



UNIVERSITAS INDONESIA

**FORMULASI MODEL EMPIRIK DAN UJI KINERJA KOLOM
GELEMBUNG PANCARAN UNTUK ABSORPSI CO₂**

SKRIPSI

**VENESSIA WIJAYA
0405060679**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM SARJANA
DEPOK
DESEMBER 2008**



UNIVERSITAS INDONESIA

**FORMULASI MODEL EMPIRIK DAN UJI KINERJA KOLOM
GELEMBUNG PANCARAN UNTUK ABSORPSI CO₂**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
gelar Sarjana Teknik Kimia**

**VENESSIA WIJAYA
0405060679**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM SARJANA
DEPOK
DESEMBER 2008**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Venessia Wijaya
NPM : 0405060679
Tanda Tangan :
Tanggal : 31 Desember 2008

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Venessia Wijaya
NPM : 0405060679
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Formulasi Model Empirik dan Uji Kinerja Kolom Gelembung Pancaran untuk Proses Absorpsi CO₂

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Kimia pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Setiadi, M.Eng ()
Penguji : Ir. Dewi Tristantini B., PhD ()
Penguji : Bambang Heru S., MT ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal :

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Triratna, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ir. Setiadi, M.Eng., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Mang Izal, Mas Eko, dan Kang Jajat sebagai teknisi laboratorium yang telah membantu saya secara teknis;
3. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
4. Sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap semoga semua pihak yang telah membantu saya memperoleh segala kebaikan. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 31 Desember 2008

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Venessia Wijaya

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

NPM : 0405060679

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Nonesklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

“Formulasi Model Empirik dan Uji Kinerja Kolom Gelembung Pancaran untuk
Absorpsi CO₂”

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Nonesklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 31 Desember 2008

Yang menyatakan

(Venessia Wijaya)

ABSTRAK

Nama : Venessia Wijaya
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Formulasi Model Empirik dan Uji Kinerja Kolom Gelembung Pancaran untuk Absorpsi CO₂

Banyak penelitian telah dilakukan untuk menurunkan kadar CO₂ dengan efektif. Penelitian yang menggabungkan teknologi adsorpsi (karbon aktif) dengan teknologi absorpsi (menggunakan kolom gelembung pancaran) untuk menyerap CO₂, pernah dilakukan dan diperoleh persentase laju volumetrik penyerapan CO₂ sebesar 86,51% oleh absorber dan 13,49% oleh adsorber. Terlihat bahwa kemampuan absorber jauh lebih tinggi. Oleh karena itu, penelitian dilakukan lebih lanjut untuk menguji kinerja kolom gelembung pancaran (absorber). Keluaran yang diharapkan adalah formulasi matematik laju *gas entrainment* dan *holdup gas* yang merupakan parameter kinerja peralatan. Formulasi akan berguna untuk memprediksi perilaku peralatan dan ketika akan dilakukan *scale up*. Selain itu, kemampuan peralatan dalam mengabsorpsi CO₂ diharapkan juga dapat diketahui melalui penelitian ini. Berdasarkan hasil uji kinerja peralatan, diperoleh formulasi matematik dengan *error* ±18% dan diketahui bahwa kemampuan peralatan mengabsorpsi CO₂ sangat baik.

Kata kunci:

Kolom gelembung pancaran, laju *gas entrainment*, *holdup gas*, absorpsi CO₂

ABSTRACT

Name : Venessia Wijaya
Study Program : Chemical Engineering
Title : Formulating an Empirical Model and The Performance of Jet
Bubble Column for CO₂ Absorption

There are lots of experiments have been made in order to reduce CO₂ effectively. An experiment, that combined the adsorption (using activated carbon) and the absorption process (using jet bubble column) simultaneously to reduce CO₂, has been made and the result was the percentage of the volumetric rate of CO₂ reduction (86.51% for absorption and 13.49% for adsorption). It can be seen that the absorber has higher ability in reducing CO₂. Therefore, an advance experiment will be held to test the performance of jet bubble column. To formulate the gas entrainment rate and the gas holdup, as the parameter of jet bubble column' performance, is the output of the experiment. The formulation will be useful in predicting the behavior of jet bubble column and in scaling up process as well. Besides, the ability of this column to remove CO₂ is also being considered to be known from this experiment. The results are a formulation with an error $\pm 18\%$ and the fact that the column has a very good ability to reduce CO₂.

Key words:

Jet bubble column, gas entrainment rate, gas holdup, CO₂ absorption

DAFTAR ISI

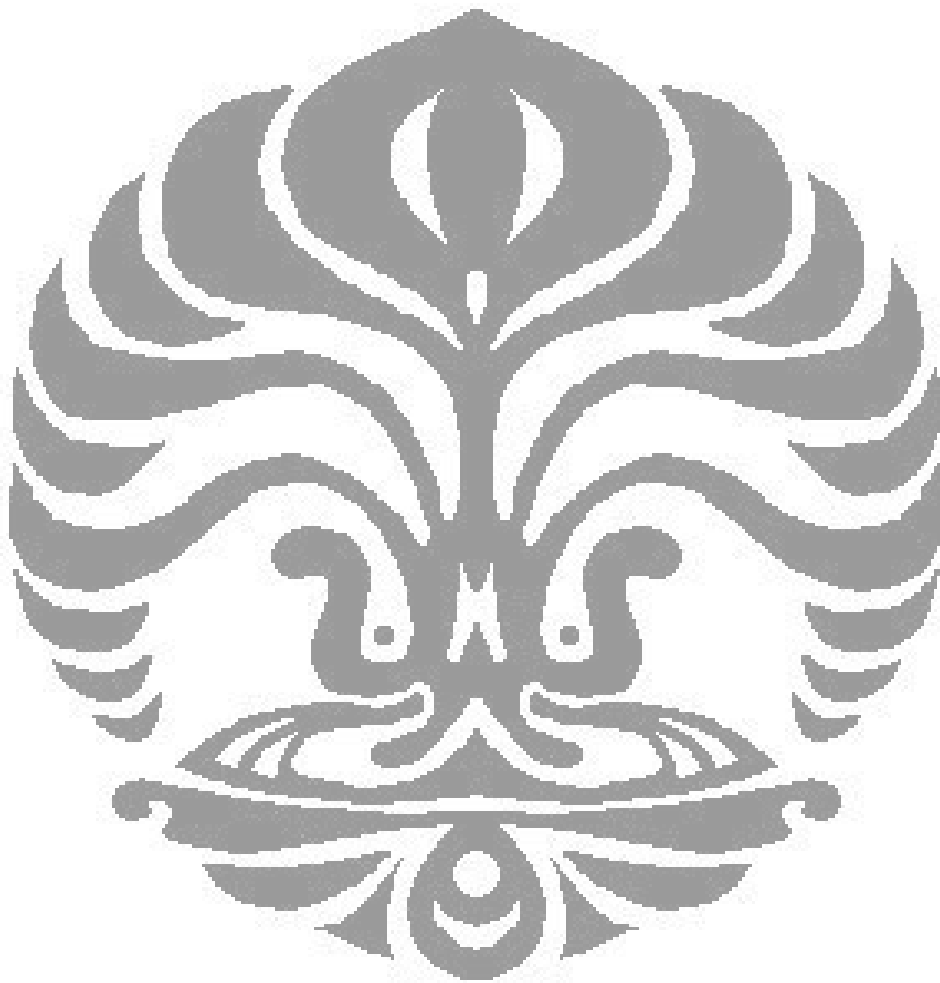
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Absorpsi	5
2.1.1 Definisi dan Prinsip Dasar Absorpsi.....	5
2.1.2 Jenis-Jenis Absorpsi.....	5
2.1.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Laju Absorpsi	6
2.1.4 Pemilihan Absorben.....	7
2.1.5 Kolom Gelembung Pancaran sebagai Kolom Absorber	8
2.2 Hidrodinamika Kolom Gelembung Pancaran	9
2.2.1 Laju <i>Gas Entrainment</i>	9
2.2.2 <i>Holdup Gas</i>	18
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	23
3.1 Diagram Alir Penelitian	23

3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	24
3.3 Prosedur Penelitian	27
3.3.1 Persiapan Uji Operasi	27
3.3.2 Pengoperasian Rangkaian Alat.....	27
3.3.3 Analisis Sampel	28
3.4 Pengolahan Data.....	30
3.4.1 Penentuan Laju <i>Gas Entrainment</i>	30
3.4.2 Penentuan <i>Holdup Gas</i>	30
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1 Korelasi untuk <i>Gas Entrainment</i>	40
4.2 Korelasi untuk <i>Holdup Gas</i>	42
4.3 Kemampuan Kolom Gelembung Pancaran Mengabsorpsi CO ₂	43
4.3.1 Pemilihan Kondisi Operasi untuk Absorpsi	43
4.3.2 Uji Absorpsi CO ₂	44
BAB 5 KESIMPULAN	47
DAFTAR REFERENSI	48
LAMPIRAN.....	52

DAFTAR GAMBAR

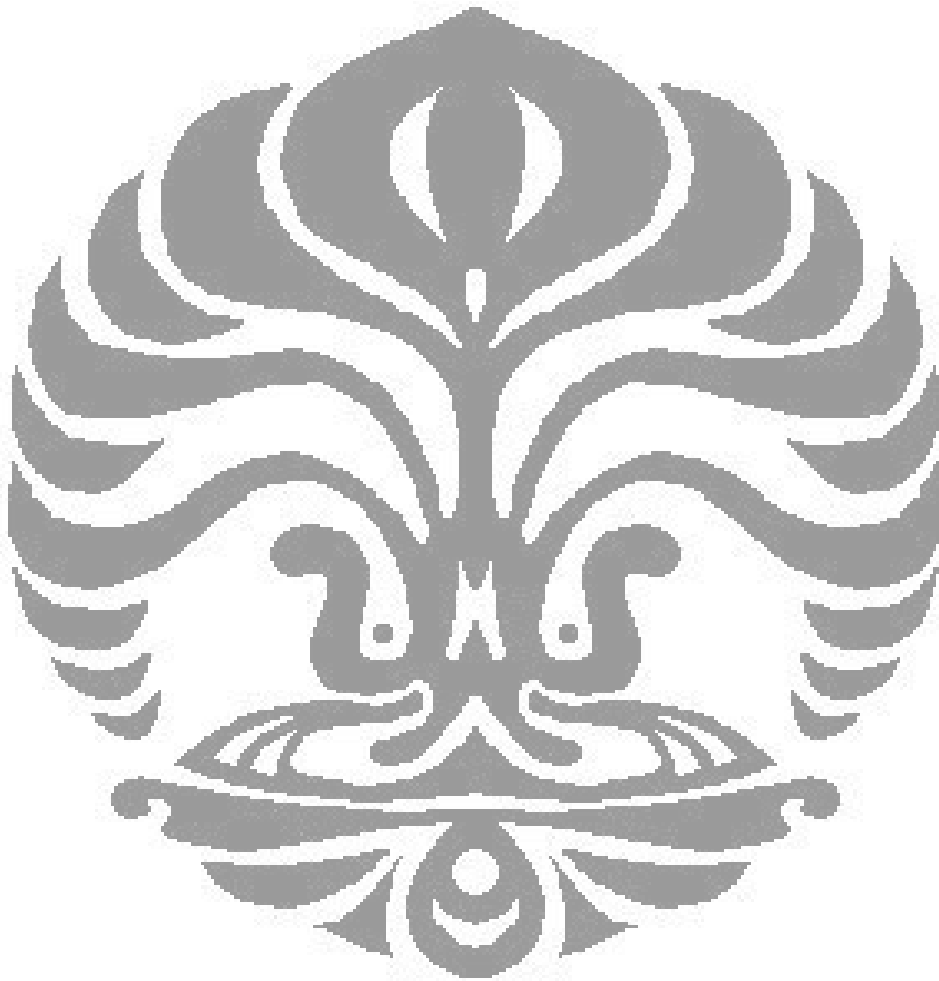
Gambar 2. 1 Cairan Viskos yang jatuh pada permukaan stagnan: (a) sudut kontak $\phi < 180$, (b) pembentukan lapisan udara	10
Gambar 2. 2 Mekanisme <i>Gas Entrainment</i> untuk <i>Jet</i> dengan Viskositas Rendah yang Memiliki Gangguan pada Permukaannya: (a-d) Menunjukkan Urutan dari Fenomena yang Terjadi	11
Gambar 2. 3 Hasil Pengukuran Laju <i>Gas Entrainment</i> (Q_g) terhadap Kecepatan <i>Jet</i> (v_j) untuk Panjang <i>Jet</i> (L_j) yang Berbeda-Beda (Oteyaka [16])	12
Gambar 2. 4 Pengaruh Desain Nozzle terhadap Rasio <i>Entrainment</i> (Q_g/Q_l)	13
Gambar 2. 5 Hasil Pengukuran Laju <i>Gas Entrainment</i> (Q_g) terhadap Kecepatan <i>Jet</i> (v_j) untuk Diameter Nozzle (D_n) yang Berbeda-Beda	14
Gambar 2. 6 Hubungan Laju <i>Gas Entrainment</i> (Q_g) terhadap Kecepatan <i>Jet</i> (v) pada Ukuran Diameter Nozzle (D_n) yang Berbeda-Beda	14
Gambar 2. 7 Hubungan antara Q_g/Q_l dengan $\mu_l (\rho_l \sigma)^{1/2}$	15
Gambar 2. 8 Perubahan <i>Holdup</i> Gas dengan Variasi Laju Alir Gas	18
Gambar 2. 9 Perubahan <i>Holdup</i> Gas dengan Variasi Kecepatan <i>Jet</i>	19
Gambar 2. 10 Hubungan antara Laju <i>Gas Entrainment</i> (Q_g) terhadap Kecepatan <i>Jet</i> (v) pada Ukuran Diameter Nozzle (D_n) yang Berbeda-Beda	20
Gambar 2. 11 Perubahan <i>Holdup</i> Gas dengan Variasi Diameter Kolom	20
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	23
Gambar 3. 2 Skema Peralatan Penelitian	24
Gambar 3. 3 Skema Presentasi dari Keseimbangan Tekanan Statik pada Kolom Gelembung	31
Gambar 4. 1 Hasil Pengukuran (a) Laju <i>Gas Entrainment</i> (Q_g) (atas) dan <i>Holdup</i> Gas (ϵ_g) (bawah) terhadap Kecepatan <i>Jet</i> (v) dengan Variasi Diameter Nozzle (D_n) dan (b) pada Kemampuan Maksimal Peralatan: Laju <i>Gas Entrainment</i> (Q_g) (kanan) dan <i>Holdup</i> Gas (ϵ_g) (kiri)	34
Gambar 4. 2 Pengaruh Kondisi Pipa <i>Downcomer</i> terhadap (a) Laju <i>Gas Entrainment</i> (Q_g) dan (b) <i>Holdup</i> Gas (ϵ_g)	36
Gambar 4. 3 Hasil Pengukuran Laju <i>Gas Entrainment</i> pada Saat Pipa <i>Downcomer</i> Tercelup (kiri) dan Tidak Tercelup (kanan)	37
Gambar 4. 4 Perbandingan Energi Kinetik (E_k) yang Diperlukan Saat Kondisi Pipa <i>Downcomer</i> Tercelup dan Tidak Tercelup	38
Gambar 4. 5 Hasil Pengukuran (a) Laju <i>Gas Entrainment</i> (Q_g) dan (b) <i>Holdup</i> Gas (ϵ_g) terhadap Kecepatan <i>Jet</i> (v) dengan Variasi Viskositas (μ) dan Densitas (ρ)	39
Gambar 4. 6 Ilustrasi Fenomena Tumbukan <i>Jet</i> pada Permukaan Cairan yang Stagnan (Diam) (Evans [22])	40
Gambar 4. 7 Perbandingan Rasio <i>Gas Entrainment</i> (Q_g/Q_l) Hasil Uji Kinerja dengan Hasil Perhitungan	42
Gambar 4. 8 Perbandingan <i>Holdup</i> Gas (ϵ_g) Hasil Uji Kinerja dengan Hasil Perhitungan	43

Gambar 4. 9 Hasil Pengukuran <i>Holdup Gas</i> (ϵ_g) terhadap Rasio <i>Gas Entrainment</i> (Q_g/Q_i) pada Berbagai Kondisi Operasi	44
Gambar 4. 10 Penurunan Konsentrasi CO_2 dengan absorben (a) NaOH pada Kondisi Terbaik, (b) NaOH pada Kondisi Terburuk, (c) MDEA pada Kondisi Terbaik dan (d) KOH pada Kondisi Terbaik	45
Gambar 4. 11 Penurunan Konsentrasi CO_2 pada Kondisi Operasi Terbaik dan Terburuk	46



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Uji Absorpsi CO ₂ pada Kondisi Terbaik.....	52
Lampiran 2. Data Uji Absorpsi CO ₂ pada Kondisi Terburuk	53
Lampiran 3. Data Hasil Uji Kinerja	54



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Seperti yang diketahui, CO₂ sangat bermanfaat terutama bagi tumbuhan untuk melangsungkan fotosintesis. Tanpa CO₂ tumbuhan akan mati dan hal ini akan berdampak buruk pada makhluk hidup yang lain yaitu manusia maupun hewan. Namun demikian, jika kadar CO₂ terlalu tinggi, tentunya juga bukan hal yang baik. Kadar CO₂ di udara yang terus menerus meningkat misalnya, di mana dilaporkan oleh Marcel Silvius (pakar iklim di Wetlands Internasional di Belanda), bahwa selama empat tahun terakhir ditemukan 2 miliar ton CO₂ dilepas ke atmosfer dari Indonesia dan Malaysia setiap tahunnya [1], telah mengakibatkan timbulnya efek rumah kaca yang turut berkontribusi menyebabkan terjadinya pemanasan global. Dampak dari pemanasan global tersebut pastinya akan mempengaruhi keseimbangan iklim global dan berpotensi memberikan dampak yang negatif.

