Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Kaksifaasivirtauskoelaitteisto HIPE:n virtausaluekartat

Regime Maps for HIPE Two-Phase Flow Test Facility

Työn tarkastaja: Heikki Suikkanen

Työn ohjaajat: Heikki Suikkanen, Lauri Pyy, Joonas Telkkä

Lappeenranta 17.05.2019

Aleksi Valkeapää

TIIVISTELMÄ

Aleksi Valkeapää

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaajat: Heikki Suikkanen, Lauri Pyy, Joonas Telkkä

Kandidaatintyö 2019

38 sivua, 13 kuvaa, 2 taulukkoa ja 8 liitettä

Hakusanat: ilma-vesi-kaksifaasivirtaus, kaksifaasivirtauskoelaitteisto, virtausaluekartta, virtausmuoto, horizontal and inclined pipe flow experiments

Kaksifaasivirtausta esiintyy monilla teollisuuden osa-alueilla. Ydinvoimatekniikassa kaksifaasivirtaukseen liittyvät ilmiöt ovat tärkeitä etenkin reaktoriturvallisuuden kannalta. Neste-kaasu- kaksifaasivirtaus voi muodostaa useita virtausmuotoja. Monet reaktorin suunnittelun kannalta tärkeät ominaisuudet vaihtelevat virtausmuotojen suhteen. Virtauskanavan suuntaus ja virtauksen kulkusuunta muun muassa vaikuttavat olennaisesti syntyviin virtausmuotoihin. Virtausaluekarttojen avulla ennustetaan virtausmuotoja laitteistoissa.

Työssä tarkastellaan ydintekniikan laboratorion ilma-vesi-kaksifaasivirtauskoelaitteistoa (HIPE). Työn tarkoituksena on laatia koelaitteistolle virtausaluekartat pysty- ja vaakaputkisuuntaukselle. Kartan avulla käyttäjä pystyy valitsemaan tutkittavan virtausmuodon sujuvammin. Lisäksi työssä selvitetään, millaisia virtausmuotoja koelaitteessa muodostuu.

Kaksifaasivirtausta ajettiin koelaitteessa pystysuuntaisessa sekä vaakasuuntaisessa putkessa. Mittaukset suoritettiin useilla ilman ja veden massavirtojen arvoilla. Suurnopeuskameran avulla videokuvattiin syntyvä virtausmuoto yksittäisten mittausten tapauksessa. Videoiden virtausmuodot luokiteltiin yleisesti tunnettuihin muotoihin. Mittausten ja luokiteltujen virtausmuotojen perusteella laadittiin xy-tasoon virtausaluekartat. Kaksifaasivirtauskoelaitteisto ei pysty nykyisellä kokoonpanollaan tuottamaan kaikkia virtausmuotoja. Koelaitteistoa voisi uudistaa päivittämällä ilmansuihkutusjärjestelmän tehokkaammaksi ja paremmin säädettäväksi, jotta muitakin virtausmuotoja saataisiin esiintymään. Tällöin virtausaluekartat tulee päivittää uusiin.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä **2**

Sisällysluettelo **2**

Symboli- ja lyhenneluettelo **4**

1 JOHDANTO **6**

2 KAKSIFAASIVIRTAUS JA VIRTAUSMUODOT **8**
2.1 Kaksifaasivirtauksen perusyhtälöt 8
2.2 Virtaus ylöspäin pystysuuntaisessa putkessa 10
2.3 Virtaus alaspäin pystysuuntaisessa putkessa 13
2.4 Virtaus vaakasuuntaisessa putkessa 14

3 VIRTAUSALUEKARTAT **17**
3.1 Ylöspäin virtaus 17
3.2 Alaspäin virtaus 19
3.3 Vaakasuuntainen virtaus 21

4 KOEJÄRJESTELYT **23**
4.1 HIPE (Horizonal and inclined pipe flow experiments) 23
4.2 Testikohta, kameran sijoittaminen ja asetukset 25
4.3 Mittausten suorittaminen 26

5 TULOSTEN ESITTELY JA ANALYSOINTI **28**
5.1 Virtausaluekartta (pystyputki) 28
5.2 Virtausaluekartta (vaakaputki) 30

6 JOHTOPÄÄTÖKSET **33**

7 YHTEENVETO **35**

Lähdeluettelo **37**

Liite 1. Mittauspöytäkirja (pystyvirtaus) 1 **39**

Liite 2. Mittauspöytäkirja (pystyvirtaus) 2 **42**

Liite 3. Mittauspöytäkirja (vaakavirtaus) 1 **47**

Liite 4. Mittauspöytäkirja (vaakavirtaus) 2 **50**

Liite 5. Mittauspöytäkirja (vaakavirtaus) 3 **51**

Liite 6. Excel-taulukko (pystyvirtaus) **54**

Liite 7. Excel-taulukko (vaakavirtaus) **57**

Liite 8. Virtausmuodot **61**

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

A	pinta-ala	m^2
D	halkaisija	m
Fr	Frouden luku	-
G	massavirran tiheys	kg/m^2s
g	putoamiskiihtyvyys	m/s^2
j	tyhjäputkinopeus	m/s
K	liukusuhde	-
L	pituus	m
M	massavirta	kg/s
p	paine	Pa, bar
R_v	virtauskartan parametri	-
Q	tilavuusvirta	m^3/s, kg/h
T	lämpötila	K, ° C
x	kuivaosuus	-
w	keskimääräinen virtausnopes	m/s

Kreikkalaiset aakkoset

α	kaasun aukko-osuus	-
α_L	nesteen tilavuusosuus	-

λ	virtauskartan parametri	-
μ	dynaaminen viskositeetti	kg/sm, Ns/m^2
ρ	tiheys	kg/m^3
σ	pintajännitys	N/m, J/m^2
ψ	virtauskartan parametri	- -

Alaindeksit

A	air (ilman)
abs	absoluuttinen
G	gas (kaasun)
L	liquid (nesteen)
TP	two-phase (kaksifaasivirtauksen)
W	water (veden)

Lyhenteet

BWR	Boiling Water Reactor
FPS	Frames per Second
HIPE	Horizontal and Inclined Pipe Flow Experiments
LOCA	Loss-of-Coolant Accident
PCC	Phantom Camera Control
PIV	Particle Image Velocimetry
PWR	Pressurized Water Reactor

1 JOHDANTO

Kaksifaasivirtaus voi muodostaa virtauskanavassa lukuisia eri virtausmuotoja. Faasien jakautuminen kanavassa ja niiden nopeudet ovat merkittäviä tekijöitä monilla tekniikan osa-alueilla teollisuudessa. Ydinvoimatekniikan osalta kaksifaasivirtaus on tärkeä ilmiö, sillä painehäviöt sekä lämmönsiirtokertoimet riippuvat voimakkaasti virtauksen paikallisesta rakenteesta. Erilaiset virtausmuodot tulee tällöin ottaa huomioon etenkin suunniteltaessa ydinreaktoreita. (Nuclear-Power-net 2019).

Ydinvoimatekniikassa kaksifaasivirtauksella ja sen virtausmuodoilla on suuri merkitys veden höyrystymisen yhteydessä. Ydinreaktorin suunnittelun kannalta faasimuutoksen ja kaksifaasisen virtauksen käyttäytymisen ymmärtäminen onkin hyvin tärkeää. Kiehutusvesireaktoreissa (BWR) reaktoriturvallisuuden kannalta tärkeä ilmiö on dryout, johon vahvasti liittyvät kiehumisen aikana vaihtelevat kaksifaasivirtauksen virtausmuodot. Dryout- tilanteessa polttoainesauvan pintalämpötila nousee sauvan ja jäähdytteen välisen lämmönsiirron huonotessa. Lämmönsiirto heikkenee virtausmuodon vaihtuessa niin kutsutusta annulaarisesta virtauksesta sumuvirtaukseksi, jolloin pinnan jäähdytystä edistävä nestefilmi häviää. Vesihöyryn konvektiivinen lämmönsiirtokerroin on merkittävästi alhaisempi kuin nestemäisen veden, jonka vuoksi sauvan pintalämpötila ei pysty jäähtymään tehokkaasti. (Nuclear-Power-net 2019, Tentner et al. 2015, s.1966)

Painevesireaktoreissa (PWR) tavallisen käynnin aikana virtaus on yksifaasista. Kuitenkin mahdollisten onnettomuuksien tai äkillisten muutosten johdosta, virtaus voi muuttua kaksifaasiseksi. Primääripiirin jäähdytysveden vuoto (LOCA) on eräs tällainen tilanne, jota on tutkittu paljon kaksifaasivirtauksen suhteen. Vuoto-onnettomuuden sattuessa esiintyy reaktorissa kompleksisista vesihöyry-vesi- virtausta. PWR-reaktoreissa kriittisesti vaikuttava virtausmuoto on niin kutsuttu käänteinen annulaarivirtaus. Tämä virtausmuoto saa aikaan paikallisen höyrykerroksen muodostumisen jäähdytyskanavaan. Lämmönsiirto jäähdytteen ja polttoaineen välillä heikkenee valtavasti. PWR-reaktoreissa kaksifaasivirtausta esiintyy myös primääripiirin höyrystimissä. (Nuclear-Power-net 2019, Liles 1981, s. 29)

Tämä kandidaatintyö on laadittu Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston ydintekniikan laboratorion pyynnöstä. Työn tarkoitus on selvittää laboratorion ilma-vesi-

kaksifaasivirtauskoelaitteiston (HIPE) virtausmuodot ja laatia kyseiselle koelaitteistolle virtausaluekartat. Virtausaluekartan avulla koelaitteistoa voidaan jatkossa operoida siten, että kulloinkin tarvittavan kaksifaasivirtauksen virtausmuodon voi saada aikaan käyttämällä laadittua virtauskarttaa. HIPE:n (horizontal and inclined pipe flow experiments) tarkoitus laboratoriossa on mahdollistaa ilma-vesi- kaksifaasivirtauksen käyttäytymisen tutkimus sekä omalta osaltaan toimia opetustarkoituksessa ydinvoimatekniikan termohydrauliikan kursseilla. Laitteiston käyttöönoton yhteydessä virtausaluekarttaa ei tehty, joten laboratoriolla oli tarvetta tällaiselle yksinkertaiselle työkalulle. Koska kaksifaasisysteemit harvoin ovat täysin verrannollisia keskenään, tarvitaan jokaiselle laitteistolle spesifinen virtauskartta. Tämä mahdollistaa laitteiston tuottamien virtausmuotojen luotettavan ennustamisen.

Kandidaatintyö koostuu kirjallisuuden avulla laaditusta teoriaosuudesta sekä empiirisestä työn suorittamisen kattavasta osiosta. Työn alussa käsitellään yleisesti kaksifaasivirtausta ja erilaisia ilma-vesi- kaksifaasivirtaussysteemeissä syntyviä virtausmuotoja. Lisäksi teoriaosuudessa esitellään olennaisimpia kaksifaasivirtauksen laskennalliseen tarkasteluun liittyviä suureita. Virtausaluekarttojen tarkempi määritelmä esitetään ja tuodaan esille muutamia yleisesti käytettyjä ja tunnettuja virtausaluekarttoja kirjallisuudesta. Empiirisessä osiossa esitetään varsinaisen kokeellisen työn suorittaminen sekä saadut tulokset, havainnot ja johtopäätökset.

2 KAKSIFAASIVIRTAUS JA VIRTAUSMUODOT

Kaksifaasivirtaus on nimensä mukaisesti kahden eri faaseissa (seoksen erottuva osa) olevien aineiden muodostama virtaus. Virtauksen muodostavat faasit voivat olla eri aineita (esimerkiksi vesi-ilma- virtaus) tai yhtä hyvin samaa ainetta eri olomuodoissa (esimerkiksi vesi-vesihöyry- virtaus). Kaksifaasivirtauksessa voi esiintyä kiinteää ainetta, mutta varsin usein kiinnostuksen kohteena ovat nestemäisen ja kaasumaisen aineen muodostamat virtaukset (Liles 1981, s.27). Tässä työssä käsitelläänkin lähinnä neste-kaasu- virtausta.

Neste-kaasu- kaksifaasivirtaus voi saada erilaisia virtausmuotoja. Faasien muodot muuttuvat alituisesti, kun ne vaihtavat keskinäisissä vuorovaikutuksissa energiaa, liikemäärää ja usein massaa (Liles 1981, s.27). Virtausmuotojen ilmeneminen riippuu muun muassa aineiden ominaisuuksista (tiheys ja viskositeetti), putken suuntauksesta, laitteiston asetuksista ja systeemin kokoluokasta. Virtausmuodot ovat tärkeimpiä kaksifaasivirtauksen ominaisuuksia, sillä ne käytännössä määräävät virtauksen luonteen ja vaikuttavat sen käyttäytymiseen kuljetusprosessissa (Ghiaasian 2008, s.121). Esimerkiksi monet virtaustekniikkaan tai lämmönsiirtoon liittyvät laskentakorrelaatiot riippuvat vallitsevasta virtausmuodosta (mm. painehäviöt ja lämmönsiirtokertoimet) (Brennen 2005). Virtausmuotojen tunteminen on tämän vuoksi tärkeää erilaisissa kaasu-neste-systeemeissä. Tällaisia teollisuudessa esiintyviä esimerkkejä ovat muun muassa höyrykattilat, höyrystimet, ydinreaktorit ja lauhduttimet (Matsubara & Naito 2011, s.1277). Onkin hyvä tuntea laitteiston virtaustyypit sen toiminta-alueelta, jotta kaksifaasivirtausta voidaan analysoida ja mallintaa sopivalla tavalla laitteistojen suunnittelua varten.

2.1 Kaksifaasivirtauksen perusyhtälöt

Tämä osio keskittyy tuomaan esille muutamia kaksifaasivirtauksen laskennan oleellisimpia yhtälöitä, joita yleisesti esiintyy aihepiiriin liittyvässä kirjallisuudessa.

Kuivaosuus (dryness fraction) on yksi eniten käytetty muuttuja kaksifaasivirtauksen yhtälöissä. Se määritellään kaasun massavirran M_G suhteena kaksifaasivirtauksen koko massavirtaan M:

$$x = \frac{M_G}{M} \tag{1}$$

Kosteaosuus (wetness fraction) on taas nesteen massavirran M_L suhde koko virtauksen massavirtaan M:

$$1 - x = \frac{M_L}{M} \tag{2}$$

Massavuontiheys (mass velocity) on kaksifaasivirtausta koskevassa kirjallisuudessa usein käytetty muuttuja. Se määritellään faasin massavirran M suhteena koko virtauskanavan poikkipinta-alaan A. Alaindeksi G viittaa kaasumaiseen ja L nestemäiseen faasiin.

$$G_G = \frac{M_G}{A} \tag{3}$$

$$G_L = \frac{M_L}{A} \tag{4}$$

Aukko-osuus (void fraction) on oleellisesti kaksifaasivirtauksen laskennassa usein tarvittava muuttuja, joka kuvaa, kuinka suuren osan kaasumainen faasi käsittää virtauskanavan koko poikkileikkauspinnasta:

$$\alpha = \frac{A_G}{A} \tag{5}$$

A_G on kaasufaasin poikkileikkauspinta-ala

A on virtauskanavan poikkileikkauspinta-ala

Nesteen tilavuusosuus (liquid volume fraction) määritellään vastaavalla tavalla kuin aukko-osuus kaasufaasille:

$$\alpha_L = (1 - \alpha) = \frac{A_L}{A} \tag{6}$$

A_L on nestefaasin poikkileikkauspinta-ala

Faasien **tyhjäputkinopeuksilla** (superficial velocity) tarkoitetaan faasin virtausnopeutta, kun faasin ajatellaan virtaavan virtauskanavassa itsenäisesti ilman toisen virtauksen komponentin läsnäoloa:

$$j_{\mathrm{G}} = \frac{Q_G}{A} = \frac{xG}{\rho_{\mathrm{G}}} \tag{7}$$

$$j_{\mathrm{L}} = \frac{Q_{\mathrm{L}}}{A} = \frac{(1-x)G}{\rho_{\mathrm{L}}} \tag{8}$$

Jossa:

Q on tilavuusvirta

G on koko virtauksen massavuontiheys

ρ on tiheys

Liukusuhde (slip ratio) on eräs tärkeä muuttuja, joka kuvaa faasien keskimääräisten virtausnopeuksien w suhdetta:

$$K = \frac{w_{\mathrm{G}}}{w_{\mathrm{L}}} \tag{9}$$

2.2 Virtaus ylöspäin pystysuuntaisessa putkessa

Ylöspäin suuntautuneessa kaasu-neste- kaksifaasivirtauksessa voidaan havaita lukuisia virtaustyyppejä, mutta yleisesti helposti havaittavia ja luokiteltuja virtausmuotoja ovat: kuplavirtaus (bubbly flow), hyvin jakautunut kuplavirtaus (finely dispersed bubbly flow), tulppavirtaus (slug flow), kirnuaminen (churn flow) sekä annulaarinen virtaus (annular dispersed flow) (Ghiaasian, 2008 s.123).

