinen virhe kasvaa monella korrelaatiolla hiukkaskoon pienentyessä: esimerkiksi Chyang & Huang (1988) julkaisemalla korrelaatiolla suhteellinen virhe kalkkikivelle on jopa 74 %, mutta vain 39 % kvartsihiekkälle. Tämä mukaan muotoa Wen & Yu olevilla korrelaatiolla ei voida antaa päteviä arvioita kalkkikiven ja lasikuulien minimileijutusnopeuksista. Ne näyttäisivät paremmin sopivan arvioimaan minimileijutusnopeuksia kvartsihiekan kaltaisille D-luokan materiaaleille, joiden keskimääräinen hiukkaskoko on yli 800 µm. Parhaiten mittaustuloksia vastaa Saxena & Vogel (1977) julkaisema korrelaatio, jonka virhe kvartsihiekan mittaukseen verrattuna on 7 % ja lasikuulien mittaukseen 3 %.

6.2 Yhtälöiden (12), (13) ja (14) muotoiset korrelaatiot

Kappaleessa 3.4 esitetyille korrelaatioille minimileijutusnopeus lasketaan yhtälöiden (12), (13) ja (14) mukaisesti. Kaikkien yhtälön (12) muodossa olevien korrelaatioiden avulla lasketut minimileijutusnopeudet ovat nähtävissä taulukossa 10.

Taulukko 10. Yhtälön (12) muodossa olevien korrelaatioiden mukaisesti lasketut minimileijutusnopeudet. Jokaisen korrelaation suhteellinen virhe mittauksissa saatuihin tuloksiin ilmoitetaan korrelaatiolla lasketun minimileijutusnopeuden alla.

Korrelaatio	Minimileijutusnopeus [m/s]		
	Kvartsihiekkä	Lasikuulat	Kalkkikivi
Mittaukset	0,6	0,32	0,16
Kumar & Sen Gupta	0,48	0,24	0,09
	-21 %	-24 %	-41 %
Barbosa et al.	0,45	0,20	0,06
	-25 %		-60 %
Rabinovich & Kalman D	0,39	-	-
	-36 %		
Rabinovich & Kalman B	-	0,15	0,05
		-53 %	-71 %
Seo et al.	0,56	0,20	0,05
	-7 %	-36 %	-69 %
Tannous & Lourenco 2	1,48	0,72	0,27
	147 %	126 %	66 %

Taulukossa 10 esitettyjen korrelaatioiden mukaisesti lasketut minimileijutusnopeudet eroavat huomattavasti mittaustuloksista. Tannos & Lourenco (2015) julkaiseman korrelaation minimileijutusnopeudet ovat selvästi suurempia mittaustuloksiin verrattuna, mutta, toisin kuin muilla korrelaatiolla, suhteellinen virhe laskee hiukkaskoon pienentyessä (vrt. kvartsihiekkä – kalkkikivi). Virhe on kuitenkin 66 % kalkkikivelle, joten minimileijutusnopeuden luotettava arviointi mitattaville materiaaleille on vaikeaa tällä korrelaatiolla.

Muut tämän ryhmän korrelaatiot antavat mittaustuloksia pienempiä arvoja. Ja kuten Wen & Yu tyyppisille korrelaatioille, myös taulukossa 10 esitettyjen korrelaatioiden minimileijutusnopeudet (pl. Tannos & Lourenco) eroavat suhteessa enemmän kalkkikivelle kuin kvartsihiekkälle. Tämän takia yhtälön (12) muotoisilla korrelaatioilla minimileijutusnopeuden luotettava arviointi pienen hiukkaskoon ja/tai tiheyden omaaville materiaaleille on hankalaa. Mittaustulosten perusteella nämäkin korrelaatiot

pätevät parhaiten D-luokan materiaaleille. Tosin parhaitenkin mittaustuloksiin pätevän korrelaation Seo et al. (2014) suhteellinen virhe 7 %.

Yhtälön (13) muodossa olevien korrelaatioiden mukaisesti lasketut minimileijutusnopeudet on koottu taulukkoon 11.