Contoh lainnya di mana kadar CO₂ terlalu tinggi bukanlah hal yang baik yaitu pada industri-industri seperti pengolahan gas alam, pembangkit listrik tenaga panas bumi, dsb. di mana kadar CO₂ yang sangat tinggi akan menyebabkan korosi pada peralatan karena sifat asam yang dimilikinya. Hal ini tentu akan sangat merugikan karena biaya untuk penggantian alat cukup mahal.

Untuk itu, dirasakan perlu untuk mengembangkan peralatan proses yang dapat menyerap CO₂ baik dalam kadar rendah (yang ada di udara) maupun kadar tinggi (di industri-industri). Teknologi adsorpsi dengan menggunakan adsorben karbon aktif, pernah dikembangkan untuk mengadsorp gas CO₂ (Dauglas [2]). Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya hidup yang dapat diharapkan dari sebuah alat ini adalah 1000 jam, dan karbon aktifnya dapat diganti. Akan tetapi, hal ini masih dipengaruhi oleh tingkat konsentrasi CO₂, bila tingkat konsentrasinya rendah maka daya hidupnya tentu akan lebih lama. Namun demikian, teknologi adsorpsi masih tergantung pada beberapa kondisi, seperti adsorptivitas karbon aktif, tingkat kelembaban udara, laju alir udara, dan karakteristik adsorben.

Selain itu, teknologi adsorpsi juga memiliki keterbatasan seperti laju dan kapasitas adsorpsi yang rendah, dan struktur pori dan luas permukaan yang tinggi dari adsorben mengakibatkan mikroorganisme tumbuh sangat baik di dalam adsorben.

Untuk mengatasi kekurangan dari teknologi adsorpsi dengan adsorben karbon aktif, telah dilakukan penelitian lain untuk menggabungkan teknologi adsorpsi dengan teknologi absorpsi yang menggunakan *jet bubble column* (kolom gelembung pancaran). Kolom gelembung pancaran merupakan alat sederhana yang menggunakan sistem *plunging jet*. *Plunging jet* merupakan suatu fenomena alam yang dapat diamati pada air terjun yang jatuh dengan kecepatan tinggi dan mengakibatkan terjadinya gelembung dan gelombang pada cairan stagnan [3]. Pada awalnya, potensi *plunging jet* untuk digunakan sebagai reaktor diusulkan oleh Mertes pada tahun 1938, kemudian pada akhir tahun 1960-an, penelitian mengenai hidrodinamika *plunging jet* mulai dikembangkan dan hasilnya sekarang *plunging jet* banyak digunakan untuk proses pencampuran (*mixing*) dan mereaksikan gas dan cair dalam banyak proses industri seperti untuk fermentasi [4].

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa untuk mengatasi kekurangan dari teknologi adsorpsi untuk penyerapan CO₂, maka telah dilakukan penelitian lain untuk menggabungkan teknologi adsorpsi dengan teknologi absorpsi yang menggunakan kolom gelembung pancaran (Hantizen [5]). Dari penelitian tersebut, peralatan kolom gelembung pancaran (dengan adsorben KOH) yang dikombinasikan dengan kolom adsorpsi (dengan adsorben karbon aktif), ternyata layak beroperasi dan dapat digunakan untuk absorpsi CO₂. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kolom gelembung pancaran dengan diameter nozzle 7,2 mm dan laju alir volumetrik cairan 19,07 L/men, persentase laju volumetrik penyerapan absorber adalah 86,51% dan persentase laju volumetrik penyerapan adsorber adalah 13,49% (Hantizen [5]). Dari penelitian ini, terlihat bahwa absorber memiliki kemampuan menyerap CO₂ yang jauh lebih tinggi. Adapun yang mempengaruhi laju volumetrik penyerapan absorber adalah laju *gas entrainment* dan *holdup* gas di mana kedua variabel ini bergantung pada variabel desain dan variabel proses seperti kecepatan pancaran cairan, diameter nozzle, dan

beberapa variabel lainnya. Namun demikian, hubungan antara laju *gas entrainment* dan *holdup* gas terhadap variabel-variabel tersebut belum diformulasikan secara matematik.

Oleh karena itu, keluaran yang diharapkan dari penelitian ini ialah dapat menghasilkan suatu formulasi matematik laju *gas entrainment* dan *holdup* gas pada absorber, yang dalam hal ini adalah kolom gelembung pancaran. Formulasi matematik tersebut akan berguna untuk memprediksi perilaku (*behaviour*) kolom gelembung pancaran dan juga penting ketika akan dilakukan *scale up* peralatan. Di samping membentuk suatu formulasi matematik, penelitian ini juga dilakukan untuk mengukur kemampuan kolom gelembung pancaran dalam menyerap CO₂ dengan menggunakan beberapa jenis absorben.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka yang menjadi permasalahan ialah:

1. Bagaimana formulasi matematik laju *gas entrainment* dan *holdup* gas dalam kolom gelembung pancaran yang diteliti?
2. Bagaimana kemampuan kolom gelembung pancaran yang diteliti dalam mengabsorpsi CO₂ dengan menggunakan beberapa jenis absorben?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan formulasi matematik untuk laju *gas entrainment* dan *holdup* gas.
2. Mengetahui seberapa cepat waktu yang diperlukan kolom gelembung pancaran yang diteliti dalam menurunkan kadar CO₂.

1.4 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah dari penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Variabel-variabel yang dipilih untuk membentuk formulasi matematik laju *gas entrainment* dan *holdup* gas adalah diameter nozzle, kecepatan

pancaran cairan, kedalaman penetrasi gelembung, viskositas dan densitas cairan.

2. Formulasi matematik yang dihasilkan hanya berlaku untuk kondisi dan peralatan penelitian yang digunakan.
3. Absorben yang digunakan dalam penelitian adalah NaOH, KOH dan absorben komersial (MDEA).
4. Sampel yang digunakan adalah gas CO₂ dan udara.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam skripsi ini adalah sebagai berikut :

- **BAB I. PENDAHULUAN**
Berisikan latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.
- **BAB II. TINJAUAN PUSTAKA**
Berisikan studi literatur secara umum dan secara khusus mengenai hal-hal yang berkaitan dengan penelitian yaitu absorpsi dan hidrodinamika kolom gelembung pancaran.
- **BAB III. METODE PENELITIAN**
Berisikan diagram alir penelitian, alat & bahan yang digunakan dalam penelitian, prosedur penelitian yang meliputi persiapan uji operasi, pengoperasian rangkaian alat, dan analisis sampel, serta pengolahan data.
- **BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**
Berisikan hasil dan pembahasan dari uji operasi peralatan dan analisis sampel.
- **BAB V. KESIMPULAN**
Berisikan kesimpulan dari hasil penelitian dan pembahasan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Absorpsi

2.1.1 Definisi dan Prinsip Dasar Absorpsi

Absorpsi merupakan proses yang terjadi ketika suatu komponen gas (absorbat) berdifusi ke dalam cairan (absorben) dan membentuk suatu larutan. Prinsip dasar dari absorpsi adalah memanfaatkan besarnya difusivitas molekul-molekul gas pada larutan tertentu [6]. Bila campuran gas dikontakkan dengan cairan yang mampu melarutkan salah satu komponen dalam gas tersebut dan keduanya dikontakkan dalam jangka waktu yang cukup lama pada suhu tetap, maka akan terjadi suatu kesetimbangan di mana tidak terdapat lagi perpindahan massa. *Driving force* dalam perpindahan massa ini adalah ungkang konsentrasi gas terlarut (tekanan parsial) dalam total gas melebihi konsentrasi kesetimbangan dengan cairan pada setiap waktu.

Sebagai ilustrasi dapat diamati, bila gas (*rich gas*) yang mudah larut dalam air dengan konsentrasi tertentu memasuki bagian bawah kolom absorpsi, bergerak naik secara berlawanan arah (*countercurrent*) dengan air murni yang bergerak turun melalui bagian atas kolom, akan jelas terlihat bahwa jumlah gas yang terlarut dalam total gas keluar akan turun (*lean gas*) dan konsentrasi gas dalam air akan naik.

Laju yang menunjukkan perpindahan molekul terlarut yang terabsorpsi dikenal dengan *interface mass-transfer rate* dan bergantung dengan jumlah permukaan kontak kedua fluida. Jumlah area kontak tersebut berhubungan erat dengan ukuran dan bentuk material isian (*packing*), laju cairan, distribusi cairan antar permukaan *packing*, potensi cairan untuk menggenang, dan sifat-sifat lain.

2.1.2 Jenis-Jenis Absorpsi

Berdasarkan interaksi antara absorben dan absorbat, absorpsi dibedakan menjadi absorpsi fisika dan absorpsi kimia.

▪ Absorpsi Fisika

Pada absorpsi fisika, komponen yang diserap memiliki kelarutan yang lebih tinggi (dibanding komponen gas lain) dengan pelarut (absorben) tanpa melibatkan reaksi kimia. Contoh dari absorpsi fisika adalah absorpsi menggunakan pelarut *shell sulfinol*, *SelexolTM*, *RectisolTM* (LURGI), *flour solvent* (*propylene carbonate*).

▪ Absorpsi Kimia

Absorpsi kimia melibatkan reaksi kimia saat absorben dan absorbat berinteraksi. Reaksi yang terjadi dapat mempercepat laju absorpsi, serta meningkatkan kapasitas pelarut untuk melarutkan komponen terlarut. Contoh dari absorpsi kimia adalah absorpsi yang menggunakan pelarut MEA, DEA, MDEA, *Benfield Process* (Kalium Karbonat).

2.1.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Laju Absorpsi

Ada banyak faktor yang dapat mempengaruhi laju absorpsi. Berikut beberapa faktor yang penting yaitu:

1. Luas permukaan kontak

Semakin besar permukaan kontak gas dan pelarut, maka laju absorpsi yang terjadi juga akan semakin besar. Hal ini dikarenakan permukaan kontak yang semakin luas akan meningkatkan peluang gas untuk berdifusi ke pelarut.

2. Laju alir fluida

Jika laju alir fluida semakin kecil, maka waktu kontak antara gas dengan pelarut akan semakin lama. Dengan demikian, akan meningkatkan jumlah gas yang berdifusi.

3. Konsentrasi gas

Perbedaan konsentrasi merupakan salah satu *driving force* dari proses difusi yang terjadi antar dua fluida.

4. Tekanan operasi

Peningkatan tekanan akan meningkatkan efisiensi pemisahan.

5. Temperatur komponen terlarut dan pelarut

Temperatur pelarut hanya sedikit berpengaruh terhadap laju absorpsi.

6. Kelembaban Gas

Kelembaban yang tinggi akan membatasi kapasitas gas untuk mengambil kalor laten, hal ini tidak disenangi dalam proses absorpsi. Dengan demikian, proses *dehumidification* gas sebelum masuk ke dalam kolom absorber sangat dianjurkan.

2.1.4 Pemilihan Absorben

Pertimbangan pemilihan absorben yang digunakan untuk proses absorpsi memiliki kriteria sebagai berikut [6]:

1. Tujuan dari proses absorpsi, di antaranya:
 - a. Jika tujuan utama operasi untuk menghasilkan larutan yang spesifik, maka pelarut ditentukan berdasarkan sifat dari produk. Contoh: produksi HCl.
 - b. Jika tujuan utama adalah menghilangkan kandungan tertentu dari gas, maka ada banyak pilihan yang mungkin. Misalnya air yang merupakan pelarut paling murah, tersedia dalam jumlah yang banyak, dan sangat kuat untuk senyawa polar.
2. Kelarutan Gas

Kelarutan gas harus tinggi, sehingga dapat meningkatkan laju absorpsi dan menurunkan kuantitas absorben yang diperlukan. Umumnya, absorben yang memiliki sifat yang sama dengan bahan terlarut akan mudah dilarutkan.
3. Volatilitas

Absorben harus memiliki tekanan uap yang rendah karena jika gas yang meninggalkan kolom absorpsi jenuh dengan absorben, maka akan ada banyak absorben yang terbuang. Jika diperlukan, dapat menggunakan cairan absorben kedua, yaitu yang volatilitasnya lebih rendah untuk menangkap porsi gas teruapkan.
4. Korosivitas

Material bangunan menara dan isinya sedapat mungkin tidak dipengaruhi oleh sifat absorben. Absorben yang korosif dapat merusak menara dan oleh sebab itu memerlukan material menara yang mahal atau tidak mudah dijumpai, oleh karenanya kurang disukai.

5. Harga

Penggunaan absorben yang mahal dan tidak mudah ter-*recovery* akan meningkatkan biaya operasi menara absorber.

6. Ketersediaan

Ketersediaan absorben di dalam negeri akan sangat berpengaruh terhadap stabilitas harga dan biaya operasi secara keseluruhan.

7. Viskositas

Viskositas absorben yang rendah amat disukai karena akan terjadi laju absorpsi yang tinggi, meningkatkan karakter *flooding* dalam menara, serta perpindahan kalor yang baik.

8. Lain-lain

Absorben tidak memiliki sifat toksik, *flammable*, dan sedapat mungkin harus stabil secara kimiawi dan memiliki titik beku yang rendah.

2.1.5 Kolom Gelembung Pancaran sebagai Kolom Absorber

Dalam operasi absorpsi, peralatan yang digunakan harus didesain sedemikian rupa agar mencapai efisiensi kontak gas dan cair seoptimal mungkin. Berdasarkan literatur, ada dua jenis kolom gelembung dengan aliran ke bawah (*downflow bubble column*) yang dapat digunakan untuk kontak gas dan cair, yaitu jenis *sparger* (Fujie, *et al.* [7]) dan jenis *plunging jet* (Kundu, *et al.* [8]; Bando, *et al.* [9]; Ohkawa, *et al.* [10]). Di antara keduanya, jenis yang terakhir memiliki keuntungan yang hanya dimilikinya yaitu ukuran gelembung yang lebih baik dan seragam, tidak terjadi penggabungan gelembung, dan gelembung gas memiliki waktu tinggal yang lebih lama (Kundu, *et al.* [11]). Dengan demikian, peralatan ini memiliki efisiensi perpindahan massa (kontak gas dan cair) yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan proses konvensional lainnya.

Peralatan dengan sistem *plunging jet* sebenarnya telah diaplikasikan cukup luas seperti pada oksigenator untuk penanganan limbah air buangan (Rielly dan Low [12]), peningkatan proses oksidasi dengan ozon pada keluaran pulp mill (El-Din dan Smith [13]), dan reaksi hidrogenasi (Cramers dan Selinger [14]). Di industri-industri seperti industri kimia dan petrokimia pun, peralatan kontak dengan sistem ini bahkan telah meluas digunakan sebagai suatu alat tempat

berlangsungnya proses perpindahan massa gas ke dalam fasa cair sehingga dapat berfungsi sebagai reaktor kimia.

Kolom gelembung pancaran yang akan digunakan dalam penelitian ini juga menggunakan sistem *plunging jet*. Keuntungan kolom gelembung pancaran sebagai kolom absorber selain memberikan luasan kontak yang cukup tinggi adalah disainnya yang sederhana dan mudah dalam pengoperasian dan pemeliharaan alat. Selain itu, dikarenakan adanya tumbukan antara cairan berkecepatan tinggi dengan permukaan cairan lainnya yang stagnan, gas akan terhisap dan bercampur dengan cairan dengan sendirinya sehingga tidak diperlukan lagi alat pengaduk dan alat untuk mengalirkan gas (kompresor). Dengan demikian, biaya pengoperasian alat akan menjadi lebih murah.