Kuplavirtauksessa (kuva 1. a) havaitaan useita erillisiä kuplia jatkuvassa nestefaasissa. Kuplat voivat olla erikokoisia ja muotoisia, mutta tyypillisesti ne ovat lähes pallonmuotoisia. Kuplien halkaisijat ovat selvästi pienemmät kuin putken halkaisija on. Inertiasta, viskositeetistä, nosteesta sekä pintajännityksestä johtuvien voimien yhteisvaikutus saa aikaan kuplien erilaiset muodot ja liikeradat (Wallis 1969, s.243). Kuplavirtausta esiintyy, kun kaasumaisen aineen virtausnopeus on hyvin pieni suhteessa nestemäisen aineen virtausnopeuteen. Kun kaasun virtausnopeus kasvaa putkessa, lisääntyy kuplien määrä ja ne vuorovaikuttavat keskenään törmätessään toisiinsa. Tällöin tapahtuu kuplien yhdistymis- ja hajoamistapahtumia, jotka saavat aikaan uusien virtaustyyppien kehittymisen. Koska kaasukuplilla on tapana kasaantua suuremmiksi

rakenteiksi, tämä virtausmuoto on harvoin pysyvä putkistosysteemeissä. (Ghiaasian 2008, s.123, Thome 2007 s.1, Wallis 1969, s.243)

Nesteen virtauksen ollessa hyvin suuri suhteessa kaasumaisen aineen virtausnopeuteen, voi esiintyä **hyvin jakautunutta kuplavirtausta** (kuva 1. b). Vahvasti turbulenttinen nestevirtaus ei mahdollista suurien kaasutaskujen muodostumista virtaukseen, jolloin ne pirstoutuvat pieniksi kupliksi. Nämä kuplat ovat melko pienikokoisia ja lähes pallonmuotoisia. (Ghiaasian 2008, s. 124)

Kun nestemäisen aineen virtausnopeutta pidetään vakiona ja lisätään kaasun virtausta, kuplat alkavat törmätä ja yhdistyä toisiinsa. Muodostuu lähes putken halkaisijan mittaisia kuplia, jolloin puhutaan **tulppavirtauksesta** (kuva 1. c). Kuplat ovat luodinmuotoisia, sillä ne ovat virtauksen suuntaan nähden päästään puolipallonmuotoisia ja toisesta päästään lähes tasaisia. Näitä kuplia kutsutaan yleisesti Taylorin kupliksi. Taylorin kuplia erottaa nesteosat, jossa voi olla pieniä kuplia. Taylorin kuplien ja putken seinämän välillä on ohut nestefilmi. Nestefilmi voi virrata alaspäin putkea painovoiman vuoksi, vaikka nettovirtaus onkin ylöspäin putkea. Taylorin kuplat ovat lähes koko putken poikkipinta-alan kokoisia. Kuplat yhdistyvät toisiinsa ja kasvavat tällä tavoin pituutta virtauskanavassa. (Ghiaasian 2008, s.123, Thome 2007, s.1)

Edelleen kun kaasun virtausnopeutta lisätään putkessa, alkaa Taylorin kuplien häiriintyminen voimakkaan virtauksen vuoksi aikaansaamaan **kirnuamista** (kuva 1. d). Tämä virtaustyyppi on luonteeltaan kaoottinen ja selvää rajapintaa faasien välillä ei havaita. Kirnuamisessa huomataan epäsäännöllisten kaasutaskujen liikehdintää. Molemmat faasit voivat näyttää jatkuvilta ja havaitaan alituista kirnuamista sekä virtauksen värähtelyä takaisin sen tulosuuntaan. (Ghiaasian 2008, s.123)

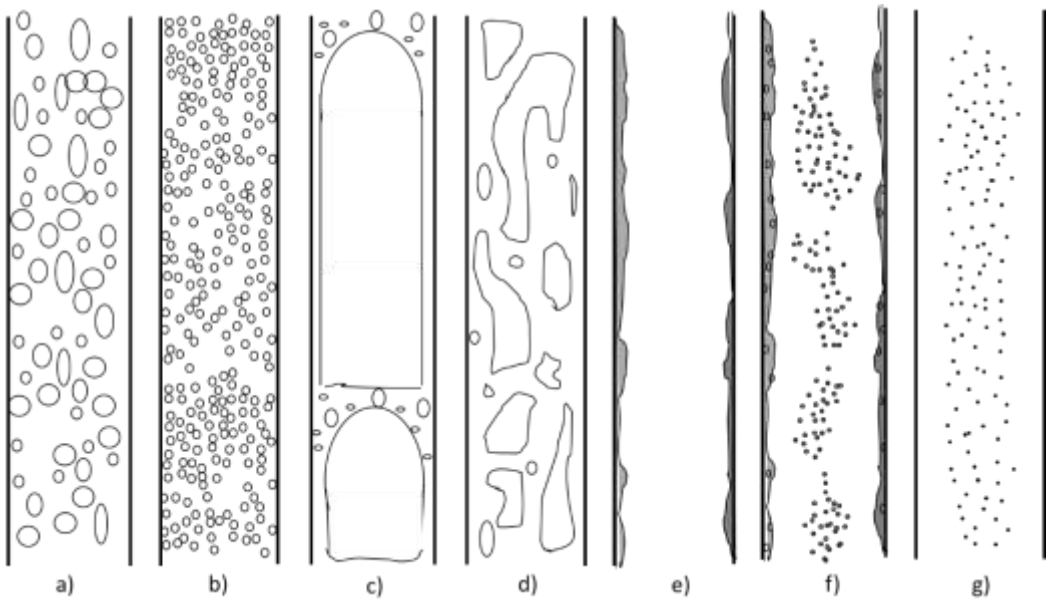
Virtauksen rakenne on epästabiili ja fluidi liikkuu edestakaisin värähdysmäisesti pitkin putkea. Nettovirtaus on kuitenkin edelleen ylöspäin putkea. Epästabiilin virtauksen aiheuttaa nestefilmiin vaikuttavat painovoima ja leikkausvoima, jotka ovat keskenään vastakkaissuuntaiset. Tämä virtausmuoto voidaan myös luokitella transitioksi tulppavirtauksen ja annulaarivirtauksen välillä. Pienen halkaisijan putkissa tätä virtausmuotoa ei esiinny vaan virtaus siirtyy tulppavirtauksesta suoraan annulaariseksi. Kirnuamista tulee välttää kaksifaasivirtausputkistoissa (esimerkiksi

jäähdytysputkistossa), sillä se voi aiheuttaa tuhoisia vaikutuksia putkistosysteemiin. (Thome 2007, s.1)

Kun nestefilmiin vaikuttava leikkausjännitysvoima kasvaa kaasun virtausnopeutta lisättäessä painovoimaa suuremmaksi, neste siirtyy putken reunoille ohuena filminä. Kaasufaasi muodostaa putken keskiosaan jatkuvan virtauksen. Nestefilmi ei ole häiriintymätön vaan se aaltoilee ja väreilee suurella taajuudella. Tätä virtausmuotoa kutsutaan **annulaariseksi virtaukseksi** (kuva 1. e). Nestettä voi siirtyä pieninä pisaroina putken keskiosassa olevaan kaasufaasiin. Tämä virtaustyyppi on vallitseva esimerkiksi höyrystimissä, maakaasuputkistoissa sekä höyrykiertoon perustuvissa lämpövoimakoneissa (Wallis 1969, s.315). Annulaarinen virtaus on usein tavoiteltava virtausmuoto kaksifaasivirtausputkistoissa, sillä se on hyvin stabiili luonteeltaan. (Thome 2007, s.2)

Kun annulaarisen virtauksen kaasumaisen aineen virtausnopeutta kasvatetaan, voi kaasufaasiin syntyä pilvi- tai harsomaisia rakenteita nestemäisestä faasista. Tätä virtausmuotoa (kuva 1. f) kutsutaan **harsomaiseksi annulaarivirtaukseksi** (wispy annular flow). (Thome 2007, s.2)

Hyvin suurilla kaasun virtausnopeuksilla nestefilmi ohenee kaasumaisen aineen aiheuttaman leikkausjännityksen vuoksi. Lopulta nestefilmi hajoaa ja kaikki neste siirtyy kaasufaasiin pieninä pisaroina. Nämä pisarat kastelevat paikallisesti putken seinämää. Syntyviä vesipisaroita ei voida nähdä selvästi. Tätä virtausmuotoa (kuva 1. g) sanotaan **sumuvirtaukseksi** (mist flow). (Thome 2007, s.2)



Kuva 1. Ylöspäin etenevän ilma-vesi- kaksifaasivirtauksen muodot (Ghiaasian 2008, s.123).

2.3 Virtaus alaspäin pystysuuntaisessa putkessa

Alaspäin suunnatussa virtauksessa esiintyvät virtaustyypit ovat jokseenkin samankaltaisia kuin edellä mainitut ylöspäin tapahtuvan virtauksen muodot. Alaspäin virtauksen virtausmuotoja on tutkittu vähemmän, mutta joitakin selviä eroja on löydetty verrattuna edellä mainittuun tilanteeseen. Oshinowo ja Charles ovat tutkineet alaspäin virtausta ja määritelleet kuusi selkeästi havaittavaa virtaustyyppiä sille.

Kuplavirtaus alaspäin suunnatussa putkessa esiintyy pienillä kaasun virtausnopeuksilla ja on hieman erilainen verrattuna ylöspäin virtaukseen. Kuplat kerääntyvät alaspäin virtauksessa lähelle putken kuvitteellista keskiakselia, kun taas ylöspäin virtauksessa kuplat leviävät koko putken poikkileikkauspinnalle. (Bergles et al 1981, s.16)

Kaasun virtausnopeutta lisättäessä alkavat kuplat yhdistyä toisiinsa ja syntyy Taylorin kuplia. Syntyvä **tulppavirtaus** on hyvin samankaltainen kuin ylöspäin virtauksen tapauksessa. Tulppavirtaus on tässä tilanteessa kuitenkin stabiilimpi. (Bergles et al 1981, s.17) Tulppavirtauksen syntymiseen tarvitaan melko suuri nesteen virtausnopeus (Hewitt 1970, s.6).

Annulaarinen virtaus saa tässä tapauksessa hieman erilaisia muotoja. Kaasun ja nesteen virtausnopeuksien ollessa vielä suhteellisen pienet esiintyy **kalvovirtausta** (falling film flow), jossa nestefilmi virtaa alaspäin putkiseinämää. Jos nesteen virtausnopeus on hieman suurempi, kaasukuplat siirtyvät nestefilmiin, jolloin puhutaan **kuplafilmivirtauksesta** (bubbly falling film). Kun sekä kaasun että nesteen virtausnopeuksia lisätään edelleen, syntyy **kirnuamista**. Kirnuaminen etenee varsinaiseksi **annulaariseksi virtaukseksi**, kun kaasun virtausnopeus on hyvin suuri (Bergles et al 1981, s.17). Yleisesti alaspäin virtauksessa on helpompi saavuttaa annulaarinen virtaus verrattuna pystyvirtaukseen (Hewitt 1970, s.6).

2.4 Virtaus vaakasuuntaisessa putkessa

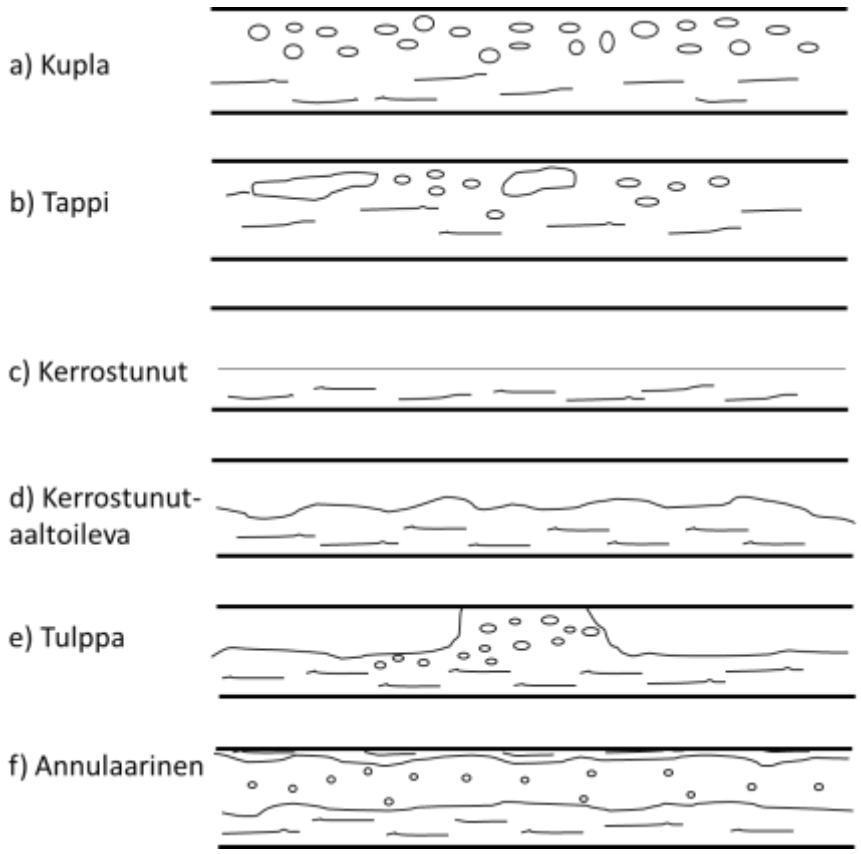
Kaasu-neste- kaksifaasivirtaustyypit vaakasuuntaisessa virtauksessa ovat suurimmaksi osaksi samankaltaisia kuin pystyvirtauksessa. Vaakasuuntaisessa virtauksessa nesteeseen vaikuttava suurempi painovoima aiheuttaa kuitenkin faasien kerrostumisen siten, että nestefaasi jää putken alaosaan ja kaasu vastaavasti kerrostuu yläosaan. (Thome 2007, s.3)

Kuplavirtauksessa (kuva 2. a) kaasu on hajaantunut nesteeseen kuplina. Kuplien pitoisuus on suuri putken yläosassa nosteen vuoksi. Leikkausvoimien ollessa vaikutukseltaan merkittävät, kuplilla on taipumus jakaantua tasaisesti putkeen. Vaakasuuntaisessa virtauksessa kyseistä muotoa esiintyy vain suurilla aineiden virtausnopeuksilla. (Thome 2007, s.3)

Pienillä kaasun ja nesteen virtausnopeuksilla molemmat faasit asettuvat putkessa omiin kerroksiin. Suuremman painovoiman vaikutuksen vuoksi nestefaasi asettuu putken pohjalle ja kaasu jää kerrokseksi putken yläosaan. Tätä virtausmuotoa nimitetään **kerrostuneeksi virtaukseksi** (stratified flow, kuva 2. c) (Thome 2007, s.3). Kerrostunut virtaus on tietyssä määrin samankaltainen virtausmuoto annulaarisen virtauksen kanssa, sillä molemmissa virtaustyypeissä komponentit virtaavat vierekkäin toisiinsa sekoittumatta. (Wallis 1969, s.315)

Kun kerrostuneessa virtauksessa kaasun virtausnopeutta lisätään, muodostuu aineiden rajapintaan virtauksen suuntaan kulkevia aaltoja. Aaltojen amplitudi riippuu faasien välisestä suhteellisesta nopeudesta. Aaltojen harjat eivät kuitenkaan yllä putken yläosaan

asti. Aallot jättävät putken seinämään ohuen nestefilmin, kun ne ohittavat seinämän läheltä. Syntyvää virtausmuotoa nimitetään **kerrostunut-aaltoileva- virtaukseksi** (stratified-wavy flow, kuva 2. d) (Thome 2007, s.3).



Kuva 2. Vaakasuuntaisen virtauksen virtausmuodot. (Hewitt 1979, s.4)

Faasien rajapintaan muodostuvat aallot ovat sitä korkeampia mitä suurempi on faasien välinen nopeusero. Kun kaasun virtausnopeutta lisätään, aaltojen amplitudi kasvaa ja ne yltävät kastelemaan putken yläosaa. Suuren amplitudin aaltoja alkaa esiintyä jaksoittain ja näiden välissä ilmenee pienempiä aaltoja. Suuret aallot sisältävät usein myös pieniä kaasukuplia. Putken yläseinämä kastuu jatkuvasti suurien aaltojen ja niiden jättämien ohuiden nestefilmien vuoksi. Tätä virtausmuotoa nimitetään **jaksolliseksi virtaukseksi** (intermittent flow). (Thome 2007, s.3)

Jaksollinen virtaus voidaan nähdä kahden alavirtaustyypin, tappi- ja tulppavirtauksen, yhdistelmänä. **Tappivirtauksessa** (plug flow, kuva 2. b) nestefaasi esiintyy tappeina, joita erottaa pitkänomaiset kaasukuplat. Kaasukuplien halkaisijat ovat pienemmät kuin

putken, sillä nestemäinen faasi virtaa putken alaosassa jatkuvana faasina. **Tulppavirtauksessa** (kuva 2. e) pitkänomaisten kaasukuplien halkaisijat lähenevät kanavan korkeutta. Korkean amplitudin nesteaallot erottava kaasukuplia toisistaan. (Thome 2007 s.3, Chisholm 1983, s.25)

Myös vaakasuuntaisessa virtauksessa esiintyy **annulaarista virtausta** (kuva 2. f). Suurilla kaasun virtausnopeuksilla putken seinämiin hajaantuu nestefilmi samaan tapaan kuin pystysuuntaisessakin virtauksessa. Nestefilmi on kuitenkin painovoiman vaikutuksesta paksumpi putken alaosassa verrattuna yläosaan. Keskellä olevan kaasufaasin ja seinämien läheisyydessä olevan nestefaasin rajapinnassa esiintyy pieniä aaltoja. Nestepisaroita voi siirtyä kaasumaiseen faasiin. Kaasun osuuden ollessa suuri, ohut nestefilmi kuivuu putken yläosasta, jolloin virtaus muistuttaa kerrostunut-aaltoileva-virtausta. (Thome 2007, s.3)

Sumuvirtaus vaakasuuntaisessa putkessa on hyvin samanlainen kuin pystyvirtauksessa. Todella suurilla kaasun virtausnopeuksilla kaikki neste voi siirtyä pieninä vesipisaroina putken keskellä olevaan kaasufaasiin. (Thome 2007, s.3)