Taulukko 11. Yhtälön (13) muodossa olevien korrelaatioiden mukaisesti lasketut minimileijutusnopeudet. Jokaisen korrelaation suhteellinen virhe mittauksissa saatuihin tuloksiin ilmoitetaan korrelaatiolla lasketun minimileijutusnopeuden alla.

Korrelaatio	Minimileijutusnopeus [m/s]		
	Kvartsihieikka	Lasikuulat	Kalkkikivi
Mittaukset	0,60	0,32	0,16
Todes et al.	0,37	0,18	0,05
	-38 %	-44 %	-66 %
Davtyan et al.	0,45	0,23	0,07
	-26 %	-29 %	-56 %
Fletcher et al.	0,40	0,23	0,08
	-33 %	-29 %	-49 %

Kuten aikaisemmin määritetyillä korrelaatiolla myös taulukossa 11 esitetyillä on suhteellista virhettä enemmän kalkkikivellä kuin kvartsihiekillä. Kaikkien kolmen korrelaation arvioit minimileijutusnopeudesta ovat kuitenkin merkittävästi pienempiä kuin mittaustuloksissa määritetyt. Mittaustulosten perusteella mitään taulukossa 11 mainituista korrelaatiosta ei voida käyttää luotettavasti mittausmateriaalien minimileijutusnopeuden arvioimiseksi.

Yhtälön (14) muotoisten korrelaatioiden ratkaisemiseksi määritetään vakio R , joka riippuu hiukkaskoosta, normaaliputoamiskiihtyvyydestä ($9,81 \text{ m/s}^2$) ja ilman tiheydestä sekä dynaamisesta viskositeetistä. Yhtälön (14) mukaisesti lasketut minimileijutusnopeudet sekä niiden vertailut mittaustuloksiin esitetään taulukossa 12.

Taulukko 12. Yhtälön (14) muodossa olevien korrelaatioiden mukaisesti lasketut minimileijutusnopeudet. Jokaisen korrelaation suhteellinen virhe mittauksissa saatuihin tuloksiin ilmoitetaan korrelaatiolla lasketun minimileijutusnopeuden alla.

Korrelaatio	Minimileijutusnopeus [m/s]		
	Kvartsihieikka	Lasikuulat	Kalkkikivi
Mittaukset	0,60	0,32	0,16
Coltters & Rivas (hiekalle)	0,88 46 %	-	-
Coltters & Rivas (lasille)	-	0,35 9 %	-
Oliveira et al.	0,35 -42 %	0,21 -33 %	0,11 -29 %
Shao et al.	0,42 -30 %	0,29 -8 %	0,19 16 %

Taulukosta 12 nähdään, että eroa korrelaatiolla ja mittaustuloksilla on yhtälön (14) muotoisilla korrelaatioillakin huomattavasti. Vain Coltters & Rivas (2004) sekä Shao et al. (2013) julkaisemilla korrelaatioilla päästään lasikuulien tapauksessa alle 10 % suhteelliseen virheeseen. Erona aikaisemmin esitettyihin korrelaatioiden tuloksiin huomataan, että Oliveira et al. (2013) ja Shao et al. (2013) julkaisemat korrelaatiot antavan suhteellisesti tarkempia tuloksia kalkkikivelle kuin kvartsihiekalle. Mittaustulosten perusteella nämä kaksi korrelaatiota sopivatkin paremmin B-luokan materiaaleille, joiden hiukkaskoko on pienempi kuin 500 µm.

6.3 Muotokertoimen ja kaasun tilavuusosuuden arvoja vaativat korrelaatiot

Yhtälön (15) muotoisen korrelaation ratkaisemiseksi täytyy määrittää materiaaleille muotokerroin ja kaasun tilavuusosuus minimileijutusstilassa. Muotokerroin on vaikein parametri määrittää suoraan materiaalista, joten se määritetään kaasun tilavuusosuuden kautta yhtälön (2) mukaisesti. Kaasun tilavuusosuus minimileijutusstilassa lasketaan yhtälön (4) mukaisesti pedin massan ja tilavuuden sekä materiaalin tiheyden arvoista. Taulukkoon 13 on koottu liitteestä 1 petien massat ja niiden korkeudet sekä ennen leijutusta että minimileijutusstilassa.