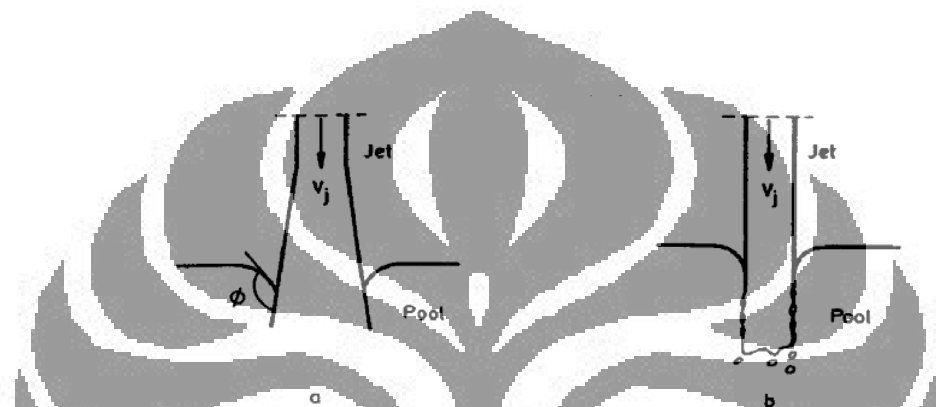
2.2 Hidrodinamika Kolom Gelembung Pancaran

Hidrodinamika merupakan bagian ilmu fisika yang berhubungan dengan cairan yang bergerak dan tenaga yang menggerakkannya. Studi hidrodinamika pada kolom gelembung pancaran telah banyak dilakukan oleh para peneliti. Yang menjadi tujuan penelitian para peneliti diantaranya adalah untuk menentukan laju *gas entrainment*, *holdup gas*, ukuran diameter gelembung, serta luas area spesifik antarfasa. Empat tujuan tersebut merupakan faktor terpenting dalam mendesain suatu alat kolom gelembung pancaran.

2.2.1 Laju Gas *Entrainment*

Berdasarkan studi dan pengamatan yang dilakukan banyak penulis, dikatakan bahwa *gas entrainment* yang terjadi karena *plunging liquid jet* merupakan proses yang sangat kompleks yang dikontrol oleh kecepatan *jet*. Untuk *jet* dengan kecepatan yang sangat rendah dan viskos (laminar), terbentuk meniskus antara *jet* dengan cairan stagnan (*receiving pool*) yang menghasilkan *gas entrainment* (lihat gambar 2.1). Dengan peningkatan kecepatan *jet*, maka momentum yang dimiliki *jet* yang ditransfer ke dalam cairan stagnan semakin besar sehingga membentuk gradien kecepatan di dekat permukaan. Hal ini menyebabkan peningkatan *viscous shear* dan *normal stress* yang cenderung menarik cairan yang dekat permukaan menuju ke bagian dalam sehingga

terbentuk meniskus di sekitarnya. Ketika sudut kontak mencapai 180° , suatu lapisan udara ikut terbawa ke dalam cairan stagnan. Bagian bawah dari lapisan tersebut akan berosilasi hingga akhirnya pecah menjadi gelembung-gelembung. Ini disebut jenis *entrainment* yang stabil. Berdasarkan pengamatan dan beberapa perkiraan, diketahui bahwa lapisan yang stabil akan terbentuk ketika viskositas cairan lebih besar dari 5 mPas. Akan tetapi, hal tersebut juga bergantung pada tekanan ambien.

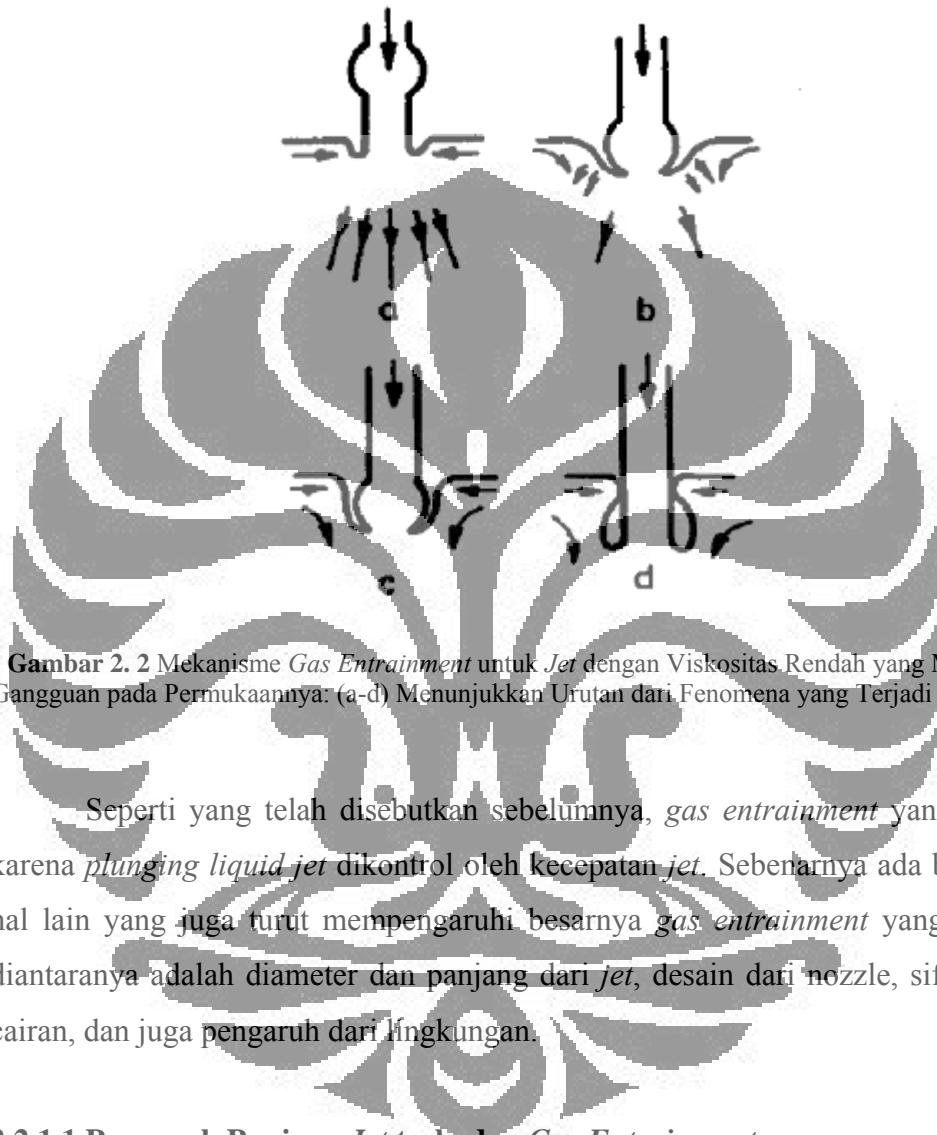


Gambar 2. 1 Cairan Viskos yang jatuh pada permukaan stagnan: (a) sudut kontak $\phi < 180$, (b) pembentukan lapisan udara (Bin [15])

Untuk *jet* dengan viskositas rendah yang memiliki gangguan pada permukaannya, gelombang dengan amplitudo yang terus meningkat, bergerak turun dalam suatu anulus gas yang mengelilingi titik jatuh yang menghasilkan suatu *entrainment* dalam bentuk sekumpulan gelembung-gelembung. Pada viskositas kurang dari 6.5 mPas, anulus gas (lapisan batas) hilang dan terbentuk suatu trumpet di sekeliling *jet*. Trumpet ini stabil dan *entrainment* tidak akan terjadi kecuali jika kecepatan *jet* ditingkatkan.

Mekanisme *entrainment* pada cairan jet dengan viskositas rendah yang memiliki gangguan pada permukaannya, terjadi karena adanya interaksi antara gangguan dengan permukaan stagnan (lihat gambar 2.2). Awalnya, pada permukaan cairan terbentuk meniskus kecil yang disebabkan oleh tekanan dari lapisan batas gas dengan permukaan stagnan. Ketika gangguan menumbuk permukaan cairan, terjadi deformasi yang membelah gumpalan cairan sehingga yang mengarah pada terjadinya gas entrainment pada titik jatuh. Pergerakan secara

horizontal dalam cairan stagnan tidak cukup cepat sehingga menyebabkan gelembung gas terperangkap di dalam cairan.

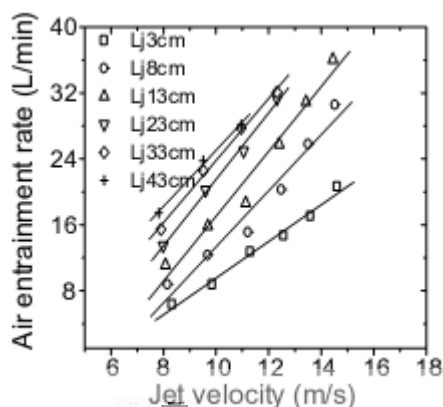


Gambar 2. 2 Mekanisme *Gas Entrainment* untuk *Jet* dengan Viskositas Rendah yang Memiliki Gangguan pada Permukaannya: (a-d) Menunjukkan Urutan dari Fenomena yang Terjadi (Bin [15])

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, *gas entrainment* yang terjadi karena *plunging liquid jet* dikontrol oleh kecepatan *jet*. Sebenarnya ada beberapa hal lain yang juga turut mempengaruhi besarnya *gas entrainment* yang terjadi, diantaranya adalah diameter dan panjang dari *jet*, desain dari nozzle, sifat fisika cairan, dan juga pengaruh dari lingkungan.

2.2.1.1 Pengaruh Panjang *Jet* terhadap *Gas Entrainment*

Menurut Oteyaka [16], pada kecepatan *jet* yang konstan, peningkatan panjang *jet*, mengakibatkan peningkatan *gas entrainment*. Gambar berikut merupakan hasil yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan.

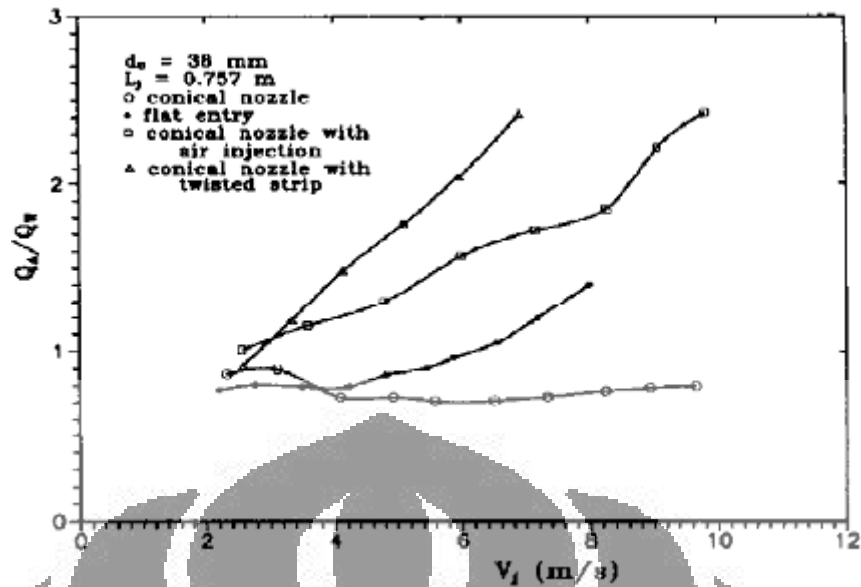


Gambar 2.3 Hasil Pengukuran Laju *Gas Entrainment* (Q_g) terhadap Kecepatan *Jet* (v_j) untuk Panjang *Jet* (L_j) yang Berbeda-Beda (Oteyaka [16])

Gambar di atas merupakan hasil yang diperoleh dengan menggunakan diameter *downcomer* 36 mm dan diameter nozzle 5 mm. Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa laju *gas entrainment* meningkat secara linier dengan meningkatnya kecepatan *jet*, sedangkan untuk kecepatan *jet* yang konstan, laju *gas entrainment* meningkat dengan meningkatnya panjang *jet*.

2.2.1.2 Pengaruh Desain Nozzle terhadap *Gas Entrainment*

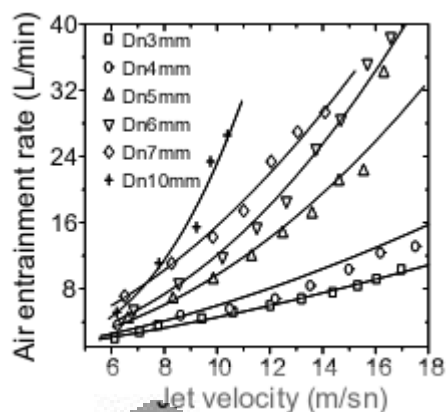
Menurut van de Donk [17], desain dari nozzle akan mempengaruhi rasio *entrainment*. Rasio *entrainment* didefinisikan sebagai rasio dari laju alir volumetrik gas terhadap cairan dan merupakan suatu ukuran dari kinerja *plunging jet*. Berdasarkan penelitian yang dilakukan van de Donk dengan menggunakan jenis nozzle (0.03 m ID) yang berbeda-beda, diperoleh hasil yang dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. 4 Pengaruh Desain Nozzle terhadap Rasio *Entrainment* (Q_g/Q_l) (van de Donk [17])

Dari gambar di atas, terlihat bahwa nozzle berbentuk kerucut (*conical nozzle*) menghasilkan rasio *entrainment* yang hampir konstan, sedangkan nozzle yang berbentuk datar pada bagian masuknya (*flat entry*) memberikan rasio *entrainment* yang lebih tinggi tanpa adanya *pressure drop* yang signifikan. Untuk nozzle berbentuk kerucut tetapi memiliki spiral di ujungnya (*conical nozzle with twisted strip*), menghasilkan rasio *entrainment* yang bahkan lebih tinggi lagi karena menghasilkan turbulensi yang lebih tinggi. Namun, hal ini disertai dengan *pressure drop* yang tinggi. Akibatnya, gas atau udara yang terbawa tidak sampai jauh di bawah permukaan cairan stagnan. Selain itu, semakin banyak *jet* yang terdispersi, semakin banyak pula energi yang hilang ketika berada di daerah dua fasa sehingga distribusi gelembung dan koefisien transfer massa cairan pada saat awal menjadi kurang baik jika dibandingkan dengan *plunging jet* yang koheren. Dengan kata lain, penggunaan *conical nozzle with twisted strip* memberikan efek ganda.

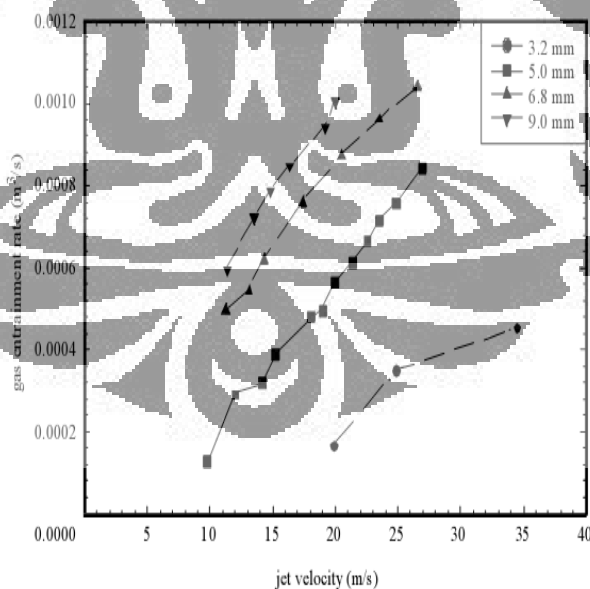
Selain jenis nozzle, diameter nozzle juga memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap *gas entrainment*. Hal ini dikemukakan oleh Oteyaka [16] di mana hasil penelitiannya dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.5 Hasil Pengukuran Laju *Gas Entrainment* (Q_g) terhadap Kecepatan *Jet* (v_j) untuk Diameter Nozzle (D_n) yang Berbeda-Beda (Oteyaka [16])

Gambar di atas menunjukkan bahwa ketika diameter nozzle diperbesar, maka laju *gas entrainment* semakin meningkat.

Hasil di atas senada dengan penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya oleh Liu dan Evans [18] seperti terlihat pada gambar berikut.