3 VIRTAUSALUEKARTAT

Virtausaluekartta on xy-tasoon laadittu esitys siitä, millä alueilla erilaiset virtausmuodot esiintyvät. Kartan laadinnassa on käytössä useita vaihtoehtoja koordinaatiston arvoille ja parhaaksi todettua ratkaisua tähän ei ole vielä löydetty (Bergles et al 1981, s.12). Tavanomainen tapa on esittää havaitut virtausmuodot kartassa siten, että koordinaattiarvoiksi on valittu aineiden tyhjäputkinopeudet. Toisaalta voidaan käyttää koordinaattiarvona kokonaismassavuota ja toisena koordinaattina kaasun tai nesteen massaosuutta. Kun kaikki havaitut virtausmuodot sijoitetaan xy-tasoon valittujen koordinaattiarvojen perusteella, erotetaan virtaustyyppien esiintymisalueita. Tämän jälkeen esiintymisalueet voidaan rajata karttaan toisistaan erillisiksi osioiksi viivoilla. Näiden alueiden avulla voidaan tehdä päätelmiä laitteiston virtausmuotojen esiintymisestä erilaisilla asetetuilla parametreilla. Jotkin kartat ottavat huomioon kanavan geometrian sekä fluidien aineominaisuudet. Tämä onnistuu sopivasti valittujen dimensiottomien ryhmien avulla. (Hewitt 1970, s.8). Virtausaluekarttoja on laadittu useille eri aineyhdistelmille, putkisuuntauksille, putkiko'oille sekä käyttöolosuhteille. Useimmat käytetyt kartat ovat tehty pieni- tai keskisuuren halkaisijan (1-10 cm) putkelle ja nesteille, joiden aineominaisuudet poikkeavat vain hieman veden vastaavista. (Ghiaasian 2008, s.129). Erityisesti pysty- ja vaakasuuntaiselle ilma-vesi kaksifaasivirtaukselle löytyy kirjallisuudesta ja tiedejulkaisuista monia virtausaluekarttoja. Kirjallisuudesta löydettyjä valmiita virtausaluekarttoja voidaan soveltaa karkeaan virtausmuotojen ennustamiseen, mutta niiden antamien tulosten todenmukaisuutta ei voi pitää itsestään selvänä asiana. Virtausmuodot riippuvat vahvasti putkisysteemin suuntauksesta, halkaisijasta, käyttöolosuhteista (paine ja lämpötila) sekä monista muista parametreista, jonka vuoksi yleispätevää karttaa on hyvin vaikea laatia. (Bergles et al 1981, s.2). Tämän vuoksi kaksifaasisysteemeille on suotavaa tehdä laitespesifinen virtausaluekartta. Seuraavissa alaosioissa esitetään muutama yleisesti tunnettu ja käytetty virtausaluekartta eri putki- ja virtaussuunnille.

3.1 Ylöspäin virtaus

Yksi tunnetuimmista ja eniten käytetyistä ilma-vesi ja vesi-vesihöyry kaksifaasivirtauksen virtauskartoista on Hewittin ja Robertin kartta (1969). Kartta

laadittiin alun perin ilma-vesi- seokselle, joka virtasi 31 mm halkaisijan putkessa paineen ollessa välillä 1,4-5,4 bar. Lisäksi tämä kartta esittää myös vesi-vesihöyry kaksifaasivirtauksen tulokset 12,7 mm putkihalkaisijan tapauksessa ja paineen ollessa välillä 34,5-69 bar. Vesi-vesihöyry virtauksen tulokset kartassa perustuvat Bennett et al. suorittamaan tutkimukseen (1965). Tämän kartan koordinaattiarvot ovat seuraavat.

Y-koordinaatti:

$$\rho_L j_L^2 = \frac{G^2(1-x)^2}{\rho_L} \tag{10}$$

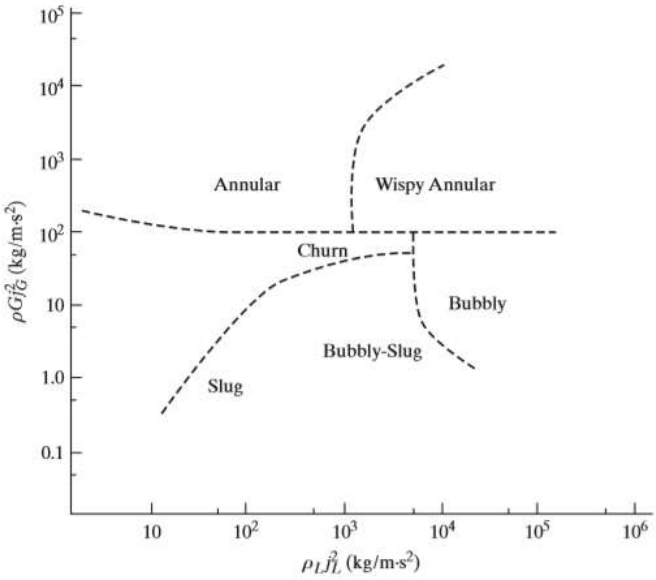
X-koordinaatti:

$$\rho_G j_G^2 = \frac{G^2 x^2}{\rho_G} \tag{11}$$

Alla olevaan taulukkoon 1 on koottu Hewittin ja Robertsin kokeellisen tutkimuksen putken mitat, paineet virtausten sekoittumispisteessä, aineiden ominaisuudet sekä käytetyt massavirrat (Pinto del Corral 2014, s. 6). Lisäksi alla on esitetty Hewittin ja Robertsin virtausaluekartta kuvassa 3.

Taulukko 1. Hewitt & Roberts pystyvirtauskokeen putken mitat ja muut parametrit.

L [m]	0,3
D [mm]	31,75
p_{abs} [kPa]	142,7-542,6
p [kPa]	41,4-441,3
T_G [°C]	18,9-25,3
T_F [°C]	20,8-32,5
ρ_G [kg/m^3]	1,68-6,4
ρ_L [kg/m^3]	992,2-997,8
Q_G [kg/h]	1,36-544,3
Q_L [kg/h]	226,8-8164,7



Kuva 3. Hewitt & Robert (1969) virtausaluekartta (Ghiaasian 2008, s.129).

Taitel ja Dukler vertasivat Hewittin ja Robertin virtauskarttaa muihin vastaaviin karttoihin (Govier & Aziz 1972 sekä Oshinowo & Charles 1974). Vertailun tuloksena he huomasivat muutamia eroavuuksia sekä määrällisissä arvoissa että transitiota kuvaavien viivojen suunnissa. Eroja aiheuttaa kartoissa erityisesti kokeellisten tutkimusten subjektiivisuus: virtausmuodot ja niiden transitiot voidaan visuaalisen havainnoinnin yhteydessä tulkita usealla tavalla. Tämän vuoksi Taitel ja Dukler laativat oman virtausaluekartan teoreettisten analyysin perusteella johdettujen transitioyhtälöiden avulla. (Bergles et al. 1981, s.12, Todreas & Kazimi 1990, s.468)

3.2 Alaspäin virtaus

Oshinowo ja Charles (1974) suorittivat kokeellisia tutkimuksia ilma-neste-kaksifaasivirtaukselle pystysuorassa putkessa, jossa virtaus kulki alaspäin. He käyttivät kokeissaan ilman ja veden/vesi-glyseroliliuoksen muodostamaa kaksifaasivirtausta. Putken halkaisija oli kokeissa 25,4 mm ja absoluuttinen paine noin 1,7 bar. He valitsivat karttaan seuraavat koordinaattiarvot.

Y-koordinaatti:

$$\frac{Fr_{\mathrm{TP}}}{\sqrt{\lambda}} \tag{10}$$

X-koordinaatti:

$$\sqrt{R_{\mathrm{V}}} = \sqrt{\frac{Q_{\mathrm{G}}}{Q_{\mathrm{L}}}} = \sqrt{\frac{j_{\mathrm{G}}}{j_{\mathrm{L}}}} \tag{11}$$

Alaindeksi TP viittaa kaksifaasivirtaukseen (twophase). X-koordinaatin lausekkeessa esiintyvä Frouden luku sekä nesteen aineominaisuudet huomioiva kerroin λ määritellään seuraavien yhtälöiden mukaisesti:

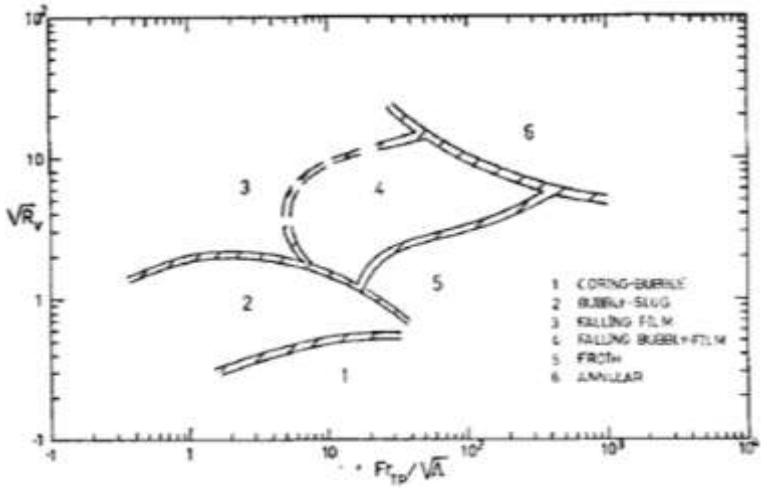
$$Fr_{TP} = \frac{(j_{\mathrm{G}}+j_{\mathrm{L}})^2}{gD} \tag{12}$$

$$\lambda = \frac{\mu_{\mathrm{L}}}{\mu_{\mathrm{W}}}\left[\left(\frac{\rho_{\mathrm{L}}}{\rho_{\mathrm{W}}}\right)\left(\frac{\sigma}{\sigma_{\mathrm{W}}}\right)^3\right]^{-1/4} \tag{13}$$

Yhtälössä g on putoamiskiihtyvyys ja D kanavan halkaisija. Alaindeksillä L olevat aineominaisuustermit viittaavat kulloinkin käytetyn nesteen ominaisuuksiin ja alaindeksin W käsittävät termit määritetään vedelle (20°C ja 1 bar). (Bergles et al 1981, s. 17) Alla olevaan taulukkoon 2 on koottu yhteen alkuperäisessä tutkimuksessa käytetyn putkisysteemin mitat ja eri parametrien vaihteluvälit (Pinto del Corral 2014, s. 4). Alla on esitetty lisäksi Oshinowon ja Charlesin kokeiden perusteella julkaistu virtausaluekartta.

Taulukko 2. Oshinowo & Charles (1974) putken mitat kokeiden arvoja.

L [m]	5,273
D [mm]	254
p [kPa]	0,71
T [°C]	10-27
ρ_{L} [kg/m^3]	1000-1250
μ_{L} [kg/ms]	$1 \cdot 10^{-3}$-$12 \cdot 10^{-3}$
σ [kg/s^2]	$68 \cdot 10^{-3}$-$73 \cdot 10^{-3}$
Q_{G} [kg/h]	1-104
Q_{L} [kg/h]	19-3540



Kuva 4. Oshinowo & Charles (1974) virtausaluekartta (Pinto del Corral 2014, s.4).

3.3 Vaakasuuntainen virtaus

Bakerin (1954) virtausaluekartta on yleisesti käytetty kartta vaakasuuntaisen kaksifaasivirtauksen virtausmuotojen ennustamisessa. Baker laati alkuperäisen kartan keräämällä dataa useista ilma-vesi- ja ilma-hiilivety -kaksifaasivirtaustutkimuksista (Pinto del Corral 2014, s.19). Bell et al. (1970) yksinkertaistivat Bakerin kartan käyttöä ja muuttivat koordinaattiarvoja ja laativat siitä muokatun version. Kyseisen virtausaluekartan koordinaattiarvot on valittu seuraavasti (Bergles et al. 1981, s.19).

Y- koordinaatti:

$$\frac{G_{\mathrm{G}}}{\lambda} \tag{14}$$

X-koordinaatti:

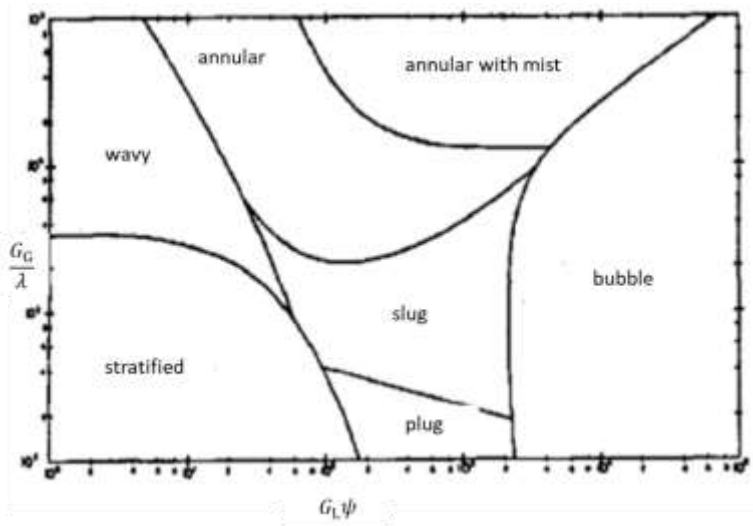
$$G_{\mathrm{L}}\psi \tag{15}$$

Nimittäjätermit lasketaan oheisista yhtälöistä:

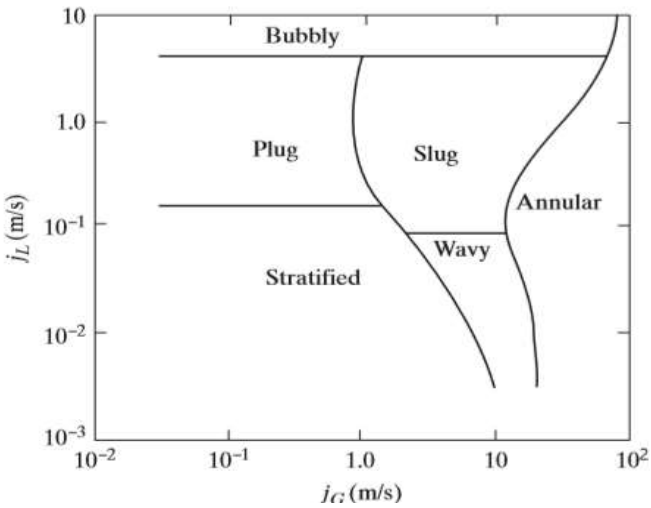
$$\lambda = \left[\left(\frac{\rho_{\mathrm{G}}}{\rho_{\mathrm{A}}}\right)\left(\frac{\rho_{\mathrm{L}}}{\rho_{\mathrm{W}}}\right)\right]^{1/2} \tag{16}$$

$$\psi = \frac{\sigma_{\mathrm{WA}}}{\sigma}\left[\left(\frac{\mu_{\mathrm{L}}}{\mu_{\mathrm{W}}}\right)\left(\frac{\rho_{\mathrm{W}}}{\rho_{\mathrm{L}}}\right)\right]^{1/3} \tag{17}$$

Alaindeksi A viittaa ilman ja W veden ominaisuuksiin 20 °C lämpötilassa ja 1 bar paineessa. Termi σ on pintajännitys. Mainittavan arvoinen virtausaluekartta on myös Mandhane et al. vuonna 1974 julkaisema kartta. Tämän kartan pohjana oli aikaisemmista tutkimuksista valitut 5935 datapistettä, joista 1178 liittyi ilma-vesi-kaksifaasivirtaukseen. He käyttivät kartan laatimisessa osakseen Taitel et al. julkaisemia teoreettisia laskentayhtälöitä. (Bergles et al 1981, s.21). Kartan koordinaatteina käytetään nesteen ja kaasun tyhjäputkinopeuksia. Alla on esitetty nämä edellä mainitut esimerkit vaakasuuntaisen virtauksen kartoista.



Kuva 5. Bell virtausaluekartta (1970) (Pinto del Corra 2014, s.22, muokattu lähteestä).



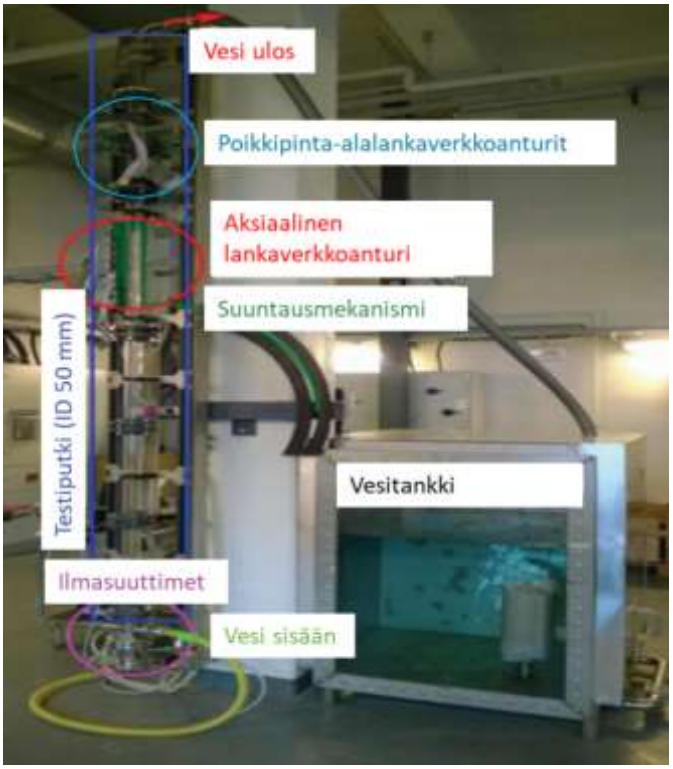
Kuva 6. Mandhane et al. (1974) virtausaluekartta (Ghiaasian 2008, s.131).