Taulukko 13. Mittausmateriaalien petien massat ja korkeudet alku- ja minimileijutusstilassa.

Materiaali	Pedin massa [g]	Pedin alkukorkeus ennen leijutusta [cm]	Pedin korkeus minimileijutusstilassa [cm]
Kalkkikivi	41,01	4,7	6,7
Lasikuulat	44,58	5,3	5,5
Kvartsihieikka	42,44	5,2	6,5

Yhtälön (4) mukaisesti taulukon 13 ja 6 tietojen sekä mittausputken sisähalkaisijan (0,0025 m) avulla voidaan määrittää materiaalien petien kaasun tilavuusosuudet. Kalkkikiven, lasikuulien ja kvartsihiekan lasketut kaasun tilavuusosuudet sekä alkutilassa että minimileijutustilassa on koottu taulukkoon 14.

Taulukko 14. Materiaalien petien kaasun tilavuusosuudet alku- ja minimileijutustilassa.

Materiaali	Kaasun tilavuusosuus alkutilassa ϵ	Kaasun tilavuusosuus minimileijutusolosuhteissa ϵ_{mf}
Kalkkikivi	0,36	0,55
Lasikuulat	0,32	0,34
Kvartsihiekkä	0,34	0,47

Lasikuulien oletetaan olevan lähes täydellisen pallon muotoisia, joten niiden muotokertoimen laskuissa käytetään arvoa 1. Kvartsihiekan ja kalkkikiven muotokerroin määritetään yhtälön (2) mukaisesti taulukon 14 kaasun tilavuusosuuksien arvoista. Näin tehden saadaan kvartsihiekan muotokertoimeksi noin 0,71 ja kalkkikiven noin 0,52. Koska arvot eroavat toisistaan paljon, on syytä tarkistaa kirjallisuudesta löytyvistä julkaisuista kyseisten materiaalien muotokertoimien arvot. Kirjallisuudessa kvartsihiekan arvoksi on määritetty 0,78–0,8 (Kalđerović Radoičić et al. 2014, 66) ja kalkkikiven 0,85–0,92 (Cepuritis et al. 2017, 415–416). Mittausten perusteella määritetyt arvot ovat siis pienempiä kuin kirjallisuudessa määritetyt. Tämän takia laskuissa käytetään korjattuja arvoja (kvartsihiekkälle 0,78 ja kalkkikivelle 0,9).

Puspasari et al. (2013) julkaisemien yhtälön (15) muodossa olevien korrelaatioiden perusteella määritetyt minimileijutusnopeudet esitetään taulukossa 15 yllä määritetyillä mittausmateriaalien muotokertoimilla ja tilavuusosuuksilla arvoilla.

Taulukko 15. Puspasari et al. (2013) julkaisun korrelaatioilla lasketut minimileijutusnopeudet sekä niiden vertailu mittaustuloksiin. Ensimmäisessä sarakkeessa on jokaiselle materiaalille lasketut ehdot, joiden perusteella korrelaation parametrit määräytyvät.

Materiaali	Ehto	Minimileijutusnopeus [m/s]	Mittaustulokset [m/s] /Ero mittaustuloksiin
Kvartsihiekkä	17,2	0,38	0,6/- 36 %
Lasikuulat	16,5	0,27	0,32/- 15 %
Kalkkikivi	13,9	0,17	0,16/6 %

Taulukon 15 perusteella Puspasari et al. (2013) julkaisema korrelaatio antaa kvartsihiekalle selvästi ja lasikuulille hieman pienemmän minimileijutusnopeuden mittauksiin verrattuna. Taas kalkkikivelle korrelaatiolla laskettu arvo on vain 0,01 m/s suurempi. Kvartsihiekalla ja lasikuulille erot mittaustuloksiin ovat kuta kuinkin samaa luokkaa kuin muillakin tässä työssä esitetyillä korrelaatioilla. Kalkkikivelle Puspasari et al. (2013) julkaisema korrelaatio näyttäisi sopivan parhaiten kaikista tässä työssä käsitellyistä korrelaatioista.