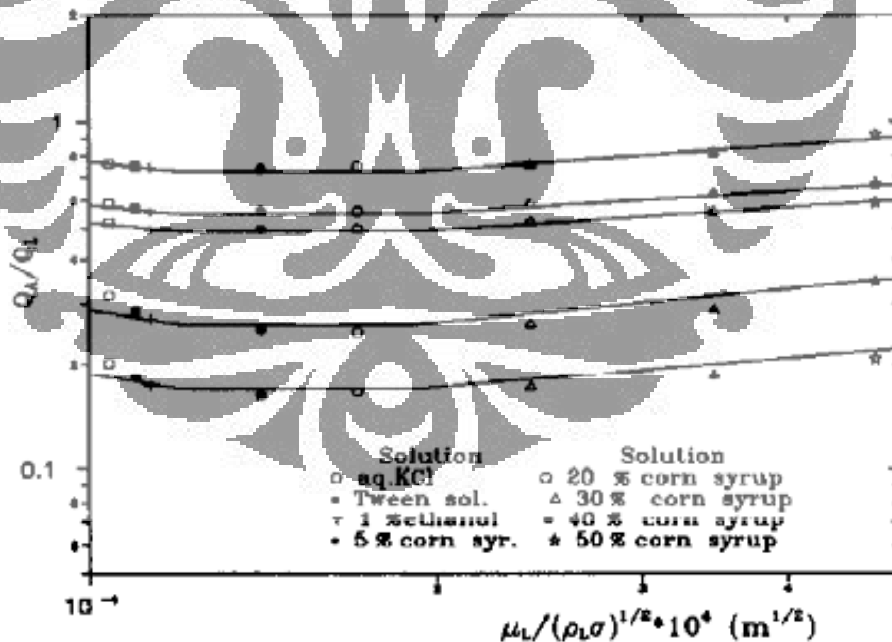


Gambar 2.6 Hubungan Laju *Gas Entrainment* (Q_g) terhadap Kecepatan *Jet* (v) pada Ukuran Diameter Nozzle (D_n) yang Berbeda-Beda (Liu dan Evans [18])

Peningkatan laju *gas entrainment* dengan meningkatnya diameter nozzle terjadi karena adanya peningkatan energi kinetik dari *jet*. Selain itu, peningkatan juga dikarenakan meningkatnya turbulensi permukaan *jet* dan daerah kontak antara *jet* dengan permukaan cairan stagnan.

2.2.1.3 Pengaruh Sifat Fisika Cairan terhadap *Gas Entrainment*

Poin berikutnya yang mempengaruhi *gas entrainment* adalah sifat fisika dari cairan. Beberapa peneliti (Bin [19], Ciborowski dan Bin [20], Cumming [21], Evans [22], Hera, *et al.*[23], Kumagai dan Endoh [24], Kusabiraki, *et al.* [25], Yagasaki dan Kuzuoka [26]) melakukan studi terhadap pengaruh viskositas cairan dan tegangan permukaan terhadap *gas entrainment*. Pada studi tersebut, viskositas kinematik divariasikan dari 8.8×10^{-7} hingga $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, sedangkan tegangan permukaan divariasikan dari 24×10^{-3} hingga $76 \times 10^{-3} \text{ Nm}^{-1}$. Kusabiraki, *et al.* [25] menunjukkan hasil penelitian yang mereka lakukan dalam gambar berikut.



Gambar 2. 7 Hubungan antara Q_g/Q_l dengan $\mu_L / (\rho_L \sigma)^{1/2}$ (Kusabiraki, *et al.* [25])

Gambar 2.7 menunjukkan hubungan antara rasio *entrainment* dengan kombinasi sifat fisika suatu cairan. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa ada tiga

daerah yang terbentuk dari hubungan kebergantungan ini. Menurut penulis, hal tersebut berkaitan dengan perubahan bentuk *jet* yang terjadi pada cairan yang berbeda-beda sebelum jatuh pada permukaan cairan stagnan.

2.2.1.4 Pengaruh Pembatas terhadap *Gas Entrainment*

Untuk meningkatkan kedalaman penetrasi gelembung yang terbentuk karena *gas entrainment*, maka digunakan suatu pembatas yaitu *vertical downcomer* dalam suatu sistem *jet* yang biasa. Penggunaan *downcomer* dengan ukuran yang tepat (diameter dan panjang) akan menghasilkan induksi pada kecepatan ke bawah (*downward velocity*) yang mengakibatkan meningkatnya kedalaman penetrasi gelembung di atas nilai batas yang dapat dicapai oleh sistem *jet* yang biasa. Penggunaan *downcomer* yang berukuran kecil akan memaksa terjadinya dispersi gas-cair.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Ohkawa, *et al.* [10], dengan meningkatnya kecepatan *jet*, maka kedalaman penetrasi gelembung akan meningkat sementara panjang *jet* menurun karena permukaan cairan stagnan dalam *downcomer* meningkat. Tren ini terus berlangsung hingga gelembung mencapai ujung bawah *downcomer* dan dibelokkan ke atas menuju permukaan cairan. Pada kondisi aliran sepanjang *downcomer*, terbentuk gelembung-gelembung yang uniform (dispersi gas-cair sangat baik). Namun, di daerah luar (di antara *downcomer* dan dinding tangki), dispersi gas-cair yang terjadi kecil, kecuali jika dilakukan peningkatan kecepatan *jet* agar *downward velocity* dalam *downcomer* meningkat.

2.2.1.5 Korelasi untuk *Gas Entrainment*

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengkorelasikan laju *gas entrainment*. Dalam penelitian tersebut, laju *gas entrainment* dikorelasikan terhadap sejumlah variabel termasuk didalamnya diameter nozzle (D_n), kecepatan *jet* (v_j), panjang *jet* (L_j), laju alir volumetrik cairan (Q_l) dan diameter kolom (D_c). Korelasi yang diusulkan oleh Ohkawa, *et al.* [10] adalah sbb.

$$Q_g = 0.698(D_n^2 V_j^3)^{0.8} \left(\frac{D_n}{D_c}\right)^{1.3} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{-1} \quad (2.1)$$

di mana 0.698 ditentukan berdasarkan penelitian dan merupakan fungsi dari sifat-sifat fisika fluida yang digunakan.

Korelasi lain yang juga dikembangkan oleh Ohkawa, *et al.* [27] adalah sbb.

$$\frac{Q_g}{Q_l} = C_1 (Fr_n^{C_2} Oh_n^{C_3})^{0.8} \left(\frac{L_n}{D_n}\right)^{0.5} \quad (2.2)$$

di mana Fr_n dan Oh_n adalah bilangan Froude dan bilangan Ohnesorge yang berdasarkan pada kecepatan *jet* dan diameter nozzle, sedangkan C_1 , C_2 , dan C_3 adalah parameter yang ditentukan berdasarkan penelitian.

Menurut Yamagiwa, *et al.* [28]:

$$\frac{Q_g}{Q_l} = 2.24 \times 10^{-3} Fr_c^{0.4} Re_n^{0.26} \left(\frac{L_j}{D_n}\right)^{0.48} \quad (2.3)$$

di mana Fr_c adalah bilangan Froude yang berdasarkan pada diameter kolom.

Menurut Liu dan Evans [18], hasil penelitian pada gambar 2.6 dapat dikorelasikan menggunakan hubungan berikut.

$$\frac{Q_g}{Q_l} = A \left(\frac{D_n}{D_c}\right)^2 Re_n^{\left(1 - \sqrt{\frac{D_n}{D_c}}\right)} \quad (2.4)$$

di mana Re_n adalah bilangan Reynold nozzle yang berdasarkan pada diameter nozzle, kecepatan cairan pada nozzle, dan sifat-sifat fisika dari cairan, sedangkan A (0.057) adalah parameter yang ditentukan berdasarkan penelitian. Penelitian yang dilakukan hanya memvariasikan diameter nozzle pada rentang 3-6 mm dan kecepatan pancaran pada rentang 7-35 m/s untuk sistem udara-air.

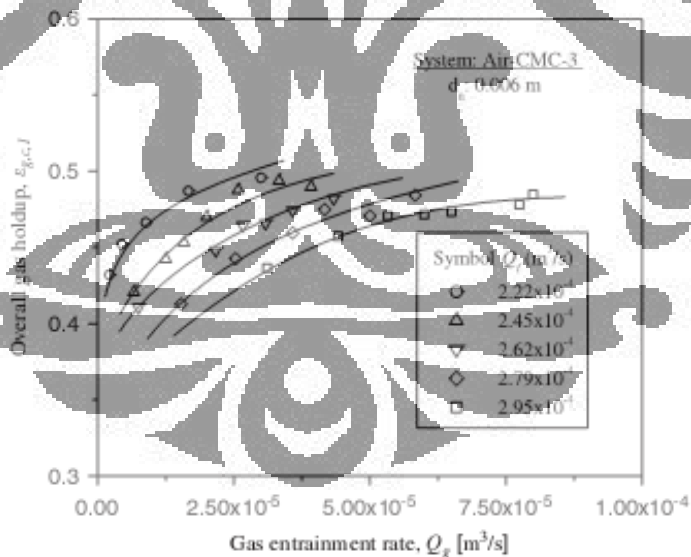
Menurut Kundu, *et al.* [29], korelasi untuk rasio *gas entrainment* (G_{er}) yang dipengaruhi oleh variabel momentum *jet*, panjang *jet* sebelum pencampuran, dan panjang *jet* setelah penetrasi dengan cairan dalam kolom adalah sbb.

$$G_{er} = c_1 Re_l^{b_1} Ar^{b_2} Hr^{b_3} Su^{b_4} Mo^{b_5} \quad (2.5)$$

di mana Re_l adalah bilangan Reynold nozzle yang berdasarkan pada diameter kolom, A_r adalah rasio luas kontak terhadap nozzle, H_r adalah rasio ketinggian cairan dalam kolom terhadap diameter kolom, Su adalah bilangan Suratmann yang berdasarkan diameter kolom dan Mo adalah bilangan Morton, sedangkan $c1$, $b1$, $b2$, $b3$, $b4$, dan $b5$ adalah konstanta yang diperoleh melalui regresi linier berganda berdasarkan data-data penelitian.

2.2.2 Holdup Gas

Holdup gas adalah fraksi fasa gas yang mengisi ruang-ruang di antara cairan dalam bentuk gelembung-gelembung yang terjadi akibat tumbukan antara *plunging jet* dengan larutan dalam kolom absorpsi. Seperti halnya *gas entrainment*, harga *holdup* gas juga dipengaruhi oleh beberapa variabel. Pada gambar berikut dapat dilihat pengaruh *gas entrainment* terhadap *holdup* gas berdasarkan penelitian yang dilakukan Kundu, *et al.* [30].

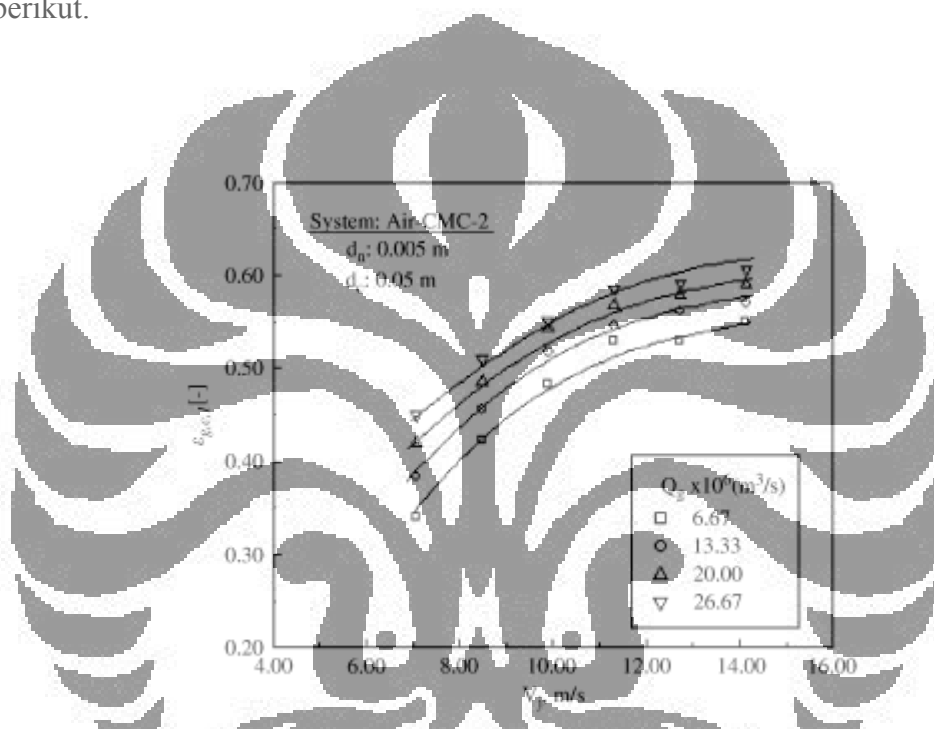


Gambar 2. 8 Perubahan *Holdup* Gas dengan Variasi Laju Alir Gas (Kundu, *et al.* [30])

Dari gambar di atas, terlihat bahwa pada laju alir cairan yang konstan untuk sistem udara-CMC (*carboxy methyl cellulose*), *holdup* gas meningkat dengan meningkatnya laju alir gas. Hal ini dikarenakan semakin tinggi laju alir

gas, maka semakin tinggi populasi gelembung yang dapat terbentuk yang berarti semakin tinggi *holdup* gas. Selain itu, diketahui pula bahwa gelembung yang terbentuk dalam sistem tersebut cukup besar ($d_b \sim 3.5\text{mm}$) dan berada dalam waktu yang cukup lama di dalam kolom sehingga dapat diperoleh *holdup* gas yang cukup tinggi (0.34–0.61).

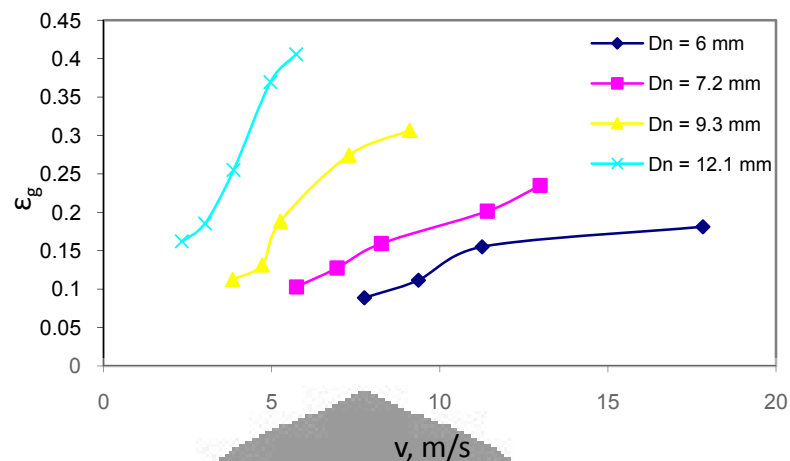
Selain *gas entrainment*, Kundu, *et al.* [30] juga mengemukakan bahwa kecepatan *jet* juga berpengaruh pada *holdup* gas seperti terlihat pada gambar berikut.



Gambar 2.9 Perubahan *Holdup* Gas dengan Variasi Kecepatan *Jet*. (Kundu, *et al.* [30])

Peningkatan *holdup* gas dengan meningkatnya kecepatan *jet* seperti yang terjadi pada gambar di atas dikarenakan adanya peningkatan energi kinetik dari cairan *jet*. Selain itu, peningkatan juga dikarenakan adanya peningkatan turbulensi pada permukaan *jet* dan peningkatan daerah kontak antara *jet* dengan permukaan cairan stagnan.

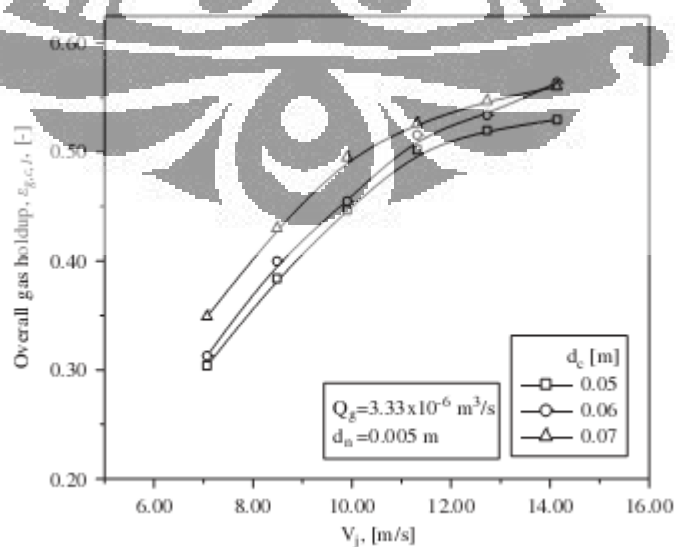
Menurut Hadiyani [31], diameter nozzle juga berpengaruh pada harga *holdup* gas. Gambar di bawah menunjukkan hubungan antara *holdup* gas (ϵ_g) terhadap kecepatan *jet* (v) pada ukuran diameter nozzle yang berbeda (D_n) berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Hadiyani [31].



Gambar 2. 10 Hubungan antara Laju *Gas Entrainment* (Q_g) terhadap Kecepatan *Jet* (v) pada Ukuran Diameter Nozzle (D_n) yang Berbeda-Beda (Hadiyani [31])

Pada gambar di atas terlihat bahwa semakin besar diameter nozzle, maka *holdup* gas semakin besar pula. Hal ini terjadi karena pada diameter nozzle yang besar, gelembung yang terbentuk juga besar sehingga gaya buoyansi menjadi lebih besar. Akibatnya, gelembung bergerak lebih lambat dan memiliki waktu tinggal lama di dalam cairan sehingga *holdup* gas meningkat.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Kundu *et al.* [30], perubahan diameter kolom tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap *holdup* gas.