4 KOEJÄRJESTELYT

Tässä osiossa käydään läpi käytännön järjestelyt, jotka tehtiin laitteiston virtausmuotojen selvittämistä ja virtausaluekarttojen laadintaa varten. Aluksi kuitenkin esitetään työn kohteena oleva kaksifaasivirtauskoelaitteisto.

4.1 HIPE (Horizontal and inclined pipe flow experiments)

Työn kohteena oleva ydinvoimatekniikan laboratorion adiabaattinen testilaitteisto (HIPE) mahdollistaa ilma-vesi- kaksifaasivirtauksen tutkimuksen erilaisilla putken suuntauksilla. Koelaitteiston putki voidaan asettaa vaakatasoon, pystytasoon tai näiden väliseen kulmaan. Testilaitteisto on rakennettu PIV:n (particle image velocimetry) ja lankaverkkoantureiden (wire mesh sensor) käyttökelpoisuuden selvittämiseen tutkittaessa yksi- tai kaksifaasivirtausta. Tämä koelaitteisto toimii myös ydinvoimatekniikan termohydrauliikan kursseilla opetustarkoituksessa ja sillä demonstroidaan ilma-vesi- kaksifaasivirtausta. (Krasulin 2016, s.76). Kuvassa 7 on esitetty kyseinen koelaitteisto.



Kuva 7. Kaksifaasivirtauksen koelaitteisto HIPE. (Ylönen & Hyvärinen 2015, s.799)

Koelaitteistossa on läpinäkyvä akryylista valmistettu putkisto (sisähalkaisija 50 mm), jonka suuntaus voidaan asettaa mielivaltaisesti vaaka- ja pystysuunnan väliltä lukkiuttamalla putki laitteiston kannatinpalkkiin. Putkiosuudessa on erityinen optisia häiriöitä minimoiva kammio, joka on tehty suurnopeuskamera- ja PIV-mittauksia varten. (Krasulin 2016, s.76). Keskipakopumpun (Grundfos CRI 10) avulla vettä syötetään vesisäiliöstä laitteiston putkiosuuteen ja putken alapuolisessa osassa tuodaan ilmasuuttimilla ilmaa, jotta kaksifaasivirtaus saadaan putkessa muodostettua. Ilmasuuttimia HIPE:ssä on kolme ja ne on asetettu kolmioasetelmaan toistensa suhteen. Ilmasuuttimet sijaitsevat niin ikään kolmioasetelmassa olevien vesisuuttimien sisällä (sisähalkaisija 4 mm ja ulkohalkaisija 6 mm). Vesi- ja ilmavirrat sekoittuvat siis putkiosuuden alaosassa keskenään (kuva 8) ja jatkavat tämän jälkeen kaksifaasivirtauksena läpinäkyvää putkea pitkin. Vesi ja ilma erotetaan toisistaan putken loppupäässä. Vesi johdetaan takaisin vesisäiliöön letkua pitkin ja ilman annetaan purkaantua huoneilmaan. Lisäksi HIPE:ssä on aksiaalinen lankaverkkoanturi (16 x 128 lankaa) sekä kaksi perinteisempää poikkipinta-ala- lankaverkkoanturia (32 x 32 lankaa), jotka mahdollistavat kaksifaasivirtauksen dynamiikkaan liittyvän tiedon keräämisen sekä tallentamisen. (Ylönen & Hyvärinen 2015, s.798).

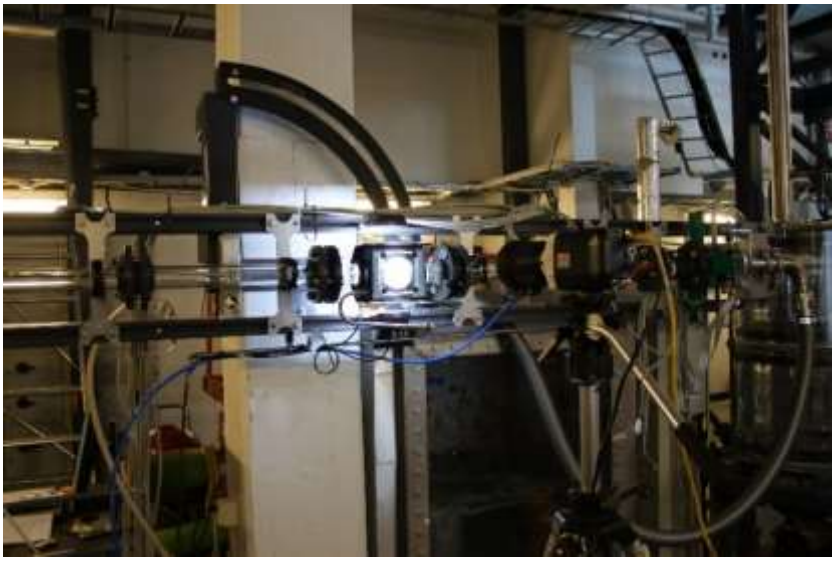
Kuva 8. HIPE:n ilma- ja vesivirtojen sekoittumiskohta. (Ylönen & Hyvärinen 2015, s.799)

4.2 Testikohta, kameran sijoittaminen ja asetukset

HIPE:n virtauskarttojen laatimista varten päädyttiin yksinkertaisesti ja helposti toteutettavaan empiiriseen tutkimusmenetelmään. Laitteiston aikaansaamat virtausmuodot kuvattiin suurnopeuskameralla (Phantom Miro M310), joka sijoitettiin kuvaamaan valittua testikohtaa pysty- ja vaakasuuntaisessa putkessa. Testikohdaksi valittiin optisia häiriöitä minimoiva kammio, jonka keskikohta sijaitsee noin 179 cm laitteiston pohjasta mitattuna. Tällöin videokuvauksen suhteen pystyttiin vähentämään kuvaa haittaavia optisia heijastuksia sekä taittumisia. Lisäksi testikohdan etäisyys vesi- ja ilmavirtausten sekoittumispisteestä katsottiin olevan tarpeeksi suuri, jotta faasien sekoittuminen ehti tapahtua kunnolla. Alla olevissa kuvissa on esitetty pystyputken (kuva 9) ja vaakaputken testikohdat (kuva 10).

Kuva 9. Suurnopeuskameran sijainti pystyputken mittauksissa.

Videokuvausta varten testikohdan kammio päällystettiin voipaperilla, jonka tarkoitus oli hajottaa valoa suuremmalle alalle eli toimia diffuusorina. Lisäksi voipaperin avulla pystyttiin ehkäisemään hieman kuvaa haittaavia heijastuksia. Sopiva valaistus videokuvaamista varten saatiin toteutettua sijoittamalla 500 W valaisin testikohdan taakse. Tällöin onnistuttiin valaisemaan videokuvaamisen kannalta oleellinen alue melko tasaisesti.



Kuva 10. Suurnopeuskameran sijainti vaakaputken mittauksissa.

Suurnopeuskameran operointi ja asetusten muokkaaminen tapahtui Phantomin PCC-ohjelmistolla (PCC = Phantom Camera Control), jota ajettiin mittaustietokoneella. Videoiden kuvataajuudeksi valittiin muutaman testin jälkeen 2000 fps (frames per second), sillä tämän katsottiin olevan tarpeeksi riittävä kuvataajuus virtausmuotojen visuaaliseen havainnointiin. Lisäksi suuremmilla kuvataajuuksilla videotiedostojen koko olisi kasvanut merkittävästi ja tiedostojen siirtoon olisi mennyt vielä enemmän aikaa.

4.3 Mittausten suorittaminen

Koelaitteistoa ajettiin vakiolla veden massavirralla ja ilman massavirtaa säädettiin portaittain. Ilman massavirta vaihteli mittauksissa välillä 0,19-5,7 g/s. Jokaisen asetetun ilma- ja vesivirran yhteydessä kuvattiin putkiosuutta sekunnin verran suurnopeuskameralla. Videotiedosto nimettiin mittauksen järjestysnumeron mukaisesti. Samalla yksittäisen mittauksen mittareiden arvot otettiin ylös mittauspöytäkirjaan. LabView- ohjelmasta luettiin veden massavirta, ilman massavirta sekä faasien tyhjäputkinopeudet. Lisäksi seinällä olevista mittareista (kuva 11.) kirjattiin ylös veden tilavuusvirta sekä ilman massavirta. Tämän jälkeen pumpun tehoa säädettiin porrastetusti suuremmaksi LabView-ohjelman avulla ja mittauksia jatkettiin edellä mainitun mukaisesti. Mittauksissa veden massavirta vaihteli välillä 0,5-3,9 kg/s pystyvirtauksen tapauksessa. Vaakavirtauksen mittauksissa veden massavirran arvot vaihtelivat välillä

0,1-3,8 kg/s. Mittaukset pyrittiin suorittamaan siten, että koko laitteiston toiminta-alue virtausnopeuksien suhteen tulisi otettua hyvin huomioon virtauskarttoja laadittaessa. Mittapisteitä virtauskarttoihin otettiin riittävästi: 96 pystyputken tapauksessa ja 151 vaakasuuntaisen putken mittauksissa.

Kuva 11. Laitteiston mittareita ja säätimiä: 1) Painesäädin, 2) Ilmamassamittari (Sierra SmartTrak2), 3) Ilmaventtiili, 4) Pumpun taajuusmuunnin (Siemens Micromaster 420).

5 TULOSTEN ESITTELY JA ANALYSOINTI

Työssä laadittiin HIPE:lle virtausaluekartat sekä pystysuuntaiselle että vaakasuuntaiselle putkisuuntaukselle. Lisäksi kummankin suuntauksen tapauksessa selvitettiin syntyviä ilma-vesi- kaksifaasivirtauksen virtausmuotoja. Tässä osiossa käydään läpi työn tuloksena saatuja virtausaluekarttoja ja niiden perusteella tehtyjä havaintoja.

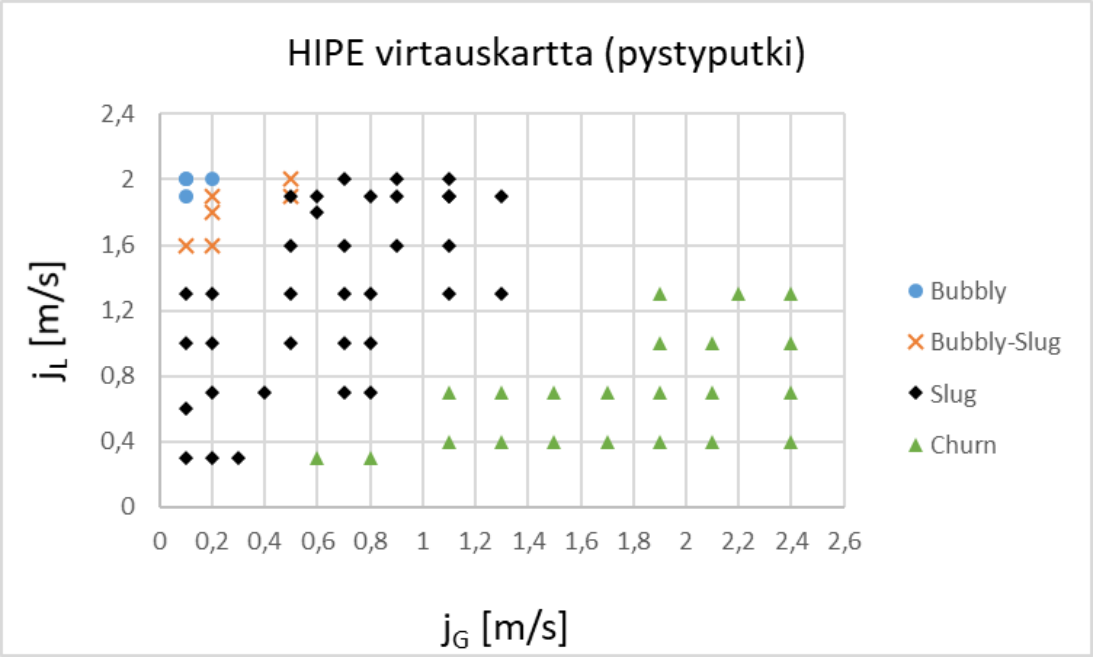
5.1 Virtausaluekartta (pystyputki)

Virtauskartan laadinnassa tutkimusmenetelmänä käytettiin visuaalista havainnointia. Pystysuuntaisen virtauksen mittaustulokset ja suurnopeuskameralla otetut videot toimivat aineistona kartan tekemiselle. Kartan laadinnassa käytiin läpi kaikki 96 videota, joissa kaksifaasivirtauksella oli tietyt ilman ja veden tyhjäputkinopeudet.

Microsoft Exceliin taulukoitiin kunkin mittauksen faasien tyhjöputkinopeudet sekä kaksifaasivirtauksen virtausmuoto. Taulukkoon kirjattiin ensiksi videoista kaikista helpoiten luokiteltavissa olevat tapaukset. Videoiden perusteella helpoiten tunnistettavat virtausmuodot olivat selvästi kupla- tai tulppavirtausta. Koska videoiden perusteella pystyttiin selkeästi havaitsemaan ja luokittelemaan myös näiden kahden virtausmuodon välimuoto, päädyttiin karttaan huomioimaan myös kupla-tulppa- virtaus. Virtaustyyppi luokiteltiin kupla-tulppa- virtaukseksi, jos virtauksessa muodostui keskelle isoja kuplia, jotka eivät kuitenkaan olleet vielä täysin luodinmuotoisia. Virtauksen ollessa puhtaasti kuplavirtausta esiintyi siinä kuplia, mutta ison kuplan muodostumista ei kuitenkaan havaittu. Virtausmuoto luokiteltiin tulppavirtaukseksi, jos videossa pystyi erottamaan lähes luodinmuotoisen kaasukuplan.

Suuriosa mittauksissa kerätystä videodatasta oli vaikea tulkita yksiselitteisesti, jonka vuoksi virtausmuotojen luokittelu yleisiin tyyppeihin ei ollut helppoa. Videoista vaikeimmin luokiteltavat virtausmuodot olivat kirnuamista tai tulppavirtauksen ja kirnuamisen välimuotoa. Työssä päädyttiin luokittelemaan virtaus kirnuamiseksi, jos videossa esiintyi selvästi suuren kaasukuplan pysähtyminen ja selvää virtauksen edestakaista liikettä pystysuunnassa sekä nestefilmin värähtelyä. Muutoin virtausmuoto luokiteltiin tulppavirtauksen ja kirnuamisen välimuodoksi. Tätä välimuotoista virtausta ei kuitenkaan sisällytetty virtausaluekarttaan, koska sille ei voitu määrittää selkeitä

luokittelun mahdollistavia piirteitä (29 mittauspistettä). Näin ollen vain selvästi tunnistettavissa ja luokiteltavissa olevat videot ja niiden mittausdata otettiin kartan tekemisessä huomioon (67 mittauspistettä). Piirretyn kartan perusteella tarkennettiin muutamia luokitteluja suorittamalla virtausmuotojen luokittelu uudestaan niiden eri virtausmuotoja kuvaavien pisteiden osalta, jotka olivat kartassa hyvin lähellä toisiaan. Virtauskartassa y-koordinaattiarvoksi valittiin veden tyhjäputkinopeus ja x-koordinaatiksi ilman tyhjäputkinopeus. Lopullinen videoiden havainnoinnin ja laboratoriossa suoritettujen mittausten avulla piirretty virtausaluekartta on esitetty alla.



Kuva 12. HIPE:n pystysuuntaisen virtauksen virtausaluekartta.

Virtausaluekartasta huomataan toisistaan erottuvia virtausmuotojen alueita, niin kuin kuuluukin. Kuten edellä on mainittu, suurin osa laitteiston virtausmuodoista näyttäisi olevan tulppavirtausta, kirnuamista tai jotain näiden kahden muodon väliltä. Tämän vuoksi tulppavirtaukselle sekä kirnuamiselle saadaan kattavasti pisteitä virtausaluekarttaan. Tulppavirtauksen ja kirnuamisen alueet virtausaluekartassa ovatkin kaikista helpoiten havaittavissa.

Sen sijaan mittauksissa kerätyssä datassa esiintyy hyvin vähän kuplavirtausta, jonka vuoksi tämän virtausmuodon alue ei erotu niin selvästi karttaan. Kuitenkin voidaan todeta, että kuplavirtaus esiintyy hyvin pienillä ilman tyhjäputkinopeuksilla suhteessa

vallitsevaan veden tyhjäputkinopeuteen. Kartassa näkyvien kuplavirtausta edustavien pisteiden kohdalta y-akselin suuntaisesti ylöspäin mentäessä, voidaan ennustaa virtausmuodon olevan edelleen kuplavirtausta. Testilaitteisto kykeni tuottamaan mittauksissa ilman massavirralle vähimmillään arvon M_G = 0,22 g/s, jolla laitteiston laskema ilman tyhjäputkinopeus on j_G = 0,1 m/s. Kuplavirtauksen synnyttämiseen laitteistossa tarvitaan siten vielä pienempiä arvoja ilman tyhjäputkinopeudelle.

Kartasta havaitaan myös, että välimuotoisen kupla-tulppa- virtauksen pisteet asettuvat melko hyvin tulppa- ja kuplavirtausten rajaamien alueiden välille. Tämä osoittaa, että kyseisen välimuotoisen virtausmuodon luokittelu on onnistuttu tekemään melko luotettavasti.