6.4 Johtopäätöksiä korrelaatioiden ja mittaustulosten vertailusta

Yleisesti ottaen tässä työssä esitetyt korrelaatiot antavat mittaustuloksia huomattavasti pienempiä minimileijutusnopeuksia muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Vain muutamilla korrelaatiolla laskettu minimileijutusnopeus on lähellä mittaustuloksia, ja suurimman osan arvioit eroavat hyvin paljon mittaustuloksista. Onkin hyvä pohtia syitä tähän.

Mittauksissa saattaa olla tapahtunut systemaattinen virhe, jonka seurauksena mittaustulokset olisivat jokaiselle materiaalille todellisuutta suurempia. Esimerkiksi mittauslaitteiston (kuva 7) paine-eron mittauksen ja tilavuusvirran säädön välissä olevassa mittausputken ja paineilmalinjan kytkentä on saattanut vuotaa, ja täten aiheuttaa virhettä mittaustuloksiin. Toisaalta myös minimileijutusnopeuden määrittäminen ei välttämättä ole yksiselitteinen, kuten mittauskuvajista (kuvat 9, 10 ja 11) nähdään: leijutustilanne on yksilöllinen jokaiselle materiaalille.

Kirjallisuudessa esitetyt korrelaatiot perustuvat yksilöllisiin empiirisiin mittauksiin tai useiden mittausten perusteella tehtyihin malleihin. Korrelaatiot sekä tässä työssä määritetyt mittaustulokset ovat voimakkaasti mittausolosuhteista ja mitattavien materiaalien ominaisuuksista riippuvaisia. Osittain näiden syiden takia onkin vaikea määrittää yleispätevää korrelaatiota, joka antaisi kaikille materiaaleille kaikissa olosuhteissa hyviä arvioita minimileijutusnopeudesta. (Anantharamanin et al. 2017.) Myös tässä työssä esitetyt tulokset ja vertailut tukevat tätä yleistä käsitystä minimileijutusnopeuden määrittämisen ongelmallisuudesta. On vaikea todeta, mikä tässä työssä esitetyistä korrelaatioista antaa tarkimman arvion minimileijutusnopeudesta, sillä mikään korrelaatio ei anna luotettavaa tulosta kaikille mittausmateriaaleille.

7 YHTEENVETO

Tässä työssä arvioitiin kirjallisuudesta löytyvien minimileijutusnopeuden korrelaatioiden paikkansapitävyyttä vertailemalla niitä tämän työn puitteissa tehtyjen mittausten tuloksiin. Leijutusta tarkasteltiin yleisestä näkökulmasta keskittyen minimileijutusnopeuden määrittämiseen teoriaan sekä materiaalien ominaisuuksiin. Kirjallisuudesta valittiin 23 mittaustulosta soveltuvaa korrelaatioita laajalta julkaisuaikaväliltä. Minimileijutusnopeuden määrittäminen suoritettiin sekä kokeellisesti että korrelaatioiden perusteella kalkkikivelle, lasikuulille ja kvartsihiekkalle.

Vertailuista kävi ilmi, että korrelaatioiden ja mittaustulosten arvot erosivat toisistaan huomattavasti. Vain muutamilla korrelaatioilla päästiin alle 10 % suhteelliseen virheeseen. Yleisesti ottaen korrelaatioiden suhteellinen virhe kasvoi materiaalin hiukkaskoon pienentyessä. Huomattavaa on myös, että korrelaatiot antoivat lähes kaikille materiaaleille mittaustuloksia pienempiä minimileijutusnopeuksia. Myöskään mikään yksittäinen korrelaatio ei pystynyt antamaan luotettavaan arvioita minimileijutusnopeudesta kaikille mitattaville materiaaleille. Näistä syistä johtuen tämän työn puitteissa ei voida osoittaa, minkä muotoiset korrelaatiot antaisivat pienimmän virheen laajalle joukolle eri hiukkaskoon omaavia materiaaleja.