Gambar 2. 11 Perubahan *Holdup* Gas dengan Variasi Diameter Kolom (Kundu *et al.* [30])

Gambar di atas menunjukkan hal yang dinyatakan Kundu *et al.* [30]. Peningkatan *holdup* gas dengan meningkatnya diameter kolom pada kecepatan *jet* yang konstan kemungkinan dikarenakan penurunan kecepatan cairan ke bawah (*downward liquid velocity*) di dalam kolom. Hal ini mengindikasikan bahwa *holdup* gas terutama dipengaruhi oleh kondisi dari titik jatuhnya *jet* (*jet plunging point*) seperti energi kinetik dari cairan *jet*, turbulensi pada permukaan *jet* dan daerah kontak antara *jet* dengan permukaan cairan stagnan.

Berdasarkan beberapa variabel yang mempengaruhi *holdup* gas, sejumlah korelasi telah dibuat untuk memprediksi *holdup* gas pada sistem *plunging jet*. Salah satunya adalah korelasi yang diusulkan oleh Ohkawa, *et al.* [32]:

$$\varepsilon_g = 0.396 V_j^{0.78} L_j^{0.38} \quad (2.6)$$

yang menggunakan kecepatan *jet* dan kedalaman penetrasi untuk mengkorelasikan *holdup* gas.

Menurut Evans [22], korelasi untuk *holdup* gas adalah:

$$\varepsilon_g = \frac{U_g}{C_0(U_g + U_l) - U_r} \quad (2.7)$$

di mana C_0 (0.92) adalah koefisien distribusi untuk bilangan Reynold, lebih besar dari 10,000 dan U_r adalah kecepatan naiknya gelembung dalam kolom yang dihitung menurut persamaan:

$$U_r = K [g\sigma(\rho_l + \rho_g)/\rho_l^2]^{1/4} \quad (2.8)$$

dengan nilai K diasumsikan konstan sebesar 1.53. Korelasi tersebut dibuat berdasarkan analisis Drift-Flux oleh Zuber dan Findlay [33].

Namun, berdasarkan penelitian Liu dan Evans [18] yang selanjutnya, diperoleh korelasi untuk *holdup* fasa gas sbb.:

$$\varepsilon_g = \frac{U_g}{0.92(U_g + U_l) - 0.2} \quad (2.9)$$

di mana diameter kolom pancaran cairan yang digunakan adalah 25 mm untuk sistem udara-air.

Berdasarkan studi hidrodinamika yang dilakukan Kundu, *et al.* [34] pada gas cairan dalam *downflow bubble column*, korelasi untuk *holdup* gas adalah sbb.

$$\varepsilon_g = c_1 Re_l^{b_1} A_r^{b_2} H_r^{b_3} \mu_r^{b_4} Mo^{b_5} \quad (2.10)$$

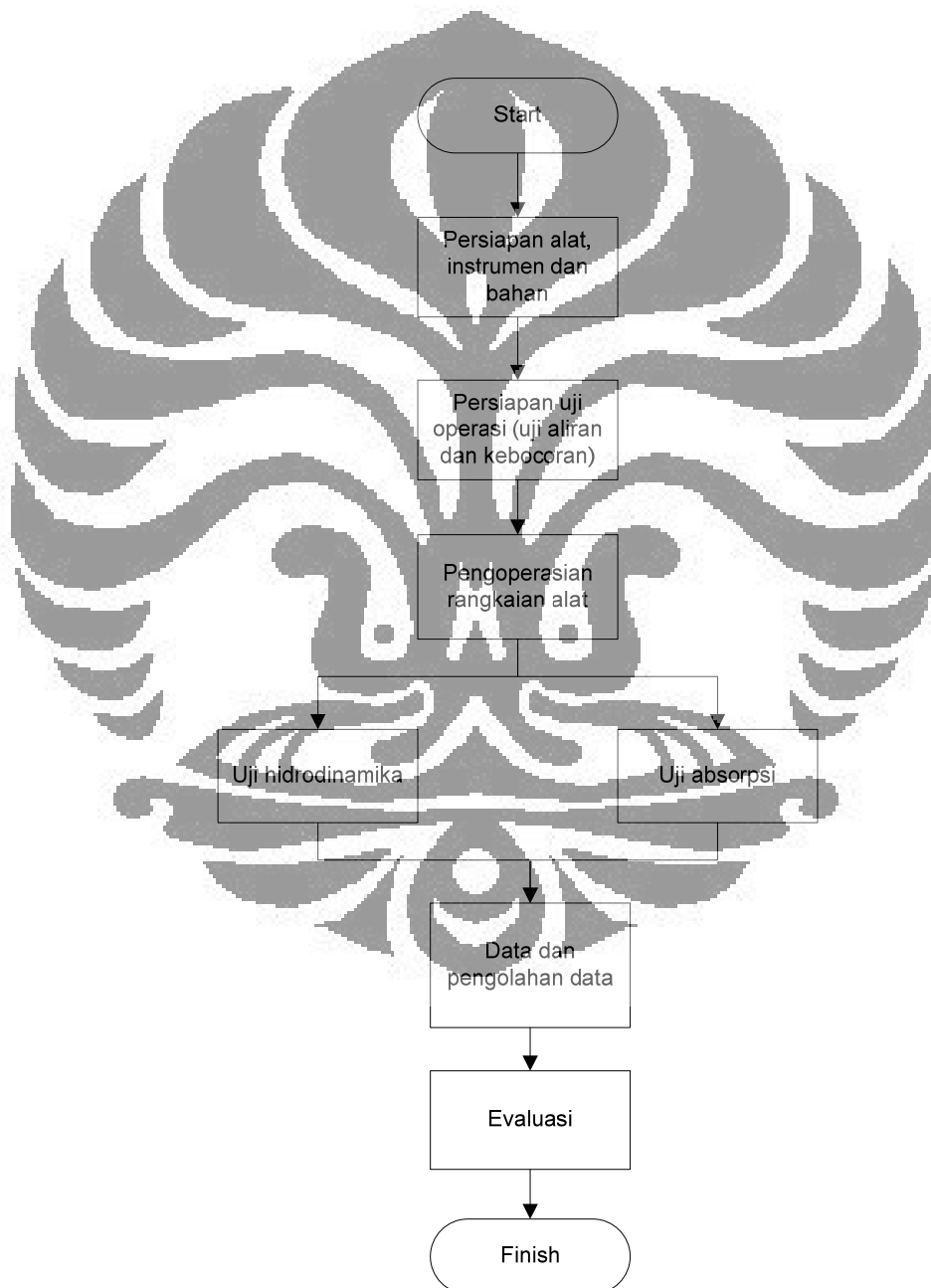
di mana Re_l adalah bilangan Reynold nozzle yang berdasarkan pada diameter kolom, A_r adalah rasio luas kontak terhadap nozzle, H_r adalah rasio ketinggian cairan dalam kolom terhadap diameter kolom, μ_r adalah rasio viskositas gas terhadap cairan, Su adalah bilangan Suratmann yang berdasarkan diameter kolom dan Mo adalah bilangan Morton, sedangkan c_1 , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , dan b_5 adalah konstanta yang diperoleh melalui regresi linier berganda berdasarkan data-data penelitian.



BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

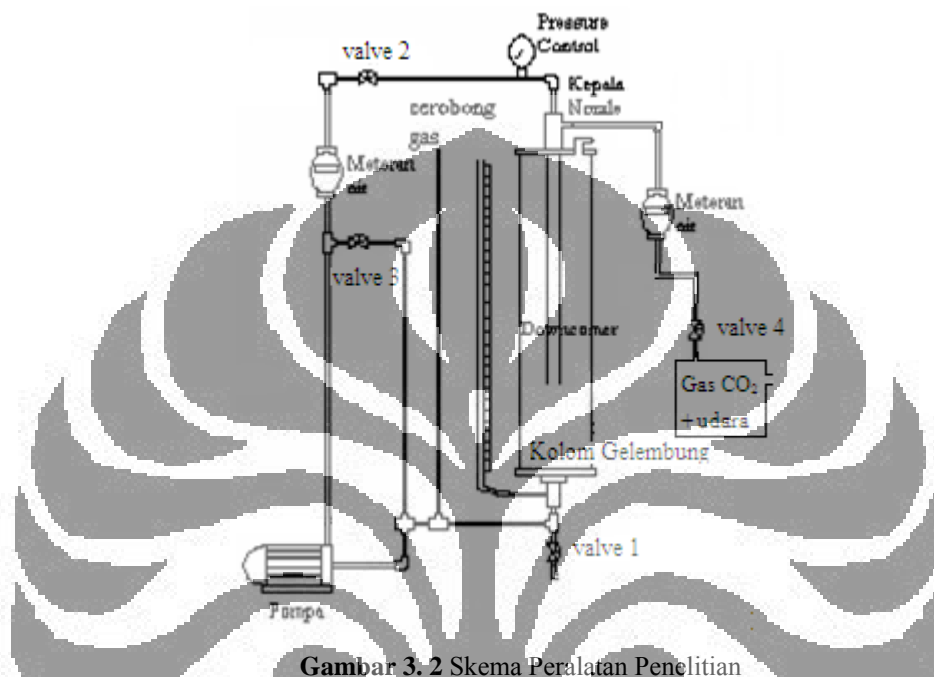
Aktivitas utama penelitian dilakukan di Laboratorium DTK, Universitas Indonesia, Depok. Berikut adalah diagram alir penelitian yang dilakukan.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Untuk melaksanakan penelitian ini, diperlukan alat dan instrumen yang disusun menurut skema seperti berikut.



Gambar 3. 2 Skema Peralatan Penelitian

Alat:

- Kolom gelembung pancaran
Merupakan peralatan utama dalam percobaan ini. Kolom ini berfungsi sebagai tempat berlangsungnya kontak gas dan cair. Aliran gas dan cair masuk dari bagian atas kolom di mana gas akan mengalir ke bawah kemudian ke atas (*co-current up ward*), sedangkan cair akan mengalir ke bawah kemudian diresirkulasikan oleh pompa.

Spesifikasi dari kolom gelembung ini adalah:

Bahan kolom : *plexy glass*

Tinggi : 100 cm

Diameter : 11 cm

- Kolom *downcomer*

Berfungsi agar gas yang terhisap tidak terbuang langsung ke lingkungan, memberikan efek gas yang terhisap cukup besar apabila dibandingkan dengan tidak menggunakan *downcomer* serta meningkatkan arus pusaran.

Spesifikasi dari kolom *downcomer* ini adalah:

Bahan kolom : *plexy glass*

Tinggi : 50 cm

Diameter : 3,2 cm

- Kepala Nozzle

Berfungsi untuk mengalirkan cairan dengan kecepatan *jet* (pancaran) sehingga dapat menghisap gas ke dalam kolom gelembung pancaran ketika cairan mengalir. Gas akan terhisap melalui lubang yang terdapat pada bagian samping badan kepala nozzle.

- Kotak Sampel

Berfungsi sebagai tempat sample gas.

- Pompa

Berfungsi untuk mensirkulasikan fluida cair dalam kolom gelembung pancaran.

Spesifikasi pompa yang digunakan adalah :

Merek : Lakoni

No Seri : EP 004748

Daya : 175 watt

Voltage : 220 volt

Ampere : 2 A

Kapasitas maksimum : 120 lt/min

Hmax : 25 m

- *Valve*

Jenis *valve* yang digunakan sebagian besar adalah *ball valve*.

- **Meteran air**
 Berfungsi untuk mengukur kecepatan aliran cairan dan gas yang masuk ke dalam kolom gelembung pancaran.
 Spesifikasi meteran air yang digunakan adalah:
 Merek : Schlumberger
 Q_n : $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$

- *Pressure indicator*
 Berfungsi sebagai pengukur tekanan cairan yang masuk ke dalam nozzle.
 Spesifikasi *pressure indicator* yang digunakan :
 Merek : Steins
 Tekanan maksimum : 1 bar

- *Gas chromatography*
 Berfungsi untuk menganalisis sampel CO_2 . *Gas chromatography* yang digunakan dilengkapi dengan TCD.

- **Konduktivimeter**
 Berfungsi untuk mengukur besarnya konduktivitas larutan dengan satuan $\mu\text{S}/\text{cm}$. Konduktivimeter yang digunakan mempunyai skala 19,9-1999,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Konduktivitas yang diukur pada penelitian adalah konduktivitas absorben.

- **Viskometer dan piknometer**
 Viskometer digunakan untuk mengukur viskositas cairan, sedangkan piknometer untuk mengukur densitas cairan.

- **Pipa kapiler**
 Berfungsi untuk mengukur tegangan permukaan cairan.

Bahan:

- Fasa cair : air dan absorben komersial (MDEA)

- Fasa gas : gas CO₂ dan udara
- Fasa padat : NaOH, KOH

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Persiapan Uji Operasi

Tahap ini meliputi uji aliran dan kebocoran pada rangkaian alat. Uji aliran dan kebocoran dilakukan untuk menguji kelayakan operasi rangkaian alat. Langkah-langkah yang dilakukan untuk uji aliran dan kebocoran yaitu:

1. Menutup semua *valve* pada rangkaian alat.
2. Memasukkan air ke dalam kolom gelembung melalui cerobong gas sampai diperoleh ketinggian cairan yang diinginkan.
3. Membuka *valve* 2, *valve* 3 dan *valve* 4 lalu menyalakan pompa dan mengamati apakah ada sambungan-sambungan yang mengalami kebocoran.
4. Mengencangkan sambungan-sambungan yang mengalami kebocoran atau bisa dengan menambahkan isolasi pipa.

3.3.2 Pengoperasian Rangkaian Alat

Pengoperasian rangkaian alat bertujuan untuk uji hidrodinamika dan uji absorpsi. Prosedur untuk uji hidrodinamika adalah sbb.:

1. Menutup semua *valve* pada rangkaian alat.
2. Memasukkan air ke dalam kolom gelembung melalui cerobong gas sampai diperoleh ketinggian cairan yang diinginkan.
3. Menghidupkan pompa.
4. Membuka penuh *valve* 2 dan *valve* 4 (dihubungkan ke kotak sampel yang hanya berisi udara), serta mengatur bukaan *valve* 3 untuk mengatur laju alir volumetrik cairan yang diinginkan.
5. Mencatat waktu yang diperlukan untuk volume gas dan volume cairan tertentu pada meteran air.
6. Mencatat tinggi cairan pada kolom dan pada *static pressure control*.

Variabel bebas: diameter nozzle, laju alir volumetrik cairan, kedalaman penetrasi gelembung, viskositas dan densitas cairan (untuk memvariasikan viskositas dan densitas cairan, air ditambahkan dengan MDEA ketika melakukan langkah ke-2).

Prosedur untuk uji absorpsi adalah sbb.:

1. Menutup semua *valve* pada rangkaian alat.
2. Memasukkan absorben ke dalam kolom gelembung melalui cerobong gas sampai diperoleh ketinggian cairan yang diinginkan.
3. Menghidupkan pompa.
4. Membuka penuh *valve* 2 dan *valve* 4 (dihubungkan ke kotak sampel yang sudah dimasukkan gas CO₂), serta mengatur bukaan *valve* 3 untuk mengatur laju alir volumetrik cairan yang diinginkan.
5. Mengambil sampel gas keluaran kolom gelembung pancaran untuk interval waktu tertentu sampai kondisi absorben jenuh.
6. Melakukan analisis sampel gas dengan GC.

Variabel bebas: kondisi operasi terbaik dan terburuk berdasarkan data dari prosedur sebelumnya, absorben.

3.3.3 Analisis Sampel

Pengambilan sampel gas dilakukan di titik keluaran kolom gelembung pancaran. Sampel diambil dengan *syringe* dan kemudian dianalisis dengan GC-TCD dengan gas pembawa helium. Berikut adalah prosedur pengoperasian GC [31] untuk analisis sampel.

1. Pemanasan alat (*warming up*)
 - 1.1 GC
 - a. Tekan tombol pembacaan temp pada INJ.
 - b. Atur temperatur kolom yang diinginkan (untuk program isothermal, initial, dan final diisi dengan temperatur yang sama).
 - c. Atur temperatur injektor (INJ) dan detektor (DET); temperatur minimal harus 20°C di atas temperatur kolom.

- d. Pastikan masing-masing temperatur telah naik.
- e. Atur pengontrol POL pada posisi negatif, besar ATT pada 1.
- f. Alat ditunggu sampai stabil ± 60 menit.
- g. Atur Arus GC pada posisi 60 mA.

1.2 Recorder C-R6A

- a. Tekan power on pada recorder.
- b. Tekan I – N – I (sambil menekan shift down) dan enter.
- c. Tekan Shift down plot enter, tunggu sampai garis kromatogram stabil, untuk menghentikan plotting maka tekan sekali lagi shift down plot enter.
- d. Tekan print kemudian level sambil menekan ctrl (dilepas setelah menekan level) enter.
- e. Atur zero point kromatograf sehingga zero point berada pada level antara -1000 sampai dengan +5000 (μV) (jika belum masuk range tunggu beberapa menit untuk diuji lagi).
- f. Tekan zero enter.
- g. Tekan shift down self test enter.
- h. Tekan Attenuation Recorder pada 7.