Virtausaluekartan ja suoritettujen mittausten perusteella testilaitteisto ei pysty tuottamaan annulaarista virtausmuotoa lainkaan. Mittauksissa laitteiston suurimmaksi ilman massavirran arvoksi saatiin M_G = 5,67 g/s, jolloin laitteiston laskema ilman tyhjäputkinopeus on j_G = 2,4 m/s. Ilman tyhjäputkinopeus ei ole riittävän suuri, jotta annulaarinen virtausmuoto voitaisiin saada muodostumaan systeemiin. Kaasufaasin ja nesteen välinen leikkausvoima ei siis kasva tarpeeksi suureksi ilman virtausta lisättäessä ja näin ollen nestefaasi ei hajaannu putken reunoille.

Kaiken kaikkiaan yllä oleva virtausaluekartta on laadittu laitteiston tämän hetkisen suorituskyvyn mukaisesti. Sen avulla voidaan ennustaa niitä virtausmuotoja, joita laitteisto kykenee nykyisillä komponenteilla ja asetuksilla tuottamaan. Täytyy kuitenkin muistaa, että virtausmuotojen luokittelu visuaalisen havainnoinnin avulla on subjektiivista. Tällöin voi olla mahdollista, että kartan virtausalueet eivät välttämättä anna täysin eksaktia tietoa laitteistossa syntyvästä virtausmuodosta.

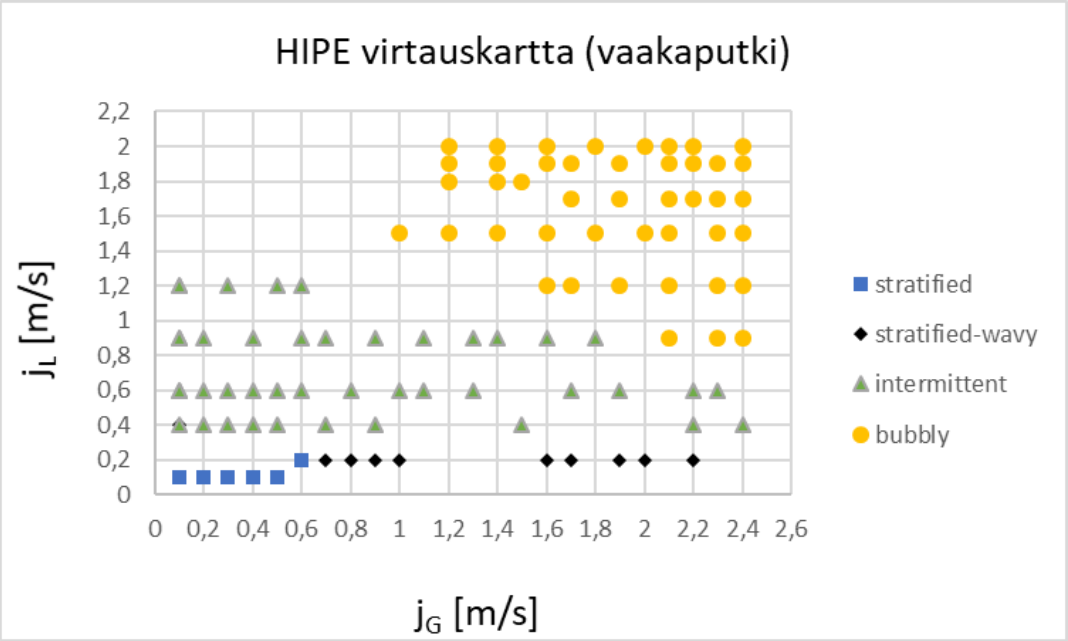
5.2 Virtausaluekartta (vaakaputki)

Vaakaputken virtauskartta laadittiin vastaavalla tavalla käyttämällä visuaalista havainnointia tutkimusmenetelmänä. Suurnopeuskameralla kuvattiin yhteensä 151 videota faasien useilla tyhjäputkinopeuksilla. Virtausmuotojen luokittelu aloitettiin havainnoimalla mittaussarjan videoita. Havainnoinnin perusteella mittausten videoissa esiintyi neljää yleisesti tunnettua virtausmuotoa: kerrostunut virtaus, kerrostunut-

aaltoileva-virtaus, välimuotoinen virtaus ja kuplavirtaus. Tämän jälkeen jokainen mittaussarjan video käytiin tarkemmin läpi ja faasien tyhjäputkinopeudet sekä esiintyvä virtausmuoto taulukoitiin.

Virtauskartasta jätettiin muutamia mittapisteitä huomioimatta, koska joidenkin videoiden tapauksessa virtausmuotoa ei voitu luokitella järkevästi (17 mittauspistettä). Näissä videoissa virtauksesta ei saatu riittävästi informaatiota. Kyseisissä videoissa ei löydetty niitä virtausmuotojen tunnusmerkkejä, joihin luokittelu perustui. Osa mittapisteiden virtausmuodoista luokiteltiin nimikkeellä välimuotoinen-kupla- virtaus (31 mittauspistettä), koska videoista ei voitu erottaa selvästi vain yhtä näistä virtausmuodoista. Välimuotoinen-kupla- virtaus nimikkeellä olevat mittapisteet jätettiin virtauskartasta huomioimatta.

Virtausmuoto luokiteltiin kerrostuneeksi virtaukseksi, jos neste- ja kaasufaasit esiintyivät putkessa erillisinä kerroksina. Jos putken alaosassa olevan vesikerroksen pinnassa esiintyi selvää nesteen aaltoliikettä virtauksen suunnassa, luokiteltiin virtausmuoto kerrostunut-aaltoileva- virtaukseksi. Virtaustyyppi luokiteltiin välimuotoiseksi virtaukseksi, kun nesteaallot yltivät koko putken korkeudelle ja saivat aikaan nestetappien muodostumisen. Syntyneen nestetapin jälkeen havaittiin muodostuvan kaasutulppa. Virtausmuodossa nestetappi ja kaasutulppa esiintyivät jaksollisesti peräkkäin. Kun putkessa havaittiin huomattava määrä pienehköjä kuplia ja virtauksessa ei enää selvästi pystytty erottamaan jaksollisia nestetappeja tai kaasutulppia, luokiteltiin virtaus kuplavirtaukseksi. Alla on esitetty mittausten ja luokittelujen perusteella tehty virtausaluekartta.



Kuva 13. HIPE:n vaakasuuntaisen virtauksen virtausaluekartta.

Virtausaluekartassa voidaan erottaa eri virtausmuotojen esiintymisalueita. HIPE:n vaakasuuntaisessa virtauksessa esiintyy selvästi eniten välimuotoista virtausta sekä kuplavirtausta. Pienillä aineiden virtausnopeuksilla havaitaan myös kerrostunutta sekä kerrostunut-aaltoileva- virtausta. Huomataan, ettei HIPE:ssä esiinny annulaarista virtausta myöskään vaakasuuntaisessa putkessa. Ilman tyhjäputkinopeus ei ole riittävän suuri annulaarisen virtauksen muodostumiseen.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Pystysuuntaisen virtauksen virtausaluekartan laadinnan yhteydessä voitiin havaita, että HIPE pystyy tämän hetkisillä asetuksilla tuottamaan lähinnä tulppavirtausta ja kirnuamista. Sillä ei nykyasetuksilla voida tuottaa kovinkaan helposti puhdasta kuplavirtausta, koska laitteistoon ei voi tällä hetkellä asettaa hyvin pieniä ilman massavirtoja. LabView- ohjelmalla ilman massavirraksi voidaan asettaa vähimmillään 0,1 g/s ja seinässä oleva ilmamassamittari sekä ohjelmisto näyttää tällöin arvoa 0 g/s. Asettamalla LabView- ohjelmistolla ilman massavirran arvoksi 0,2 g/s, saadaan ilmamassamittarin mukainen vähimmäisarvo 0,17… 0,22 g/s massavirralle. Kaasufaasin tyhjäputkinopeus on tällöin 0,1 m/s, joka mahdollistaa kuplavirtauksen muodostumisen, kun nestefaasin tyhjäputkinopeus on suurin mahdollinen eli 1,9 … 2,0 m/s. Jotta testilaitteiston avulla voitaisiin kerätä tutkimusta tai opintojaksoa varten mittausdataa liittyen kuplavirtaukseen, tulisi ilman massavirtaa pystyä säätämään pienemmäksi. Tällöin laitteistoa tulisi säätää LabView- ohjelmalla siten, että pienempien massavirtojen tuottaminen olisi mahdollista. Jos tämä ei ole mahdollista, tulee ilman suihkutusjärjestelmää päivittää siten, että se pystyy tuottamaan myös vähäisiä (alle 0,2 g/s) ilman massavirtoja. Lisäksi ohjelmiston tarkkuutta voitaisiin säätää suuremmaksi, jotta se pystyisi laskemaan pieniä (alle 0,1 m/s) ilman tyhjäputkinopeuden arvoja.

Vaakasuuntaisen putken tapauksessa HIPE:ssä esiintyy selvästi eniten välimuotoista virtausta sekä kuplavirtausta. Pienillä ilman ja veden virtausnopeuksilla saadaan myös aikaan kerrostunutta virtausta sekä kerrostunut-aaltoileva- virtausta. Systeemillä voitaisiin saada laajemmin muodostumaan edellä mainittua kahta virtausmuotoa, jos ilmanvirtausta pystyttäisiin säätämään vielä pienemmäksi.

Testilaitteisto ei pysty muodostamaan annulaarista virtausmuotoa kummankaan putkisuuntauksen tapauksessa, sillä laite ei pysty tuottamaan tarpeeksi suurta ilman tyhjäputkinopeutta. Ilman tyhjäputkinopeus on nykyisillä asetuksilla enintään 2,4 m/s, jolloin ilman massavirta on mittarin ja LabView- ohjelmiston mukaan 5,67 g/s. Mikäli laitteistolla halutaan tuottaa annulaarista virtausta, tulee koelaitteiston ilmavirrantuottokykyä parantaa, jotta voidaan saavuttaa suurempia ilman tyhjäputkinopeuksia. Ilman massavirtaa voidaan saada suuremmaksi asentamalla laitteistoon nykyistä tehokkaampi ilman suihkutusjärjestelmä. Tällöin olisi myös syytä

selvittää nykyisen systeemin rasituksen kestokyky, jotta laitteisto ei menisi rikki tehtyjen muutosten jälkeen. Vaakasuuntaisen putken mittauksissa jo nykyiset suurimmat massavirtojen arvot faaseille saivat aikaan voimakasta laitteiston värähtelyä. Lisäksi nykyinen ilmamassamittari tulisi päivittää parempaan, jotta se pystyy rekisteröimään suurempia ilman massavirran arvoja.

Kuplavirtaus sekä annulaarinen virtaus ovat keskeisiä pystysuuntaisen ilma-vesi kaksifaasivirtauksen virtausmuotoja. HIPE:n tarkoitus on pystyä tuottamaan erilaisia virtausmuotoja sekä tutkimuksen että opintojaksojen tarpeisiin. Lisäksi laitteiston tarkoituksena on myös havainnollistaa syntyviä virtausmuotoja. Jotta näihin laitteiston tarkoitusperiin päästäisiin, tulisi koelaitteistoon tehdä muutoksia etenkin ilman virtauksen säädön osalta. Nykyinen asetelma mahdollistaa pystysuuntaisessa ylöspäin menevässä virtauksessa lähinnä tulppavirtauksen ja kirnuamisen muodostumisen laitteistossa. Vaakasuuntaisessa virtauksessa annulaarisella virtauksella on taas tärkeä merkitys sen ollessa haluttu stabiili virtausmuoto kaksifaasilaitteistoissa. Olisi hyvä, jos koelaitteisto pystyisi muodostamaan vaakasuuntaisessa virtauksessa annulaarista kaksifaasivirtausta.

Vaikka suurin osa mittausdatan virtausmuodoista oli vaikeasti luokiteltavissa yleisesti tunnettuihin virtausmuotoihin, saatiin pystyvirtauksen virtausaluekartta tehtyä käyttämällä vain selvästi erottuvia virtaustyyppejä. Vaikeasti luokiteltavissa olevat transitiomuodot jätettiin huomioimatta kartasta, jolloin siitä saatiin havainnollisempi.

Vaakasuuntaisen putken virtausaluekartta saatiin tehtyä hieman helpommin, koska suurin osa kerätystä mittausaineistosta pystyttiin hyödyntämään. Virtausmuodoille löydettiin selkeitä tunnusmerkkejä luokittelua varten, joiden perusteella luokittelu eri muotoihin onnistui hyvin. Virtausaluekartasta jätettiin huomioimatta mittaussarjan epäselvät mittapisteet sekä välimuotoinen-kupla- transitiomuodot, jotta kartasta saatiin luotettavampi.

Virtauskarttoja voidaan käyttää tämän hetkisen laitteiston operoimisen yhteydessä. Jos koelaitteistoon tehdään edellä mainittuja muutoksia, tulee virtausaluekartat laatia uudestaan vastaamaan uutta systeemiä.

7 YHTEENVETO

Kaksifaasivirtaus on tärkeä ilmiö monissa teollisuuden sovelluksissa. Ydinvoimatekniikassa etenkin vesi-vesihöyry- virtauksella on suuri merkitys reaktoriturvallisuudessa, koska lämmönsiirto reaktorista jäähdytteeseen on vahvasti riippuvainen kyseisen kaksifaasivirtauksen virtausmuodoista. Epäedullinen virtausmuoto heikentää konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen arvoa, joka johtaa jäähdytyksen huononemiseen.

Neste-kaasu- kaksifaasivirtaus saa eri muotoja pysty- ja vaakasuuntaisessa putkessa. Pystyputkessa muodot poikkeavat virtauksen edetessä joko ylös tai alas. Painovoimalla ja faasien välisellä leikkausvoimalla on suuri vaikutus virtausmuotoihin. Ylöspäin etenevässä neste-kaasu- virtauksessa havaitaan kaasuvirtauksen suuruutta lisättäessä kupla- ja tulppavirtausta, kirnuamista sekä annulaarisen virtauksen eri variaatioita. Alaspäin suuntautuvan virtauksen muodot ovat lähes samankaltaisia, lukuun ottamatta syntyviä kalvomaisia virtausmuotoja. Painovoiman merkittävämpi vaikutus saa vaakasuuntaisessa putkessa aikaan eri virtausmuotoja verrattuna pystyputkeen. Vaakasuuntaisen virtauksen muotoja ovat kerrostunut-, kerrostunut-aaltoileva-, välimuotoinen- ja kuplavirtaus sekä annulaarinen virtaus.

Virtausaluekartta on xy-tasoon laadittu piirros, jossa erottuu eri virtausmuotojen esiintymisalueita. Virtausaluekartat helpottavat virtausmuotojen ennustamista, ja niissä käytetään monia vaihtoehtoisia koordinaattiarvoja. Kirjallisuudessa esitetyt virtausaluekartat perustuvat varsin usein empiirisiin kokeisiin. Yleispätevää virtausaluekarttaa on vaikea laatia, sillä virtausmuodot ovat riippuvaisia lukuisista tekijöistä. Muu muassa kaksifaasisysteemin suuntaus ja geometria, neste- ja kaasufaasien aineominaisuudet (tiheys, pintajännitys ja viskositeetti), laitteiston käyttöolosuhteet (paine ja lämpötila) sekä faasien virtausnopeudet vaikuttavat syntyviin virtausmuotoihin. On järkevää laatia kaksifaasilaitteistolle laitespesifinen virtausaluekartta, koska kirjallisuuden kartat eivät anna tarkkaa tietoa systeemin virtausmuodoista.

Kandidaatintyössä tehtiin ydintekniikan laboratorion kaksifaasivirtauskoelaitteistolle virtausaluekartat. Laboratoriossa suoritettiin mittaussarjat sekä pystysuuntaiselle että vaakasuuntaiselle ilma-vesi- kaksifaasivirtaukselle. Mittauksissa suurnopeuskameralla kuvattiin valittua laitteiston putken testikohtaa ja yksittäisten mittausten parametrit (ilman

massavirta, veden tilavuusvirta sekä faasien tyhjäputkinnopeudet) kirjattiin ylös. Mittausaineiston videot tulkittiin ja virtausmuodot luokiteltiin kirjallisuudessa mainittuihin yleisiin muotoihin. Luokittelujen ja mittauksissa kerättyjen faasien tyhjäputkinopeuksien avulla laadittiin putkisuuntauksille virtausaluekartat.

Virtausaluekartta HIPE:lle saatiin tehtyä onnistuneesti pystysuuntaiselle virtaukselle laitteiston nykyisillä komponenteilla ja asetuksilla. Työn perusteella huomattiin, että nykyisen laitteiston ilma-vesi- kaksifaasivirtauksen virtausmuodot ovat melko yksipuolisia. Laitteisto kykenee tuottamaan nykyisellä kokoonpanolla lähinnä tulppavirtausta ja kirnuamista. Muutoksia laitteeseen tai sen asetuksiin olisi tehtävä etenkin ilmavirtauksen säädön suhteen. Ilman massavirtaa tulisi saada suuremmaksi, jotta koelaite pystyisi tuottamaan annulaarista virtausta. Toisaalta ilmavirtausta pitäisi pystyä ajamaan laitteeseen myös hyvin pienillä massavirroilla, jotta saataisiin enemmän tietoa puhtaasta kuplavirtauksesta.

Virtausaluekartta laadittiin onnistuneesti myös vaakasuuntaiselle virtaukselle. HIPE:n vaakasuuntaisessa virtauksessa esiintyy eri virtausmuotoja kattavammin kuin pystyvirtauksen tapauksessa. Huomattiin, ettei myöskään vaakasuuntaisella putkisuuntauksella havaita annulaarisen virtausmuodon muodostumista laitteistossa, koska HIPE ei pysty tuottamaan riittävän suurta ilman tyhjäputkinopeutta. Mahdollistamalla ilman suurempi massavirta laitteistossa, saadaan myös vaakasuuntaisessa virtauksessa aikaan annulaarinen virtausmuoto. Mahdolliset muutokset nykyisessä systeemissä täytyy huomioida, jolloin putkisuuntauksille tulee laatia uudet virtausaluekartat.