Yleisesti ottaen minimileijutusnopeuden arvo on herkkä muutoksille, sillä se riippuu voimakkaasti mittaolosuhteista, käytetystä laitteistosta ja materiaalin ominaisuuksista. Pienikin muutos jossain näissä asioissa voi vaikuttaa huomattavasti määritettävään arvoon. Ei voida varmasti todeta vaikuttaako tämän työn mittauksissa käytetty laitteisto tai mittaolosuhteet virheellisesti saatuihin tuloksiin. Tämän työn mukaan tehtyjen havaintojen pohjalta suositellaan tekemään minimileijutusnopeuden määrittäminen useaan kertaan yksittäisten mittausten epävarmuuden pienentämiseksi. Lisäksi määrittäminen olisi suotavaa tehdä useammalla eri laitteistolla, jotta käytettävän mittaustulosten luotettavuus voitaisiin todentaa.

LÄHDELUETTELO

Anantharaman Aditya, Cocco Ray A., Chew Jia Wei. 2017. Evaluation of correlations for minimum fluidization velocity (U_{mf}) in gas-solid fluidization. *Powder Technology* 323 (2018) 454–485. [verkkodokumentti][viitattu 29.3.2018] Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.10.016>

Cepuritis Rolands, Garboczi Edward J., Jacobsen Stefan. 2016. Three dimensional shape analysis of concrete aggregate fines produced by VSI crushing. *Powder Technology* 308 (2017) 410–421. [verkkodokumentti][viitattu 21.10.2018] Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.020>

Geldart D. 1986. *Gas fluidization technology*. University of Bradford, UK. ISBN 0 471 90806 1.

Incropera Frank, Dewitt David, Bergman Theodore, Lavine Adrienne. 2017. *Incropera's Principles of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. ISBN: 978-1-119-38291-1.

Kaluđerović Radoičić Tatjana, Đuriš Mihal, Garić-Grulović Radmila, Arsenijević Zorana, Grbavčić Željko. 2013. Particle characterization of polydisperse quartz filtration sand. *Powder Technology* 254 (2014) 63–71. [verkkodokumentti][viitattu 21.10.2018] Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.003>

Kunii Daizo & Levenspiel Octave. 1991. *Fluidization engineering*. Toinen painos. ISBN 0-409-90233-0.

Lanfrey P.-Y, Kuzeljevic Z, Dudukovic M. 2009. Tortuosity model for fixed beds randomly packed with identical particles. *Chemical Engineering Science* 65 (2010) 1891–1896. [verkkodokumentti][viitattu 26.3.2018] Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.11.011>

McGlinchey Don. 2005. Characterisation of Bulk Solids. Centre for Industrial Bulk Solids Handling Glasgow Caledonian University, UK. ISBN-13 978-14051-1624-4.
Viitattu: 25.3.2018

Raiko Risto, Hyppänen Timo. 2002. Leijupoltto. Poltto ja palaminen. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. ISBN 951-666-604-3.

LIITE 1.

MITTAUSPÖYTÄKIRJA

Minimileijutusnopeuden määrittäminen

Mittaaja: TUOMO NUMMELA

Mittauksen ohjaaja: MARKKU NIKKU

Mittausajankohta (pvm, klo): 23.2.2018 8.00

Petimateriaali	Pedin alkukorkeus	Pedin massa	Pedin korkeus minimileijutus-tilassa	Paine-ero minimileijutus-tilassa, virtausnopeus kasvaa	Paine-ero minimileijutus-tilassa, virtausnopeus pienenee	Minimileijutusnopeus
	H_0 [cm]	m_{peti} [g]	H_{lay} [cm]	Δp_1 [pa]	Δp_2 [pa]	v_{mf} [cm/s]
Kalkkikivi 150-300 μm	5,7 4,7	44,146 41,01	6,7	750	735	216
Lasikuulat 400-600 μm	5,3	44,58	5,5	940	925	33
Kvartsihiekkä 500-1000 μm	5,2	42,44	6,5	1140 1265	1250	63

Mittaustilan lämpötila: 17,8 °C

Mittaustilan paine:

Mittauslaitteiston tunnistetiedot:

Laboren ohjelmaeto, rosenlund paine-ero anturi