2. Analisis sampel

- 2.1 Sampel yang akan dianalisis diinjeksikan dengan *syringe* sebanyak 1 mL.
- 2.2 Setelah muncul peak antara 5 – 10 menit, tekan stop apabila diperkirakan tidak akan muncul peak lagi.
- 2.3 Apabila sudah diketahui waktu akhir munculnya peak dari sampel, maka bisa difungsikan automatic stopped dengan memfungsikan tombol stop time pada recorder dan diisi dengan waktu stop yang diinginkan.

3. Pemberhentian alat

- 3.1 Atur temperatur initial, final, pada 20°C , dan buka pintu kolom.
- 3.2 Matikan detektor TCD dengan mengatur current GC pada 0.
- 3.3 Atur temperatur INJ dan TCD pada 20°C .

- 3.4 Pastikan temperatur kolom telah turun sampai temperatur ruang, temperatur INJ dan DET dibawah 60°C.
- 3.5 Matikan GC dan recorder dengan menekan power off.
- 3.6 Tutup valve utama tabung silinder carrier gas (gas pembawa).

Dengan GC, kita akan memperoleh kromatogram yang berguna untuk menghitung konsentrasi CO₂.

3.4 Pengolahan Data

3.4.1 Penentuan Laju *Gas Entrainment*

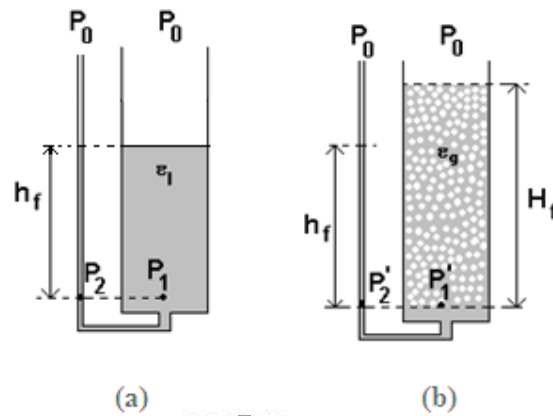
Laju *gas entrainment* dihitung dengan rumus berikut

$$Q_g = \frac{Vg}{t} \quad (3.1)$$

di mana Vg merupakan volume gas yang terukur, sedangkan t merupakan waktu yang diperlukan untuk mencapai Vg tersebut.

3.4.2 Penentuan *Holdup Gas*

Untuk menghitung *holdup* gas [31], kita dapat menggunakan prinsip dasar tekanan pada kolom gelembung dengan tambahan dari saluran peralatan tambahan dan mengacu pada persamaan aksi tekanan statik pada desain, di mana ketinggian merupakan suatu derajat penurunan akhir pada kolom gelembung pancaran yang ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 3. 3 Skema Presentasi dari Kestimbangan Tekanan Statik pada Kolom Gelembung

Pada gambar 3.3 point (a), kita dapat turunkan persamaan matematikanya sebagai berikut:

$$P_2 = P_0 + \rho g h_f \epsilon_l \quad (3.2)$$

$$P_1 = P_0 + \rho g h_f \epsilon_l \quad (3.3)$$

Pada point (a), belum ada *holdup* gas sehingga nilai ϵ_l berharga 1 dan persamaan di atas akan menjadi:

$$P_2 = P_0 + \rho g h_f \quad (3.4)$$

$$P_1 = P_0 + \rho g h_f \quad (3.5)$$

Pada gambar 3.3 point (b), kita juga dapat menurunkan persamaan matematikanya sebagai berikut:

$$P'_1 = P_0 + \rho g H_f \epsilon_l \quad (3.6)$$

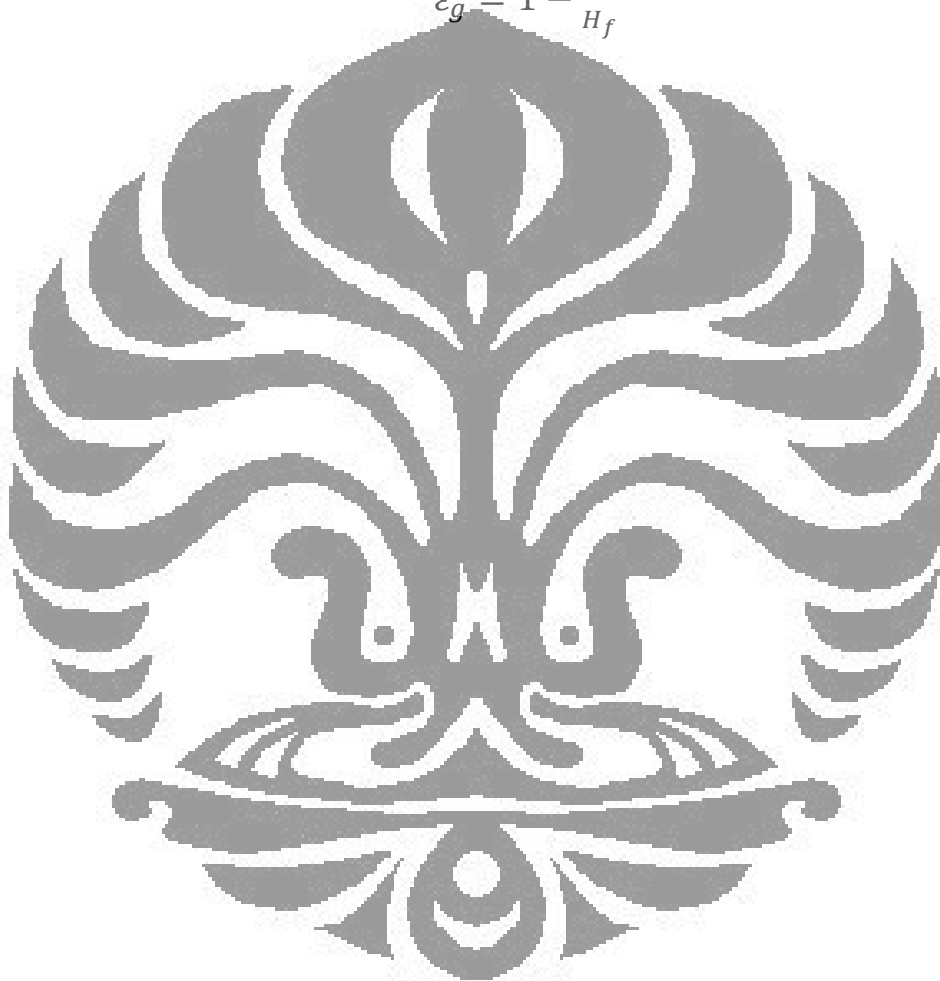
$$P'_2 = P_0 + \rho g h_f \quad (3.7)$$

di mana nilai $\epsilon_l = 1 - \epsilon_g$ karena sudah ada *holdup* gas maka persamaan akan menjadi:

$$P'_1 = P_0 + \rho g H_f (1 - \epsilon_g) \quad (3.8)$$

Pada point (b), tekanan statik P_1' sama dengan P_2' sehingga kita akan memperoleh persamaan untuk menghitung nilai *holdup* gas sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 P_2' &= P_1' \\
 P_0 + \rho g h_f &= P_0 + \rho g H_f (1 - \varepsilon_g) \\
 h_f &= H_f (1 - \varepsilon_g) \\
 \varepsilon_g &= 1 - \frac{h_f}{H_f}
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$



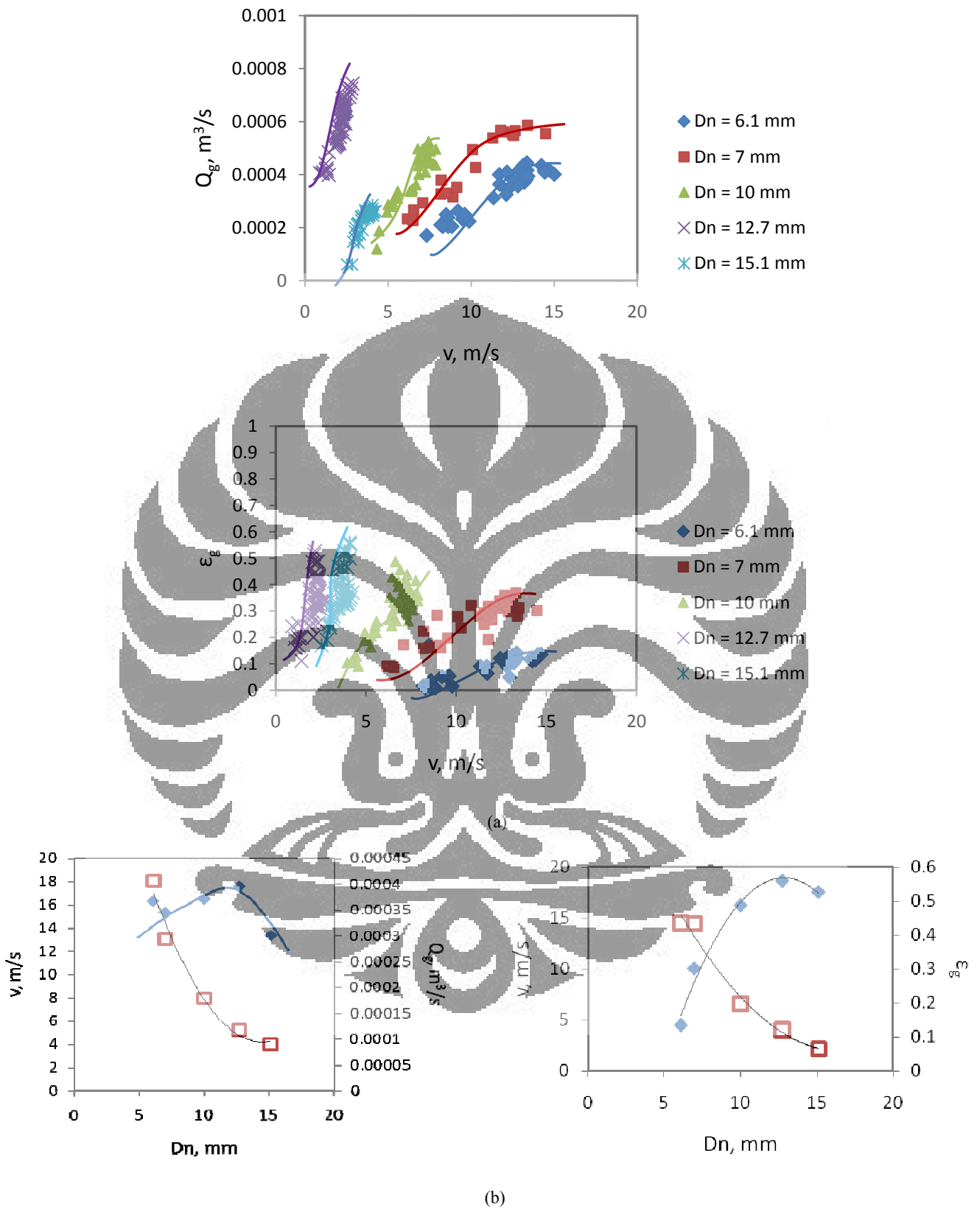
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan dengan menggunakan kolom gelembung pancaran. Kinerja dari kolom gelembung pancaran dapat dilihat berdasarkan laju *gas entrainment* (Q_g) dan *holdup* gas (ε_g) nya yang timbul karena adanya tumbukan *liquid jet* (pancaran cairan) dengan cairan stagnan (diam). *Gas entrainment* adalah banyaknya gas yang masuk atau ikut tersedot oleh cairan yang masuk ke dalam kolom, sedangkan *holdup* gas adalah fraksi fasa gas yang mengisi ruang-ruang di antara cairan dalam bentuk gelembung-gelembung. Kedua variabel tersebut nilainya dipengaruhi oleh beberapa variabel sbb.

- Variabel fisika: sifat fisika dari fluida cair dan gas yaitu $\rho_l, \mu_l, \sigma_l, \rho_g, \mu_g$
- Variabel geometri (desain): diameter nozzle (D_n), diameter kolom (D_c), dan ketinggian permukaan cairan dalam kolom (h_c)
- Variabel dinamik (proses): laju volumetrik cairan dan gas (Q_l dan Q_g)

Pada penelitian yang dilakukan, variabel-variabel yang divariasikan adalah diameter nozzle (D_n), kecepatan *jet* (v), ketinggian permukaan cairan dengan ujung pelepasan kolom *downcomer* (Z), viskositas cairan (μ) dan densitas cairan (ρ).

Hasil uji kinerja peralatan untuk mengetahui laju *gas entrainment* (Q_g) *holdup* gas (ε_g) dengan memvariasikan diameter nozzle (D_n) dan kecepatan *jet* (v) dapat dilihat pada gambar 4.1.

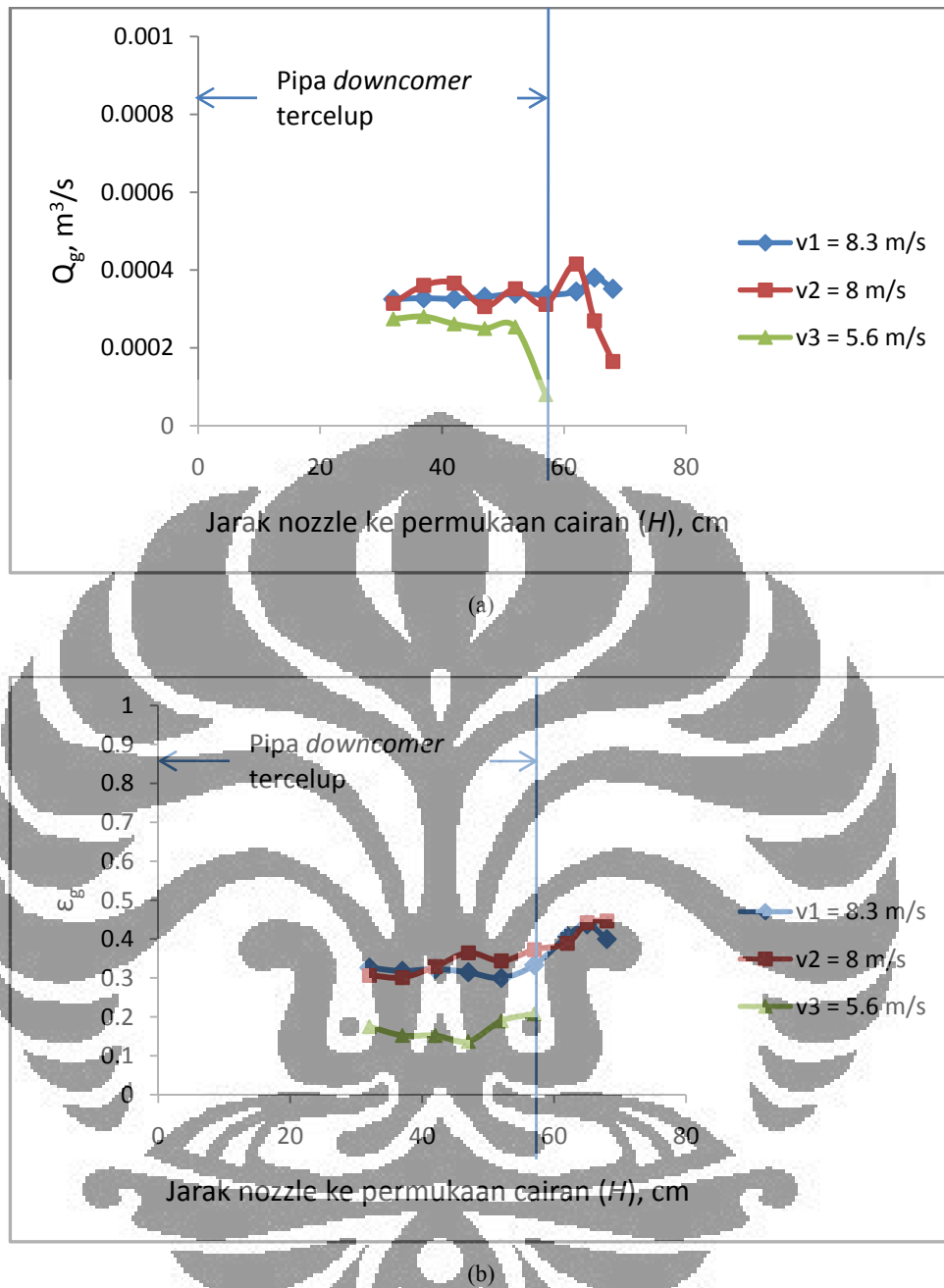


Gambar 4. 1 Hasil Pengukuran (a) Laju Gas Entrainment (Q_g) (atas) dan Holdup Gas (ϵ_g) (bawah) terhadap Kecepatan Jet (v) dengan Variasi Diameter Nozzle (D_n) dan (b) pada Kemampuan Maksimal Peralatan: Laju Gas Entrainment (Q_g) (kanan) dan Holdup Gas (ϵ_g) (kiri)

Hasil pengukuran untuk gambar 4.1 (a) senada dengan hasil yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan Oteyaka [16] dan Liu dan Evans [18]. Pada gambar 4.1 (a) terlihat bahwa dengan peningkatan ukuran diameter nozzle, maka untuk menghasilkan laju *gas entrainment* dan *holdup* gas yang sama, hanya diperlukan kecepatan *jet* yang lebih kecil. Hal ini disebabkan pada diameter nozzle yang besar, massa yang keluar dari nozzle juga lebih besar sehingga ada peningkatan energi kinetik yang mampu menghasilkan momentum (daya tumbuk) yang sama dengan momentum yang dihasilkan dari diameter nozzle yang lebih kecil tetapi dengan kecepatan *jet* yang lebih besar. Oleh karena itu, dapat dihasilkan harga laju *gas entrainment* dan *holdup* gas yang sama.