LÄHDELUETTELO

Bergles et al. 1981. Two-Phase Flow and Heat Transfer in the Power and Process Industries. Washington. Hemisphere Publishing Corporation. 707 s.

Brennen Christopher E. 2005. Fundamentals of Multiphase Flows. California Institute of Technology. Pasadena, California. Cambridge University Press. 410 s. ISBN 0521 848040

Chisholm D. 1983. Two-Phase Flow in Pipelines and Heat Exchangers. New York. Longman Inc. 304 s.

Ghiaasian S. Mostafa. 2008. Two-Phase Flow, Boiling and Condensation in Conventional and Miniature Systems. New York. Cambridge University Press. 613 s. ISBN-13 978-0-511-48039-3.

Hewitt F. G & Hall-Taylor S. N. 1970. Annular Two-Phase Flow. Edinburgh. Pegamon Press. 310 s.

Hewitt F. G. 1978. Measurement of Two Phase Flow Parameters. New York. Academic Press Inc. 287 s. ISBN 0-12-346260-6

Krasulin. Sergey. 2016. Development of Laboratory Exercises for Basic Nuclear Thermal Hydraulics Measurements. Diplomityö. Lappeenranta University of Technology. LUT School of Energy Systems. Degree Programme in Energy Technology. Lappeenranta. 82 s.

Liles R. Dennis. 1981. Two-Phase Flow. Los Alamos Science. Vol 3. 26-35 s.

Matsubara Hiroaki & Naito Kiyoshi. 2011. Effect of Liquid Viscosity on Flow Patterns of Gas–Liquid Two-Phase Flow in a Horizontal Pipe. International Journal of Multiphase Flow. Vol 37. Nro 10. 1277-1281 s.

Nuclear-Power.net. 2019. Two-Phase Fluid Flow. [Verkkoaineisto] [Viitattu 1.4.2019]. Saatavissa: https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/fluid-dynamics/two-phase-fluid-flow/

Tentner Adrian et al. 2015. Modeling of Two-Phase Flow in a BWR Fuel Assembly with a Highly-Scalable CFD Code. 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16). Argonne National Laboratory. Illinois, USA. 1966-1979 s. ISBN: 978-0-89448-722-4.

Thome John R. 2007. Engineering Databook III. Chapter 12 Two-Phase Flow Patterns. Lausanne. Wolverine Tube Inc. 34 s.

Todreas E. Neil & Kazimi S. Mujid. 1990 Nuclear Systems I Thermal Hydraulic Fundamentals. New York. Hemisphere Publishing Corporation. 705 s. ISBN 0-89116-935-0.

Wallis Graham B. 1969. One-dimensional Two-phase Flow. New York. McGraw-Hill Inc. 408 s.

Ylönen, A. & Hyvärinen, J. 2015. Study of Twophase Pipe Flow Using the Axial Wiremesh Sensor. In: Proceedings of the 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16), Chicago, U.S., August 30 - September 4. 797-806 s.

LIITE 1. MITTAUSPÖYTÄKIRJA (PYSTYVIRTAUS) 1

Mittauspöytäkirja HIPE
Päivämäärä: 11.2.2019 klo 12:32 → klo 15:31
Mittausten suorittaja: Aleksi Valkeapää

LabView-ohjelman arvot

$T_{V,alku}$ [°C]	$T_{V,loppu}$ [°C]	p_{atm} [bar]
20	20	1.28

Mittaus nro.	M_L [kg/s]	M_G [g/s]	j_L [m/s]	j_G [m/s]
1	0.5	0.4	0.3	0.2
2	0.6	0.8	0.3	0.3
3	0.7	1.5	0.3	0.6
4	0.7	2	0.3	0.8
5	0.7	3.06	0.4	1.3
6	0.7	2.55	0.4	1.1
7	0.7	3.46	0.4	1.5
8	0.7	3.97	0.4	1.7
9	0.8	4.49	0.4	1.9
10	0.8	5.05	0.4	2.1
11	1.3	0.53	0.7	0.2
12	1.3	0.98	0.7	0.4
13	1.3	1.59	0.7	0.7
14	1.3	1.99	0.7	0.8
15	1.3	2.52	0.7	1.1
16	1.3	3.07	0.7	1.3
17	1.4	3.51	0.7	1.5
18	1.4	4.0	0.7	1.7
19	1.4	4.47	0.7	1.9
20	1.4	5.05	0.7	2.1
21	1.9	0.53	1.0	0.2
22	1.9	1.08	1.0	0.5
23	1.9	1.59	1.0	0.7
24	1.9	1.99	1.0	0.8
25	1.9	3.03	1.0	1.3
26	1.9	3.61	1.0	1.5
27	2	3.99	1.0	1.5
28	2	4.03	1.0	1.7
29	2	4.52	1.0	1.9
30	2	5.08	1.0	2.1
31	2.5	0.53	1.3	0.2
32	2.5	1.08	1.3	0.5
33	2.5	1.59	1.3	0.7
34	2.5	1.99	1.3	0.8
35	2.5	2.53	1.3	1.1
36	2.5	3.07	1.3	1.3
37	2.5	3.52	1.3	1.5

38	2.5	4.04	1.3	1.7
39	2.5	4.51	1.3	1.9
40	2.5	5.14	1.3	2.2
41	3.1	0.53	1.6	0.2
42	3.1	1.08	1.6	0.5
43	3.1	1.59	1.6	0.7
44	3.1	2.1	1.6	0.9
45	3.1	2.6	1.6	1.1
46	3.1	3.11	1.6	1.3
47	3.1	3.74	1.6	1.6
48	3.1	4.15	1.6	1.8
49	3.1	4.83	1.6	2.0
50	3.1	5.56	1.6	2.3
51	3.6	0.54	1.8	0.2
52	3.6	1.08	1.9	0.5
53	3.6	1.99	1.9	0.8
54	3.6	2.61	1.9	1.1
55	3.6	3.16	1.9	1.3
56	3.6	3.71	1.8	1.6
57	3.6	4.25	1.8	1.8
58	3.6	4.8	1.8	2.0
59	3.6	5.34	1.8	2.3
60	3.6	1.39	1.8	0.6

Mittareiden arvot

Mittaus nro.	Q_L [l/s]	M_G [g/s]
1	0.55	0.46
2	0.60	0.82
3	0.67	1.5
4	0.70	2.0
5	0.73	3.07
6	0.72	2.57
7	0.74	3.48
8	0.75	4.02
9	0.75	4.52
10	0.77	5.07
11	1.3	0.55
12	1.31	1.0
13	1.34	1.6
14	1.35	2.0
15	1.36	2.53
16	1.36	3.09
17	1.36	3.53
18	1.37	4.06
19	1.38	4.51
20	1.38	5.08
21	1.92	0.55

22	1.94	1.1
23	1.95	1.6
24	1.96	2.0
25	1.97	3.05
26	1.96	2.63
27	1.97	3.5
28	1.97	4.1
29	1.97	4.57
30	1.98	5.0
31	2.52	0.55
32	2.53	1.1
33	2.54	1.6
34	2.55	2.0
35	2.55	2.55
36	2.56	3.1
37	2.56	3.54
38	2.57	4.1
39	2.68	4.56
40	2.56	5.2
41	3.1	0.55
42	3.1	1.1
43	3.1	1.6
44	3.1	2.1
45	3.1	2.6
46	3.1	3.14
47	3.1	3.77
48	3.11	4.2
49	3.12	4.86
50	3.13	5.59
51	3.62	0.55
52	3.63	1.1
53	3.63	2.0
54	3.65	2.64
55	3.63	3.19
56	3.63	3.75
57	3.61	4.3
58	3.62	4.84
59	3.63	5.34
60	3.63	1.41

LIITE 2. MITTAUSPÖYTÄKIRJA (PYSTYVIRTAUS) 2

Mittauspöytäkirja HIPE
Päivämäärä: 12.3.19 klo 13.27 → 14.20
Mittausten suorittaja: Aleksi Valkeapää

LabView-ohjelman arvot

$T_{V,alku}$ [°C]	$T_{V,loppu}$ [°C]	p_{atm} [bar]
20	21	1.24

Mittaus nro.	M_L [kg/s]	M_G [g/s]	j_L [m/s]	j_G [m/s]
61	3.7	0.533	1.9	0.2
62	3.7	1.08	1.9	0.5
63	3.7	1.49	1.9	0.6
64	3.7	2.09	1.9	0.9
65	3.7	2.61	1.9	1.1
66	3.7	3.08	1.9	1.3
67	3.7	3.51	1.9	1.5
68	3.7	4.1	1.9	1.7
69	3.7	4.6	1.9	2.0
70	3.7	5.4	1.9	2.3
71	3.8	0.53	2.0	0.2
72	3.8	1.08	2.0	0.5
73	3.8	1.59	2.0	0.7
74	3.8	2.09	2.0	0.9
75	3.8	2.68	2.0	1.1
76	3.8	3.13	2.0	1.3
77	3.8	3.64	2.0	1.5
78	3.8	4.12	2.0	1.7
79	3.8	4.47	1.9	1.9
80	3.8	5.28	1.9	2.2
81	0.5	0.219	0.3	0.1
82	1.3	0.22	0.6	0.1
83	1.9	0.22	1.0	0.1
84	2.5	0.22	1.3	0.1
85	3.1	0.22	1.6	0.1
86	3.6	0.22	1.9	0.1
87	3.3	0.22	2.0	0.1

88	3.9	0.22	2.0	0.9
89	0.8	5.69	0.4	2.4
90	1.4	5.67	0.7	2.4
91	2.0	5.65	1.0	2.4
92	2.6	5.65	1.3	2.4
93	3.1	5.65	1.6	2.4
94	3.6	5.65	1.8	2.4
95	3.8	5.66	1.9	2.4
96	3.8	5.67	1.9	2.4
97				
98				
99				
100				

Mittareiden arvot

Mittaus nro.	Q_L [l/s]	M_G [g/s]
61	3.76	0.55
62	3.76	1.1
63	3.76	1.51
64	3.76	2.11
65	3.76	2.64
66	3.76	3.11
67	3.76	3.54
68	3.76	4.14
69	3.76	4.64
70	3.76	5.44
71	3.86	0.55
72	3.86	1.1
73	3.86	1.6
74	3.85	2.11
75	3.85	2.71

76	3.86	3.16
77	3.85	3.67
78	3.83	4.17
79	3.8	4.51
80	3.8	5.33
81	0.50	0.23
82	1.28	0.23
83	1.91	0.23
84	2.52	0.23
85	3.1	0.23
86	3.67	0.23
87	3.87	0.23
88	3.87	0.23
89	0.78	5.72
90	1.4	5.7
91	1.98	5.7
92	2.53	5.7
93	3.1	5.7
94	3.63	5.7
95	3.8	5.7
96	3.8	5.7
97		
98		
99		
100		

LIITE 3. MITTAUSPÖYTÄKIRJA (VAAKAVIRTAUS) 1

Mittauspöytäkirja HIPE
Päivämäärä: 8.4.19 klo: 11:21 → 14:13
Mittausten suorittaja: Aleksi Valkeapää

LabView-ohjelman arvot

$T_{V,alku}$ [°C]	$T_{V,loppu}$ [°C]	p_{atm} [bar]
19	19	1.05

Mittaus nro.	M_L [kg/s]	M_G [g/s]	j_L [m/s]	j_G [m/s]
1	0.1	0.195	0.1	0.1
2	0.1	0.345	0.1	0.1
3	0.1	0.425	0.1	0.2
4	0.2	0.601	0.1	0.3
5	0.2	0.88	0.1	0.4
6	0.3	1.18	0.1	0.5
7	0.3	1.38	0.2	0.6
8	0.3	1.68	0.2	0.7
9	0.3	1.983	0.2	0.8
10	0.3	2.182	0.2	0.9
11	0.3	2.38	0.2	1
12	0.4	2.68	0.2	1.1
13	0.4	3.15	0.2	1.3
14	0.4	3.39	0.2	1.4
15	0.4	3.81	0.2	1.6
16	0.4	4.12	0.2	1.7
17	0.4	4.45	0.2	1.9
18	0.4	4.81	0.2	2
19	0.4	5.3	0.2	2.2
20	0.4	5.63	0.2	2.4
21	0.8	0.19	0.4	0.1
22	0.8	0.332	0.4	0.1
23	0.8	0.43	0.4	0.2
24	0.8	0.69	0.4	0.3
25	0.8	0.97	0.4	0.4
26	0.8	1.18	0.4	0.5
27	0.8	1.48	0.4	0.6
28	0.8	1.68	0.4	0.7
29	0.8	1.98	0.4	0.8
30	0.8	2.18	0.4	0.9
31	0.8	2.37	0.4	1
32	0.8	2.67	0.4	1.1
33	0.8	3.1	0.4	1.3
34	0.8	3.53	0.4	1.5
35	0.8	3.8	0.4	1.6
36	0.8	4.14	0.4	1.7
37	0.8	4.45	0.4	1.9

38	0.8	4.9	0.4	2.1
39	0.8	5.2	0.4	2.2
40	0.8	5.66	0.4	2.4
41	1.2	0.185	0.6	0.1
42	1.1	0.34	0.6	0.1
43	1.1	0.51	0.6	0.2
44	1.2	0.68	0.6	0.3
45	1.2	0.97	0.6	0.4
46	1.1	1.22	0.6	0.5
47	1.1	1.49	0.6	0.6
48	1.1	1.88	0.6	0.8
49	1.1	2.34	0.6	1
50	1.1	2.69	0.6	1.1
51	1.1	3.14	0.6	1.3
52	1.1	3.54	0.6	1.5
53	1.1	4.0	0.6	1.7
54	1.1	4.4	0.6	1.9
55	1.1	4.85	0.6	2
56	1.1	5.17	0.6	2.2
57	1.1	5.43	0.6	2.3
58	1.1	5.66	0.6	2.4
59	1.8	0.2	0.9	0.1
60	1.8	0.33	0.9	0.1

Mittareiden arvot

Mittaus nro.	Q_L [l/s]	M_G [g/s]
1	0.12	0.209
2	0.13	0.36
3	0.17	0.45
4	0.22	0.62
5	0.24	0.91
6	0.27	1.21
7	0.29	1.41
8	0.32	1.71
9	0.33	2.0
10	0.34	2.2
11	0.37	2.4
12	0.43	2.3
13	0.47	3.19
14	0.45	3.42
15	0.46	3.88
16	0.44	4.2
17	0.45	4.5
18	0.46	4.9
19	0.45	5.3
20	0.45	5.68
21	0.81	0.2

22	0.81	0.36
23	0.81	0.45
24	0.81	0.71
25	0.82	1.0
26	0.82	1.2
27	0.83	1.5
28	0.82	1.71
29	0.82	2.0
30	0.83	2.2
31	0.82	2.4
32	0.82	2.7
33	0.82	3.13
34	0.81	3.55
35	0.81	3.85
36	0.81	4.2
37	0.81	4.5
38	0.81	4.92
39	0.81	5.22
40	0.81	5.7
41	1.14	0.195
42	1.15	0.35
43	1.15	0.535
44	1.15	0.71
45	1.15	1.0
46	1.15	1.3
47	1.15	1.51
48	1.15	1.91
49	1.15	2.37
50	1.14	2.73
51	1.14	3.17
52	1.14	3.58
53	1.14	4.07
54	1.14	4.46
55	1.14	4.9
56	1.13	5.2
57	1.13	5.47
58	1.12	5.7
59	1.8	0.21
60	1.8	0.35

LIITE 4. MITTAUSPÖYTÄKIRJA (VAAKAVIRTAUS) 2

Mittauspöytäkirja HIPE
Päivämäärä: 10.4.19 klo 10.01 → 12:23
Mittausten suorittaja: Aleksi Vaikeslahti

LabView-ohjelman arvot

$T_{V,alku}$ [°C]	$T_{V,loppu}$ [°C]	p_{atm} [bar]
20	21	1.03

Mittaus nro.	M_L [kg/s]	M_G [g/s]	j_L [m/s]	j_G [m/s]
1 61	1.8	0.42	0.9	0.2
2 62	1.8	0.87	0.9	0.4
3 63	1.8	1.38	0.9	0.6
4 64	1.8	1.57	0.9	0.7
5 65	1.8	2.11	0.9	0.9
6 66	1.8	2.57	0.9	1.1
7 67	1.8	3.12	0.9	1.3
8 68	1.8	3.31	0.9	1.4
9 69	1.8	3.75	0.9	1.6
10 70	1.8	4.2	0.9	1.8
11 71	1.8	4.7	0.9	2
12 72	1.8	5.03	0.9	2.1
13 73	1.8	5.34	0.9	2.3
14 74	1.7	5.62	0.9	2.4
15 75	2.4	0.17	1.2	0.1
16 76	2.4	0.33	1.2	0.1
17 77	2.4	0.77	1.2	0.3
18 78	2.4	1.28	1.2	0.5
19 79	2.4	1.38	1.2	0.6
20 80	2.4	1.96	1.2	0.8
21 81	2.4	2.37	1.2	1
22 82	2.4	2.89	1.2	1.2
23 83	2.4	3.25	1.2	1.4
24 84	2.3	3.79	1.2	1.6
25 85	2.3	4.02	1.2	1.7
26 86	2.3	4.92	1.2	1.9
27 87	2.3	4.92	1.2	2.1
28 88	2.3	5.35	1.2	2.3
29 89	2.3	5.64	1.2	2.4
30 90	3	0.17	1.5	0.1
31 91	3	0.32	1.5	0.1
32 92	3	0.77	1.5	0.3
33 93	3	0.97	1.5	0.4
34 94	3	1.48	1.5	0.6
35 95	3	1.94	1.5	0.8
36 96	2.9	2.37	1.5	1
37 97	2.9	2.91	1.5	1.2

38	98	2.9	3.38	1.5	1.4
39	99	2.9	3.8	1.5	1.6
40	100	2.9	4.24	1.5	1.8
41	101	2.9	4.67	1.5	2
42	102	2.9	5.0	1.5	2.1
43	103	2.9	5.33	1.5	2.3
44	104	2.9	5.65	1.5	2.4
45	105	3.5	0.17	1.8	0.1
46	106	3.5	0.33	1.8	0.1
47	107	3.5	0.77	1.8	0.3
48	108	3.5	1.28	1.8	0.5
49	109	3.4	1.68	1.8	0.7
50	110	3.4	1.88	1.8	0.8
51	111	3.4	2.34	1.8	1
52	112	3.4	2.82	1.8	1.2
53	113	3.4	3.36	1.8	1.4
54	114	3.4	3.55	1.8	1.5
55	115	3.4	3.92	1.7	1.7
56	116	3.4	4.4	1.7	1.9
57	117	3.4	4.85	1.7	2.1
58	118	3.4	5.23	1.7	2.2
59	119	3.4	5.43	1.7	2.3
60	120	3.4	5.65	1.7	2.4

Mittareiden arvot

Mittaus nro.		Q_L [l/s]	M_G [g/s]
1	61	1.78	0.435
2	62	1.79	0.9
3	63	1.79	1.41
4	64	1.79	1.61
5	65	1.79	2.14
6	66	1.78	2.6
7	67	1.78	3.16
8	68	1.78	3.37
9	69	1.78	3.78
10	70	1.76	4.27
11	71	1.75	4.73
12	72	1.76	5.05
13	73	1.75	5.42
14	74	1.73	5.67
15	75	2.39	0.2
16	76	2.39	0.35
17	77	2.39	0.8
18	78	2.37	1.31
19	79	2.37	1.41
20	80	2.37	1.99
21	81	2.37	2.41

22	82	2.36	2.93
23	83	2.36	3.28
24	84	2.34	3.82
25	85	2.33	4.09
26	86	2.34	4.48
27	87	2.34	5.0
28	88	2.33	5.41
29	89	2.32	5.7
30	90	2.98	0.2
31	91	2.97	0.35
32	92	2.97	0.8
33	93	2.96	1.0
34	94	2.95	1.51
35	95	2.95	1.98
36	96	2.93	2.41
37	97	2.93	2.96
38	98	2.93	3.44
39	99	2.92	3.87
40	100	2.91	4.3
41	101	2.91	4.7
42	102	2.91	5.05
43	103	2.92	5.37
44	104	2.92	5.7
45	105	3.48	0.19
46	106	3.47	0.35
47	107	3.48	0.8
48	108	3.47	1.31
49	109	3.43	1.71
50	110	3.44	1.91
51	111	3.44	2.38
52	112	3.44	2.86
53	113	3.44	3.39
54	114	3.43	3.6
55	115	3.41	3.98
56	116	3.41	4.45
57	117	3.41	4.9
58	118	3.42	5.3
59	119	3.41	5.5
60	120	3.42	5.71

LIITE 5. MITTAUSPÖYTÄKIRJA (VAAKAVIRTAUS) 3

Mittauspöytäkirja HIPE

Päivämäärä: 9.4.19 klo 11:15 → 13:36

Mittausten suorittaja: Aleksi Valkeapää

LabView-ohjelman arvot

$T_{V,alku}$ [°C]	$T_{V,loppu}$ [°C]	p_{atm} [bar]
19	21	1.06

Mittaus nro.	M_L [kg/s]	M_G [g/s]	j_L [m/s]	j_G [m/s]
1 121	3.8	0.2	2	0.1
2 122	3.8	0.34	2	0.1
3 123	3.8	0.77	2	0.3
4 124	3.8	1.07	2	0.5
5 125	3.8	1.48	2	0.6
6 126	3.8	1.98	2	0.8
7 127	3.8	2.38	2	1
8 128	3.8	2.83	1.9	1.2
9 129	3.8	3.31	1.9	1.4
10 130	3.8	3.67	1.9	1.6
11 131	3.8	3.91	1.9	1.7
12 132	3.8	4.45	1.9	1.9
13 133	3.8	4.86	1.9	2.1
14 134	3.8	5.21	1.9	2.2
15 135	3.8	5.35	1.9	2.3
16 136	3.8	5.61	1.9	2.4
17 137	3.8	0.17	2	0.1
18 138	3.8	0.33	2	0.1
19 139	3.8	0.77	2	0.3
20 140	3.8	1.07	2	0.5
21 141	3.8	1.47	2	0.6
22 142	3.8	1.87	2	0.8
23 143	3.8	2.46	2	1
24 144	3.8	2.8	2	1.2
25 145	3.8	3.25	2	1.4
26 146	3.8	3.7	2	1.6
27 147	3.8	4.15	2	1.8
28 148	3.8	4.78	2	2
29 149	3.8	5.3	2	2.2
30 150	3.9	4.96	2	2.1
31 151	3.8	5.66	2	2.4
32				
33				
34				
35				
36				
37				

38				
39				
40				
41				
42				
43				
44				
45				
46				
47				
48				
49				
50				
51				
52				
53				
54				
55				
56				
57				
58				
59				
60				

Mittareiden arvot

Mittaus nro.	Q_L [l/s]	M_G [g/s]
1 121	3.81	0.2
2 122	3.81	0.34
3 123	3.84	0.8
4 124	3.84	1.1
5 125	3.83	1.51
6 126	3.83	2.0
7 127	3.82	2.41
8 128	3.82	2.87
9 129	3.82	3.33
10 130	3.82	3.69
11 131	3.84	4.0
12 132	3.81	4.5
13 133	3.81	4.9
14 134	3.82	5.3
15 135	3.81	5.43
16 136	3.76	5.63
17 137	3.82	0.2
18 138	3.83	0.35
19 139	3.83	0.8
20 140	3.83	1.1
21 141	3.83	1.51

22	142	3.83	1.9
23	143	3.84	2.5
24	144	3.83	2.85
25	145	3.82	3.3
26	146	3.81	3.73
27	147	3.82	4.2
28	148	3.81	4.83
29	149	3.81	5.35
30	150	3.81	5.0
31	151	3.82	5.73
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			
41			
42			
43			
44			
45			
46			
47			
48			
49			
50			
51			
52			
53			
54			
55			
56			
57			
58			
59			
60			

LIITE 6. EXCEL TAULUKKO (PYSTYVIRTAUS)

Mittaus nro.	M_L [kg/s]	M_G [g/s]	j_L [m/s]	j_G [m/s]	Muoto
1	0,5	0,4	0,3	0,2	slug
2	0,6	0,8	0,3	0,3	slug
3	0,7	1,5	0,3	0,6	churn
4	0,7	2	0,3	0,8	churn
5	0,7	3,06	0,4	1,3	churn
6	0,7	2,55	0,4	1,1	churn
7	0,7	3,46	0,4	1,5	churn
8	0,7	3,97	0,4	1,7	churn
9	0,8	4,49	0,4	1,9	churn
10	0,8	5,05	0,4	2,1	churn
11	1,3	0,53	0,7	0,2	slug
12	1,3	0,98	0,7	0,4	slug
13	1,3	1,59	0,7	0,7	slug
14	1,3	1,99	0,7	0,8	slug
15	1,3	2,52	0,7	1,1	churn
16	1,3	3,07	0,7	1,3	churn
17	1,4	3,51	0,7	1,5	churn
18	1,4	4	0,7	1,7	churn
19	1,4	4,47	0,7	1,9	churn
20	1,4	5,05	0,7	2,1	churn
21	1,9	0,53	1	0,2	slug
22	1,9	1,08	1	0,5	slug
23	1,9	1,59	1	0,7	slug
24	1,9	1,99	1	0,8	slug
25	1,9	3,03	1	1,3	slug-churn
26	1,9	2,61	1	1,1	slug-churn
27	2	3,49	1	1,5	slug-churn
28	2	4,03	1	1,7	slug-churn
29	2	4,52	1	1,9	churn
30	2	5,08	1	2,1	churn
31	2,5	0,53	1,3	0,2	slug
32	2,5	1,08	1,3	0,5	slug
33	2,5	1,59	1,3	0,7	slug
34	2,5	1,99	1,3	0,8	slug
35	2,5	2,53	1,3	1,1	slug
36	2,5	3,07	1,3	1,3	slug

37	2,5	3,52	1,3	1,5	slug-churn
38	2,5	4,04	1,3	1,7	slug-churn
39	2,5	4,51	1,3	1,9	churn
40	2,5	5,14	1,3	2,2	churn
41	3,1	0,53	1,6	0,2	bubbly-slug
42	3,1	1,08	1,6	0,5	slug
43	3,1	1,59	1,6	0,7	slug
44	3,1	2,1	1,6	0,9	slug
45	3,1	2,6	1,6	1,1	slug
46	3,1	3,11	1,6	1,3	slug-churn
47	3,1	3,74	1,6	1,6	slug-churn
48	3,1	4,15	1,6	1,8	slug-churn
49	3,1	4,83	1,6	1,8	slug-churn
50	3,1	5,56	1,6	2,3	slug-churn
51	3,6	0,54	1,8	0,2	bubbly-slug
52	3,6	1,08	1,9	0,5	bubbly-slug
53	3,6	1,99	1,9	0,8	slug
54	3,6	2,61	1,9	1,1	slug
55	3,6	3,16	1,9	1,3	slug
56	3,6	3,71	1,8	1,6	slug-churn
57	3,6	4,25	1,8	1,8	slug-churn
58	3,6	4,8	1,8	2	slug-churn
59	3,6	5,34	1,8	2,3	slug-churn
60	3,6	1,39	1,8	0,6	slug
61	3,7	0,533	1,9	0,2	bubbly-slug
62	3,7	1,08	1,9	0,5	slug
63	3,7	1,49	1,9	0,6	slug
64	3,7	2,09	1,9	0,9	slug
65	3,7	2,61	1,9	1,1	slug
66	3,7	3,08	1,9	1,3	slug-churn
67	3,7	3,51	1,9	1,5	slug-churn
68	3,7	4,1	1,9	1,7	slug-churn
69	3,7	4,6	1,9	2	slug-churn
70	3,7	5,4	1,9	2,3	slug-churn
71	3,8	0,53	2	0,2	bubbly
72	3,8	1,08	2	0,5	bubbly-slug
73	3,8	1,59	2	0,7	slug
74	3,8	2,09	2	0,9	slug
75	3,8	2,68	2	1,1	slug
76	3,8	3,13	2	1,3	slug-churn
77	3,8	3,64	2	1,5	slug-churn

78	3,8	4,12	2	1,7	slug-churn
79	3,8	4,47	1,9	1,9	slug-churn
80	3,8	5,28	1,9	2,2	slug-churn
81	0,5	0,219	0,3	0,1	slug
82	1,3	0,22	0,6	0,1	slug
83	1,9	0,22	1	0,1	slug
84	2,5	0,22	1,3	0,1	slug
85	3,1	0,22	1,6	0,1	bubbly-slug
86	3,6	0,22	1,9	0,1	bubbly
87	3,8	0,22	2	0,1	bubbly
88	3,9	0,22	2	0,1	bubbly
89	0,8	5,69	0,4	2,4	churn
90	1,4	5,67	0,7	2,4	churn
91	2	5,65	1	2,4	churn
92	2,6	5,65	1,3	2,4	churn
93	3,1	5,65	1,6	2,4	slug-churn
94	3,6	5,65	1,8	2,4	slug-churn
95	3,8	5,66	1,9	2,4	slug-churn
96	3,8	5,67	1,9	2,4	slug-churn

LIITE 7. EXCEL TAULUKKO (VAAKAVIRTAUS)

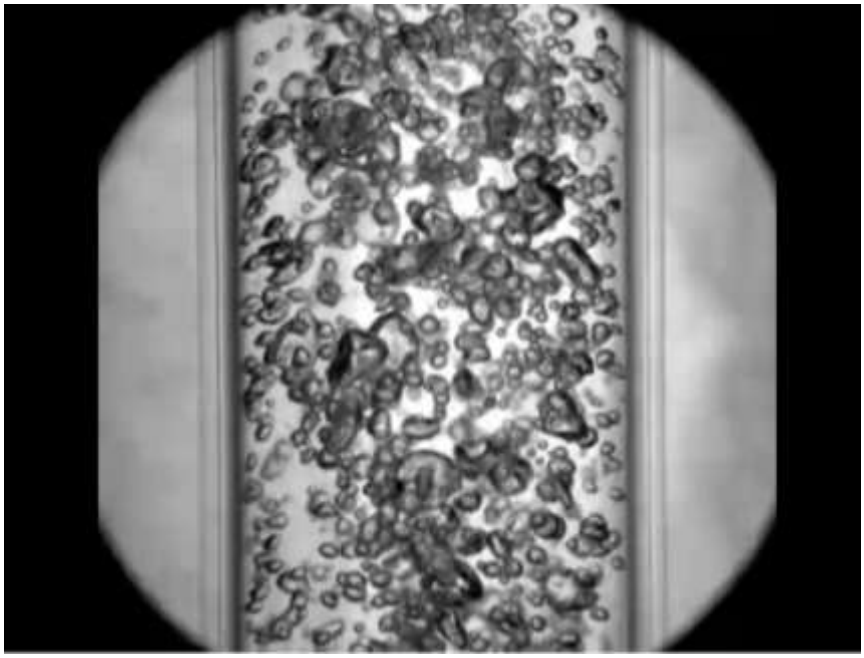
Mittaus nro.	M_L [kg/s]	M_G [g/s]	j_L [m/s]	j_G [m/s]	Muoto
1	0,1	0,195	0,1	0,1	stratified
2	0,1	0,345	0,1	0,1	stratified
3	0,1	0,425	0,1	0,2	stratified
4	0,2	0,601	0,1	0,3	stratified
5	0,2	0,88	0,1	0,4	stratified
6	0,3	1,18	0,1	0,5	stratified
7	0,3	1,38	0,2	0,6	stratified
8	0,3	1,68	0,2	0,7	stratified-wavy
9	0,3	1,983	0,2	0,8	stratified-wavy
10	0,3	2,182	0,2	0,9	stratified-wavy
11	0,3	2,38	0,2	1	stratified-wavy
12	0,4	2,68	0,2	1,1	-
13	0,4	3,15	0,2	1,3	-
14	0,4	3,39	0,2	1,4	-
15	0,4	3,81	0,2	1,6	stratified-wavy
16	0,4	4,12	0,2	1,7	stratified-wavy
17	0,4	4,45	0,2	1,9	stratified-wavy
18	0,4	4,81	0,2	2	stratified-wavy
19	0,4	5,3	0,2	2,2	stratified-wavy
20	0,4	5,63	0,2	2,4	-
21	0,8	0,19	0,4	0,1	stratified-wavy
22	0,8	0,338	0,4	0,1	intermittent
23	0,8	0,43	0,4	0,2	intermittent
24	0,8	0,69	0,4	0,3	intermittent
25	0,8	0,97	0,4	0,4	intermittent
26	0,8	1,18	0,4	0,5	intermittent
27	0,8	1,48	0,4	0,6	-
28	0,8	1,68	0,4	0,7	intermittent
29	0,8	1,98	0,4	0,8	-
30	0,8	2,18	0,4	0,9	intermittent
31	0,8	2,37	0,4	1	-
32	0,8	2,67	0,4	1,1	-
33	0,8	3,1	0,4	1,3	-
34	0,8	3,53	0,4	1,5	intermittent
35	0,8	3,8	0,4	1,6	-
36	0,8	4,14	0,4	1,7	-
37	0,8	4,45	0,4	1,9	-
38	0,8	4,9	0,4	2,1	-

39	0,8	5,2	0,4	2,2	intermittent
40	0,8	5,66	0,4	2,4	intermittent
41	1,2	0,185	0,6	0,1	intermittent
42	1,1	0,34	0,6	0,1	intermittent
43	1,1	0,51	0,6	0,2	intermittent
44	1,2	0,68	0,6	0,3	intermittent
45	1,2	0,97	0,6	0,4	intermittent
46	1,1	1,28	0,6	0,5	intermittent
47	1,1	1,48	0,6	0,6	intermittent
48	1,1	1,88	0,6	0,8	intermittent
49	1,1	2,34	0,6	1	intermittent
50	1,1	2,69	0,6	1,1	intermittent
51	1,1	3,14	0,6	1,3	intermittent
52	1,1	3,54	0,6	1,5	-
53	1,1	4	0,6	1,7	intermittent
54	1,1	4,4	0,6	1,9	intermittent
55	1,1	4,85	0,6	2	-
56	1,1	5,17	0,6	2,2	intermittent
57	1,1	5,43	0,6	2,3	intermittent
58	1,1	5,66	0,6	2,4	-
59	1,8	0,2	0,9	0,1	intermittent
60	1,8	0,33	0,9	0,1	intermittent
61	1,8	0,42	0,9	0,2	intermittent
62	1,8	0,87	0,9	0,4	intermittent
63	1,8	1,38	0,9	0,6	intermittent
64	1,8	1,57	0,9	0,7	intermittent
65	1,8	2,11	0,9	0,9	intermittent
66	1,8	2,57	0,9	1,1	intermittent
67	1,8	3,12	0,9	1,3	intermittent
68	1,8	3,31	0,9	1,4	intermittent
69	1,8	3,75	0,9	1,6	intermittent
70	1,8	4,2	0,9	1,8	intermittent
71	1,8	4,7	0,9	2	-
72	1,8	5,03	0,9	2,1	bubbly
73	1,8	5,34	0,9	2,3	bubbly
74	1,7	5,62	0,9	2,4	bubbly
75	2,4	0,17	1,2	0,1	intermittent
76	2,4	0,33	1,2	0,1	intermittent
77	2,4	0,77	1,2	0,3	intermittent
78	2,4	1,28	1,2	0,5	intermittent
79	2,4	1,38	1,2	0,6	intermittent