Gambar 4.1 (b) merupakan hasil pengukuran pada kemampuan maksimal peralatan. Kemampuan maksimal yang dimaksud adalah pada kecepatan maksimum peralatan. Pada gambar 4.1 (b), terlihat bahwa pada diameter nozzle (D_n) 12.7 mm terjadi titik maksimum (laju *gas entrainment* dan *holdup* gas maksimal). Hal ini karena adanya pengaruh dispersi gelembung dan ruang kosong yang tersedia di antara gelembung. Jika ada cukup ruang kosong untuk terbentuknya gelembung, maka ketika diameter nozzle meningkat, laju *gas entrainment* juga meningkat mengakibatkan populasi gelembung yang terbentuk juga meningkat yang berarti *holdup* gas juga meningkat. Akan tetapi, ketika melewati suatu batas tertentu di mana tidak tersedia lagi ruang kosong yang cukup, laju *gas entrainment* hanya sedikit berpengaruh terhadap populasi gelembung dan tumbukan yang terjadi antar gelembung meningkat dengan signifikan sehingga *holdup* gas tidak lagi meningkat. Batas tertentu inilah yang menjadikan titik maksimum (laju *gas entrainment* dan *holdup* gas maksimal) dimana ternyata dicapai saat diameter nozzle 12.7 mm. Oleh karena itu, setelah melampaui titik maksimum, tidak akan terjadi peningkatan *holdup* gas maupun laju *gas entrainment* walaupun diameter nozzle diperbesar.

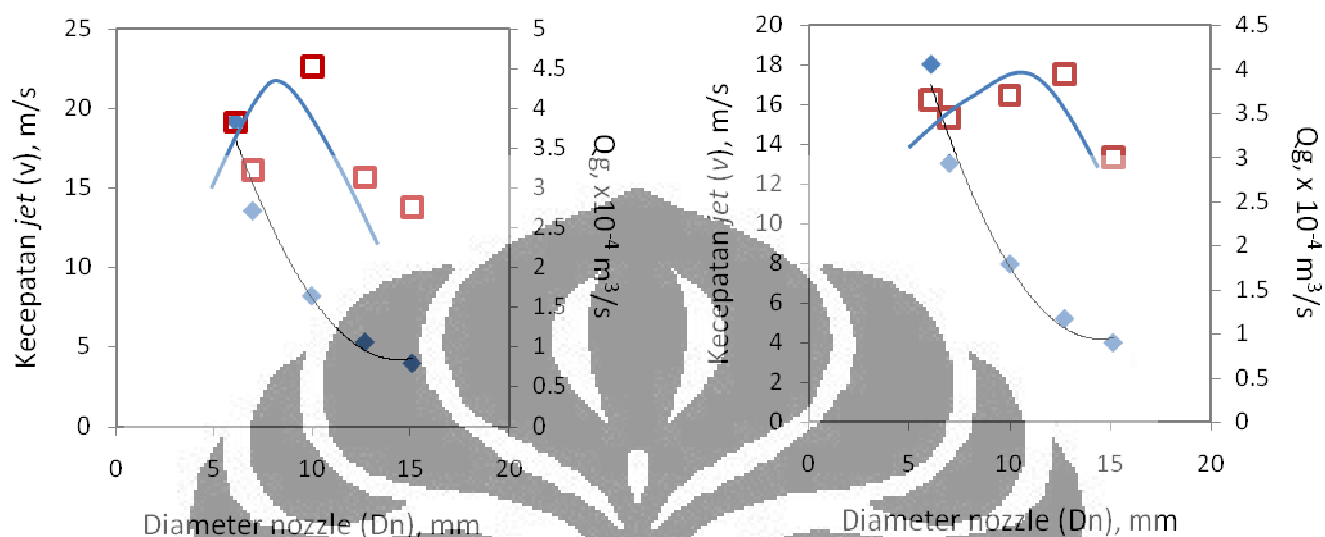
Pada gambar berikut dapat dilihat pengaruh ketinggian permukaan cairan terhadap ujung pelepasan kolom *downcomer* terhadap laju *gas entrainment* (Q_g) dan *holdup* gas (ϵ_g).



Gambar 4. 2 Pengaruh Kondisi Pipa *Downcomer* terhadap (a) Laju Gas Entrainment (Q_g) dan (b) Holdup Gas (ϵ_g)

Dari kedua gambar di atas, ternyata dengan ketinggian permukaan cairan pada kondisi awal di bawah atau di atas ujung pelepasan kolom *downcomer*, data-data laju *gas entrainment* dan *holdup* gas yang dihasilkan menunjukkan adanya sedikit perbedaan. Ketika dilakukan pengukuran laju *gas entrainment* pada

kemampuan maksimal peralatan saat pipa *downcomer* tercelup dan tidak tercelup, diperoleh hasil seperti pada gambar berikut.



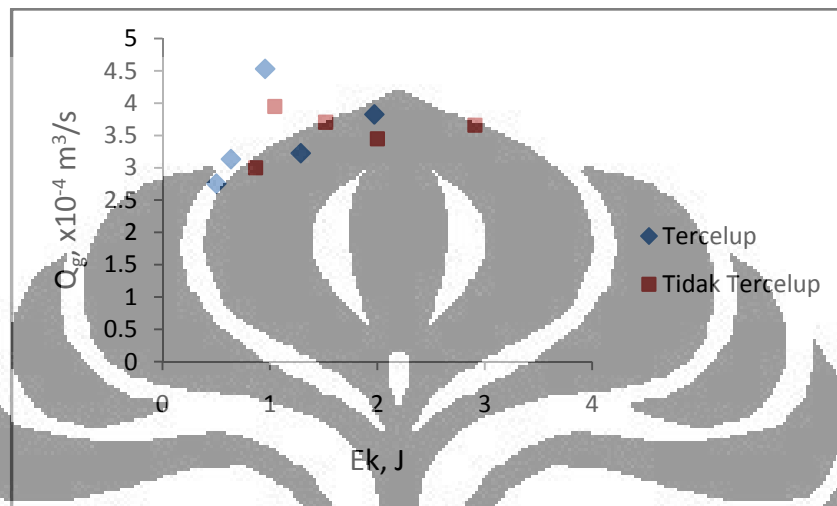
Gambar 4.3 Hasil Pengukuran Laju Gas Entrainment pada Saat Pipa *Downcomer* Tercelup (kiri) dan Tidak Tercelup (kanan)

Pada gambar 4.3, terlihat bahwa terjadi titik maksimum pada saat ukuran diameter nozzle yang berbeda. Pada saat pipa *downcomer* tercelup, titik maksimum terjadi dengan ukuran diameter nozzle yang lebih kecil dibandingkan saat pipa *downcomer* tidak tercelup.

Pada kondisi pipa *downcomer* tercelup, daya penetrasi jauh lebih ke dalam sehingga awan gelembung-gelembung yang berada dalam fasa cair lebih banyak menyebabkan harga laju gas entrainment dan *holdup* gas lebih tinggi karena banyak udara yang ikut terbawa ke dalam kolom. Hal ini menyebabkan viskositas (kekentalan cairan) menjadi lebih rendah. Oleh karena itu, hanya dibutuhkan energi yang lebih rendah atau kemampuan memomentum yang lebih rendah (lihat gambar 4.4) sehingga titik maksimum bisa dicapai pada diameter nozzle yang lebih kecil.

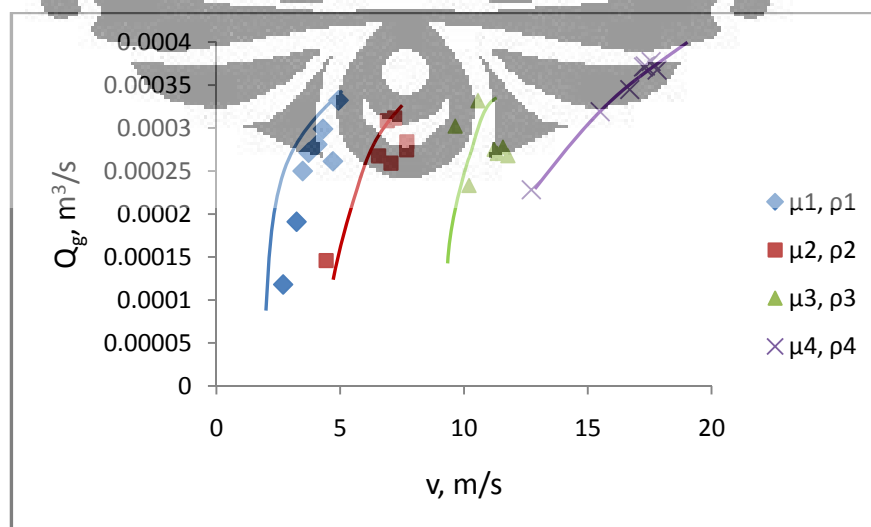
Sebaliknya, pada kondisi pipa *downcomer* tidak tercelup, daya penetrasi tidak jauh ke dalam sehingga fraksi dua fasa yang dihasilkan menjadi berkurang menyebabkan harga Q_g menurun. Bahkan, Q_g maksimum yang dicapai lebih

rendah daripada harga Q_g maksimum yang dicapai ketika kondisi tercelup. Oleh karena itu, untuk mencapai titik maksimum, diperlukan diameter nozzle yang lebih besar atau dengan kata lain perlu momentum atau energi kinetik yang lebih besar seperti terlihat pada gambar 4.4.

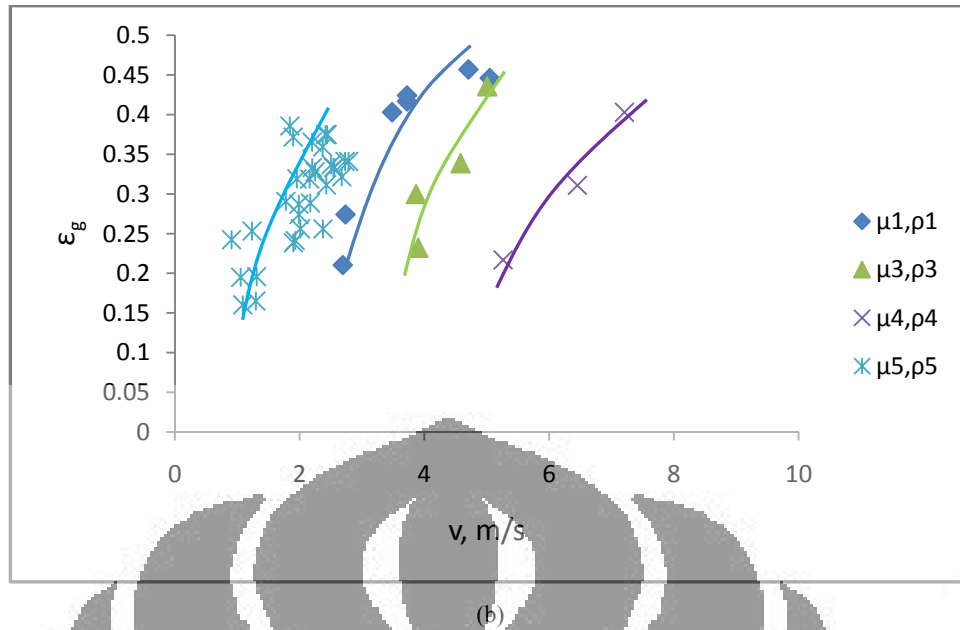


Gambar 4.4 Perbandingan Energi Kinetik (E_k) yang Diperlukan Saat Kondisi Pipa *Downcomer* Tercelup dan Tidak Tercelup

Berikut ini adalah hasil uji kinerja dengan memvariasikan viskositas cairan (μ) dan densitas cairan (ρ). Cairan yang dipakai adalah campuran air dan MDEA.



(a)



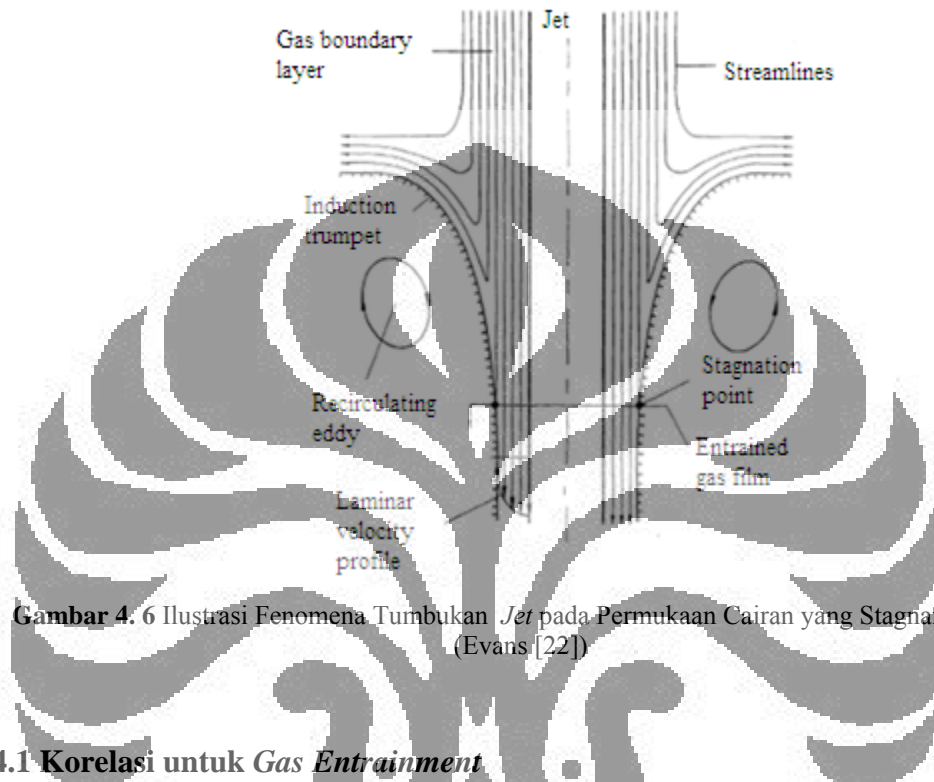
Gambar 4.5 Hasil Pengukuran (a) Laju Gas Entrainment (Q_g) dan (b) Holdup Gas (ϵ_g) terhadap Kecepatan Jet (v) dengan Variasi Viskositas (μ) dan Densitas (ρ)

Variasi dari viskositas dan densitas adalah sbb.

Komponen	μ (kg/m.s)	ρ (kg/m ³)
1	0.0013313	998.64
2	0.0016888	1002.4
3	0.0019905	1006.59
4	0.0023624	1010.26
5	0.0009828	987.38

Berdasarkan gambar 4.4 terlihat bahwa untuk menghasilkan laju gas entrainment dan holdup gas yang sama, maka diperlukan kecepatan jet yang lebih besar untuk cairan yang memiliki viskositas dan densitas yang lebih besar. Atau, untuk kecepatan jet yang sama, laju gas entrainment dan holdup gas yang dihasilkan akan semakin mengecil untuk cairan yang memiliki viskositas dan densitas yang lebih besar. Hal ini karena pada cairan yang memiliki viskositas dan densitas yang lebih besar, ruang pada trompet (lihat gambar 4.5) yang terbentuk menyempit sehingga udara yang masuk menjadi lebih sedikit. Akibatnya, laju gas entrainment menjadi turun. Oleh karena laju gas entrainment menurun, gelembung gas yang terbentuk pada cairan yang viskos juga semakin kecil yang

menyebabkan harga *holdup* gas menurun. Selain itu, sirkulasi arus eddy (yang membantu terbentuknya gelembung di dalam cairan) juga menurun kemampuannya sehingga menurunkan harga *holdup* gas.



Gambar 4. 6 Ilustrasi Fenomena Tumbukan *Jet* pada Permukaan Cairan yang Stagnan (Diam) (Evans, [22])

4.1 Korelasi untuk *Gas Entrainment*

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, laju gas *entrainment* (Q_g) dipengaruhi oleh variabel-variabel yang dapat dikelompokkan sbb.