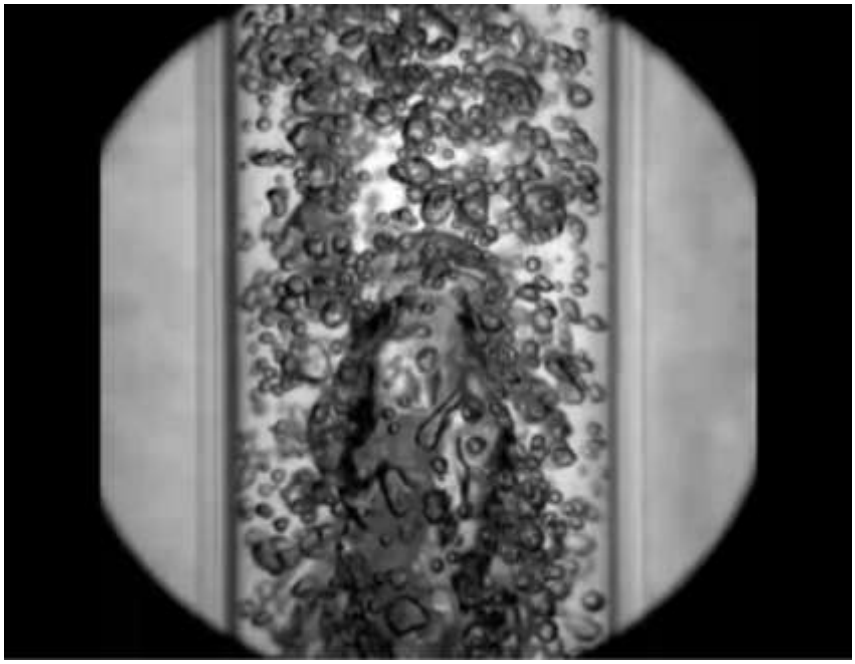
80	2,4	1,96	1,2	0,8	intermittent-bubbly
81	2,4	2,37	1,2	1	intermittent-bubbly
82	2,4	2,89	1,2	1,2	intermittent-bubbly
83	2,4	3,25	1,2	1,4	intermittent-bubbly
84	2,3	3,79	1,2	1,6	bubbly
85	2,3	4,02	1,2	1,7	bubbly
86	2,3	4,42	1,2	1,9	bubbly
87	2,3	4,92	1,2	2,1	bubbly
88	2,3	5,35	1,2	2,3	bubbly
89	2,3	5,64	1,2	2,4	bubbly
90	3	0,17	1,5	0,1	intermittent-bubbly
91	3	0,32	1,5	0,1	intermittent-bubbly
92	3	0,77	1,5	0,3	intermittent-bubbly
93	3	0,97	1,5	0,4	intermittent-bubbly
94	3	1,48	1,5	0,6	intermittent-bubbly
95	3	1,94	1,5	0,8	intermittent-bubbly
96	2,9	2,37	1,5	1	bubbly
97	2,9	2,91	1,5	1,2	bubbly
98	2,9	3,38	1,5	1,4	bubbly
99	2,9	3,8	1,5	1,6	bubbly
100	2,9	4,24	1,5	1,8	bubbly
101	2,9	4,67	1,5	2	bubbly
102	2,9	5	1,5	2,1	bubbly
103	2,9	5,33	1,5	2,3	bubbly
104	2,9	5,65	1,5	2,4	bubbly
105	3,5	0,17	1,8	0,1	intermittent-bubbly
106	3,5	0,33	1,8	0,1	intermittent-bubbly
107	3,5	0,77	1,8	0,3	intermittent-bubbly
108	3,5	1,28	1,8	0,5	intermittent-bubbly
109	3,4	1,68	1,8	0,7	intermittent-bubbly
110	3,4	1,88	1,8	0,8	intermittent-bubbly
111	3,4	2,34	1,8	1	intermittent-bubbly
112	3,4	2,82	1,8	1,2	bubbly
113	3,4	3,36	1,8	1,4	bubbly
114	3,4	3,55	1,8	1,5	bubbly
115	3,4	3,92	1,7	1,7	bubbly
116	3,4	4,4	1,7	1,9	bubbly
117	3,4	4,85	1,7	2,1	bubbly
118	3,4	5,23	1,7	2,2	bubbly
119	3,4	5,43	1,7	2,3	bubbly
120	3,4	5,65	1,7	2,4	bubbly

121	3,8	0,2	2	0,1	intermittent-bubbly
122	3,8	0,34	2	0,1	intermittent-bubbly
123	3,8	0,77	2	0,3	intermittent-bubbly
124	3,8	1,07	2	0,5	intermittent-bubbly
125	3,8	1,48	2	0,6	intermittent-bubbly
126	3,8	1,98	2	0,8	intermittent-bubbly
127	3,8	2,38	2	1	intermittent-bubbly
128	3,8	2,83	1,9	1,2	bubbly
129	3,8	3,31	1,9	1,4	bubbly
130	3,8	3,67	1,9	1,6	bubbly
131	3,8	3,91	1,9	1,7	bubbly
132	3,8	4,45	1,9	1,9	bubbly
133	3,8	4,86	1,9	2,1	bubbly
134	3,8	5,21	1,9	2,2	bubbly
135	3,8	5,35	1,9	2,3	bubbly
136	3,8	5,61	1,9	2,4	bubbly
137	3,8	0,17	2	0,1	intermittent-bubbly
138	3,8	0,33	2	0,1	intermittent-bubbly
139	3,8	0,77	2	0,3	intermittent-bubbly
140	3,8	1,07	2	0,5	intermittent-bubbly
141	3,8	1,47	2	0,6	intermittent-bubbly
142	3,8	1,87	2	0,8	intermittent-bubbly
143	3,8	2,46	2	1	intermittent-bubbly
144	3,8	2,8	2	1,2	bubbly
145	3,8	3,25	2	1,4	bubbly
146	3,8	3,7	2	1,6	bubbly
147	3,8	4,15	2	1,8	bubbly
148	3,8	4,78	2	2	bubbly
149	3,8	5,3	2	2,2	bubbly
150	3,8	4,96	2	2,1	bubbly
151	3,8	5,66	2	2,4	bubbly

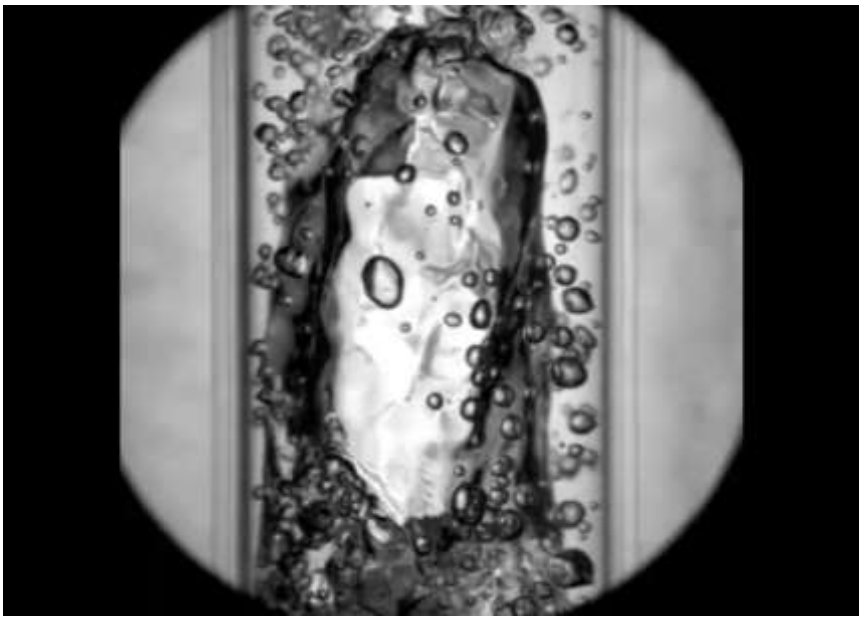
LIITE 8. VIRTAUSMUODOT



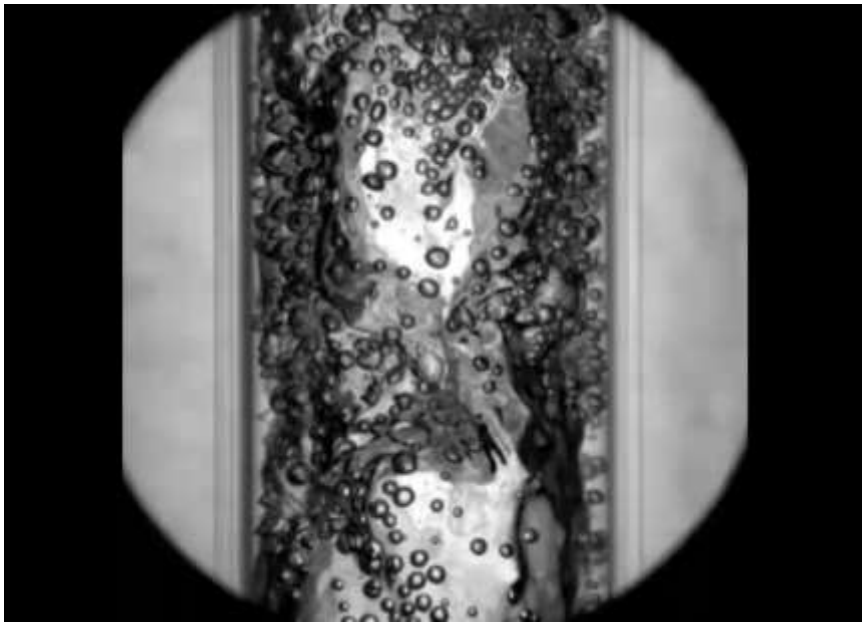
Kuplavirtaus (bubbly flow)



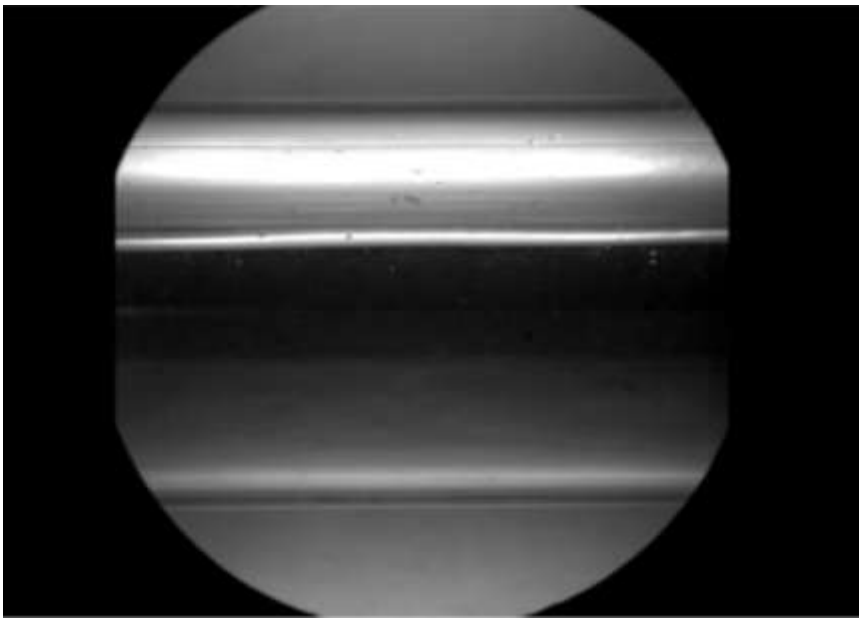
Kupla-tulppa- virtaus (bubbly-slug flow)



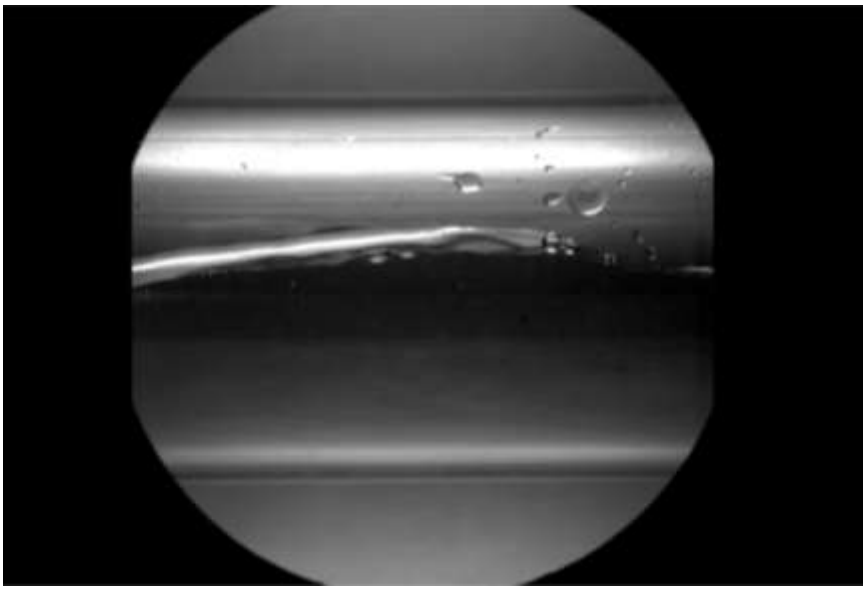
Tulppavirtaus (slug flow)



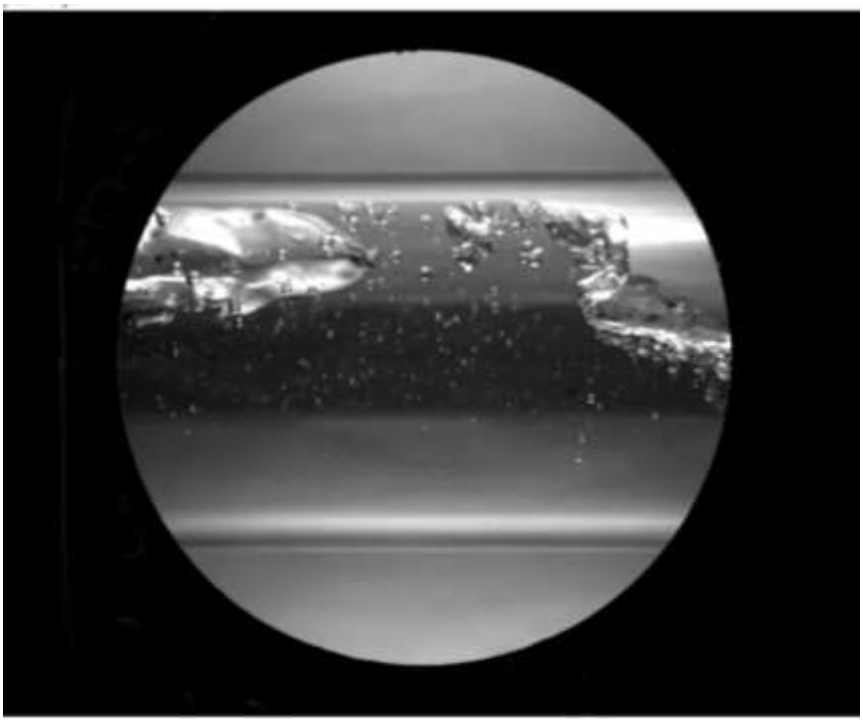
Kirnuaminen (churn flow)



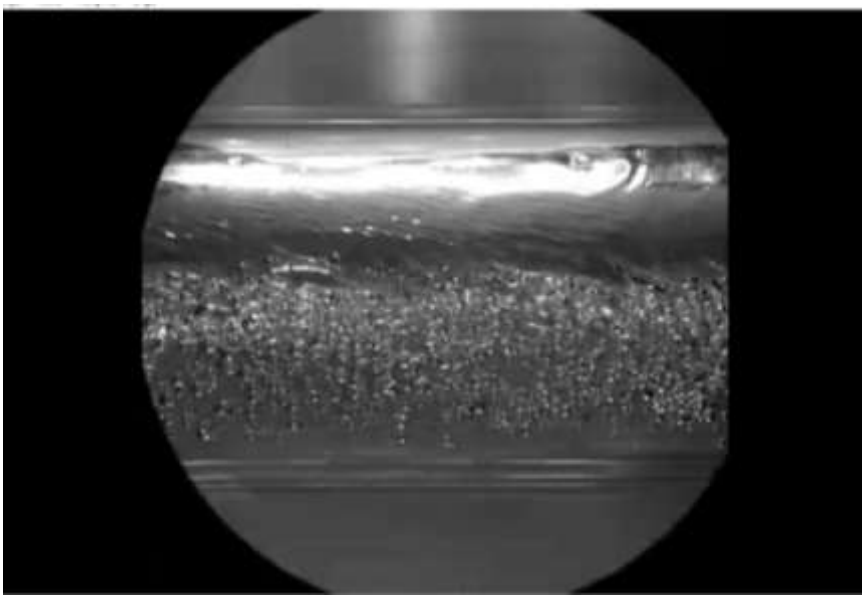
Kerrostunut virtaus (stratified flow)



Kerrostunut-aaltoileva- virtaus (stratified-wavy flow)



Välimuotoinen virtaus (intermittent flow)



Kuplavirtaus (bubbly flow)