- Variabel fisika: sifat fisika dari fluida cair dan gas yaitu $\rho_l, \mu_l, \sigma_l, \rho_g, \mu_g$
- Variabel geometri: dimensi dari nozzle, yaitu D_n , diameter kolom (D_c), dan ketinggian permukaan cairan dalam kolom (h_c)
- Variabel dinamis: laju volumetrik cairan (Q_l)

Dengan demikian, Q_g dapat dinyatakan:

$$Q_g = f(Q_l, \rho_l, \mu_l, \sigma_l, \rho_g, \mu_g, D_n, D_c, h_c, g) \quad (4.1)$$

Berdasarkan laporan dari Hikita *et al.* [36], sifat gas dapat diabaikan karena tidak memberikan pengaruh yang signifikan. Oleh karena itu, persamaan di atas dapat ditulis menjadi:

$$Q_g = f(Q_l, \rho_l, \mu_l, \sigma_l, D_n, D_c, h_c, g) \quad (4.2)$$

Dengan menggunakan analisis dimensional [29], diperoleh:

$$\frac{Q_g}{Q_l} = f(Re_l, Ar, Hr, Su, Mo) \quad (4.3)$$

di mana:

Q_g/Q_l = rasio *gas entrainment*

Re_l = bilangan Reynold cairan berdasarkan diameter kolom, $\rho_l D_c v / \mu_l$

Ar = rasio luas kolom terhadap nozzle, $(D_c/D_n)^2$

Hr = rasio ketinggian cairan di kolom terhadap diameter kolom, h_c/D_c

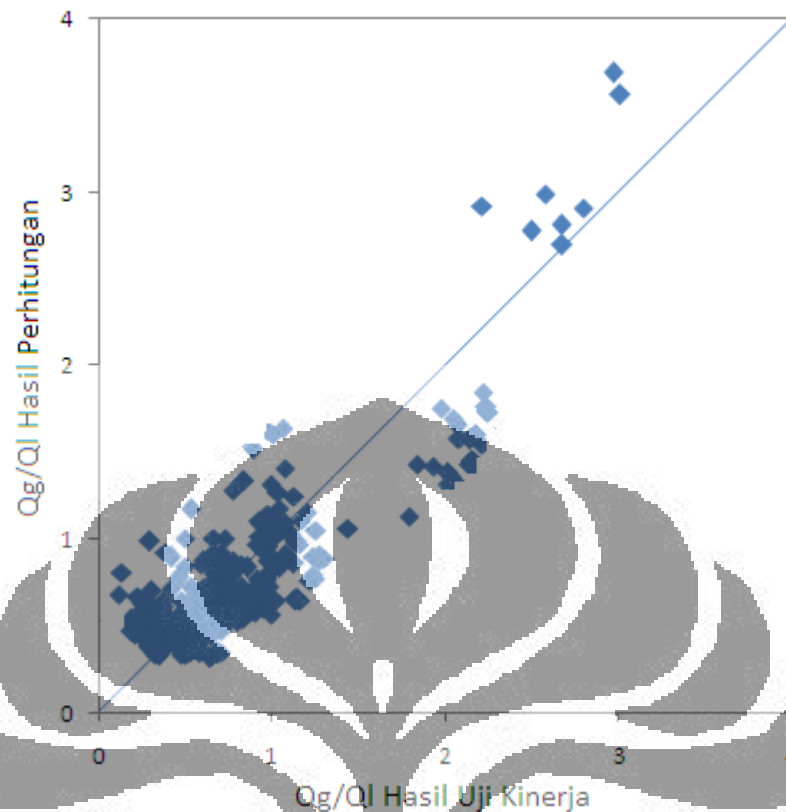
Su = bilangan Suratmann cairan, $\rho_l \sigma_l D_c / \mu_l^2$

Mo = bilangan Morton, $g \mu_l^4 / \rho_l \sigma_l^3$

Dengan menggunakan regresi linier berganda maka berdasarkan data-data hasil uji kinerja, diperoleh korelasi untuk Q_g/Q_l sbb.

$$\frac{Q_g}{Q_l} = 7.47 \times 10^{-4} Re_l^{-1.3481} Ar^{1.3352} Hr^{0.3563} Su^{2.2501} Mo^{0.7207} \quad (4.4)$$

Model di atas memiliki koefisien korelasi sebesar 0.8 dengan standar deviasi sebesar $\pm 18\%$. Jika hasil penelitian dan hasil korelasi untuk Q_g/Q_l diplot dalam suatu grafik maka diperoleh:



Gambar 4. 7 Perbandingan Rasio *Gas Entrainment* (Q_g/Q_l) Hasil Uji Kinerja dengan Hasil Perhitungan

4.2 Korelasi untuk *Holdup Gas*

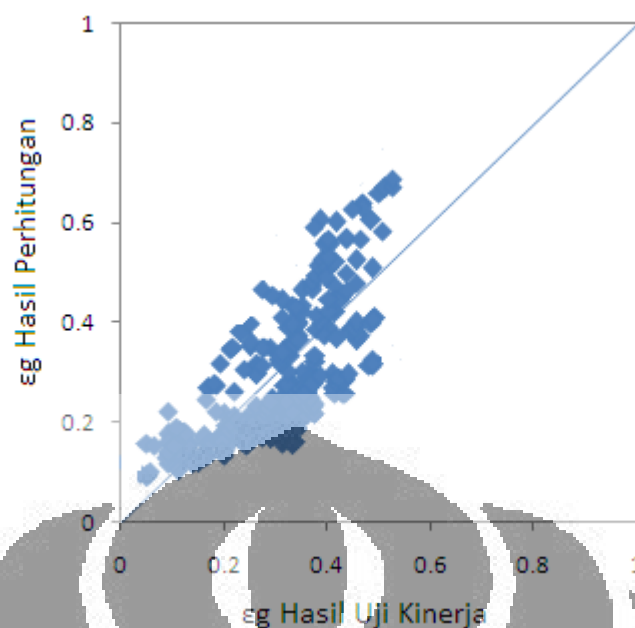
Holdup gas (ε_g) juga dipengaruhi oleh variabel-variabel yang sama seperti pada laju *gas entrainment* (Q_g). Oleh karena itu, ε_g dapat ditulis sbb:

$$\varepsilon_g = f(Re_l, A_r, H_r, Su, Mo) \quad (4.5)$$

Dengan menggunakan regresi linier berganda, akan diperoleh korelasi untuk ε_g sbb.

$$\varepsilon_g = 4425.88Re_l^{0.772} A_r^{-1.105} H_r^{-1.194} Su^{-1.681} Mo^{-0.583} \quad (4.6)$$

Korelasi untuk ε_g memiliki koefisien korelasi sebesar 0.8 dengan standar deviasi sebesar 17%. Jika hasil penelitian dan hasil korelasi untuk ε_g diplot dalam suatu grafik maka diperoleh:



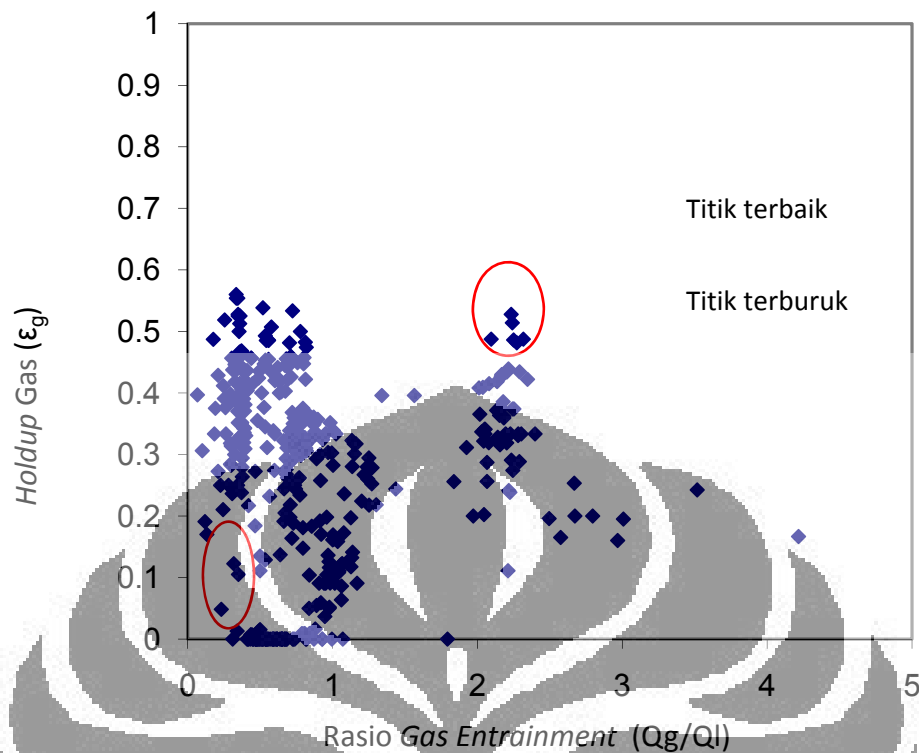
Gambar 4.8 Perbandingan *Holdup* Gas (ϵ_g) Hasil Uji Kinerja dengan Hasil Perhitungan

Kedua korelasi yang diusulkan yaitu untuk laju *gas entrainment* dan *holdup* gas, memiliki deviasi yang cukup besar (lebih dari $\pm 10\%$). Hal ini dikarenakan adanya keterbatasan alat untuk mengkalibrasi laju gas yang ter-*entrained* yang terlalu tinggi sehingga *error* yang terjadi saat pengukuran cukup besar.

4.3 Kemampuan Kolom Gelembung Pancaran Mengabsorpsi CO_2

4.3.1 Pemilihan Kondisi Operasi untuk Absorpsi

Absorpsi hanya dilakukan pada kondisi operasi terbaik dan terburuk. Kondisi operasi tersebut dapat diketahui dari gambar 4.9. Pada gambar tersebut, operasi gas-liquid yang bagus ditentukan dari ϵ_g yang setinggi-tingginya dan Q_g/Q_l yang setinggi-tingginya juga. Sebaliknya, operasi gas-liquid yang buruk dilihat dari ϵ_g yang serendah-rendahnya dan Q_g/Q_l yang serendah-rendahnya juga.



Gambar 4. 9 Hasil Pengukuran *Holdup Gas* (ϵ_g) terhadap *Rasio Gas Entrainment* (Q_g/Q_t) pada Berbagai Kondisi Operasi

Berdasarkan grafik di atas, absorpsi CO_2 dilakukan pada kondisi:

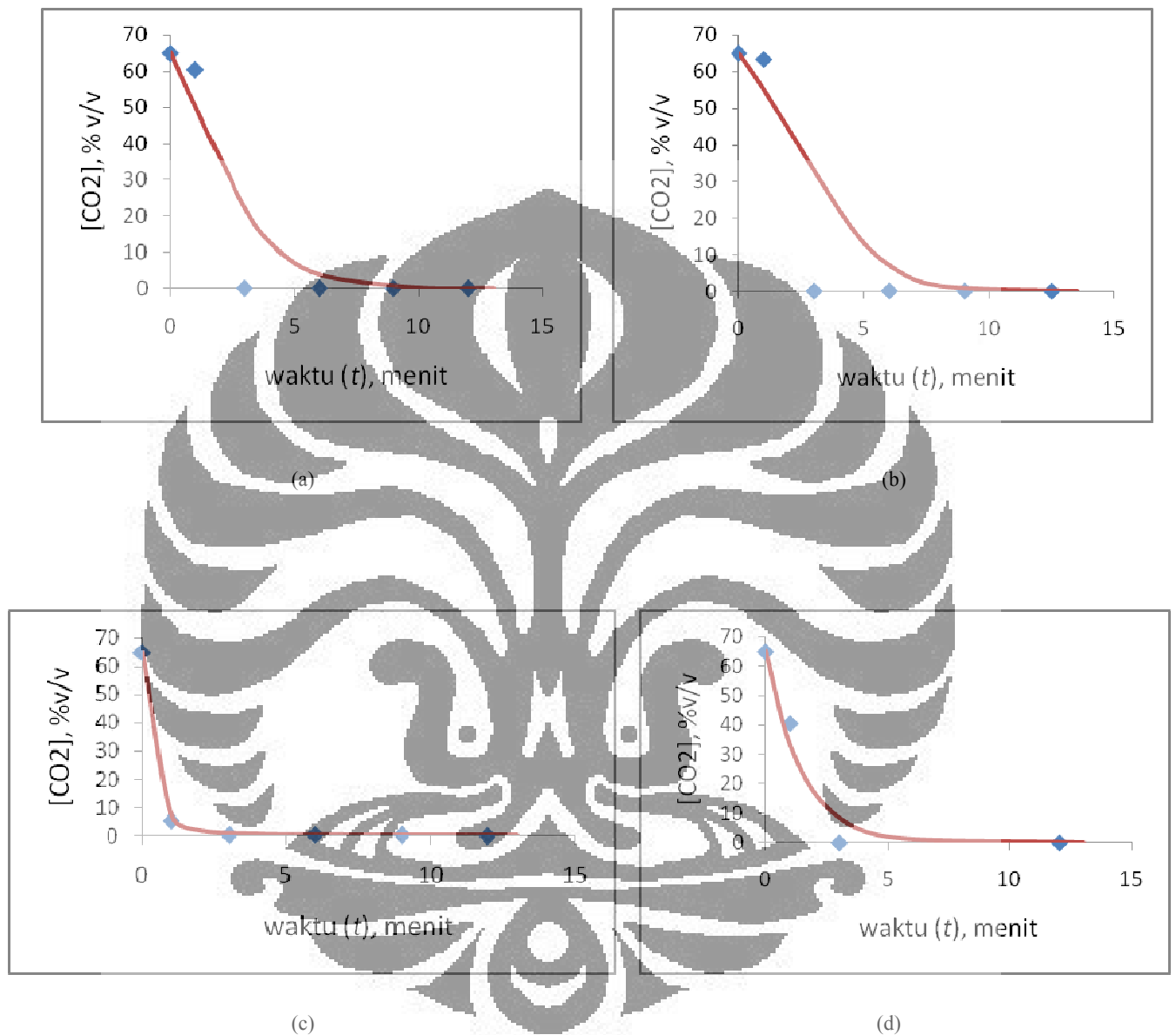
- diameter nozzle 12.7 mm di mana ketinggian permukaan cairan di atas ujung pelepasan kolom downcomer dengan kecepatan pancaran cairan maksimum (*kondisi terbaik*), dan
- diameter nozzle 10 mm di mana ketinggian permukaan cairan di atas ujung pelepasan kolom downcomer dengan kecepatan pancaran cairan minimum (*kondisi terburuk*)

dengan menggunakan absorben NaOH, KOH, dan MDEA masing-masing 10% berat.

4.3.2 Uji Absorpsi CO_2

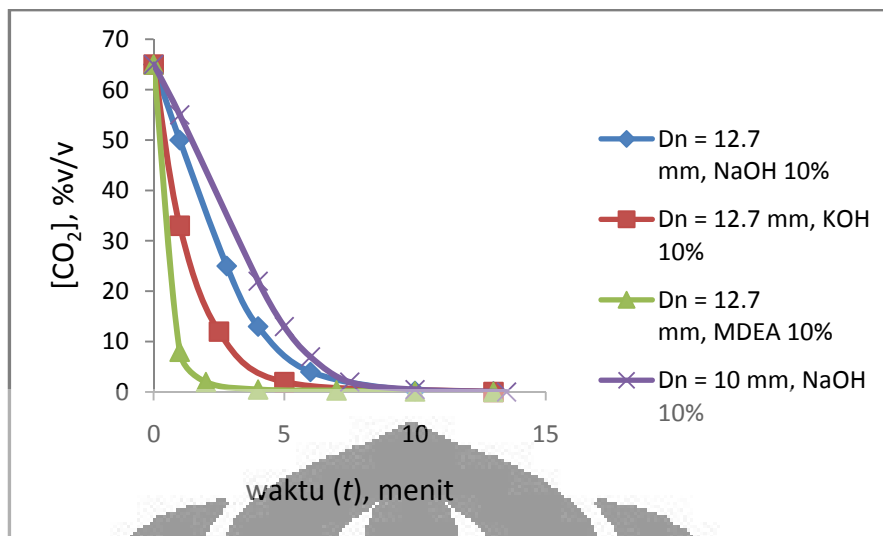
Kemampuan kolom gelembung pancaran dalam mengabsorpsi CO_2 dapat diketahui dengan menganalisis sampel gas yang diambil di titik keluaran kolom

gelembung pancaran. Analisis sampel dilakukan dengan GC-TCD. Berikut adalah hasil yang diperoleh ketika uji absorpsi dilakukan.



Gambar 4. 10 Penurunan Konsentrasi CO₂ dengan absorbent (a) NaOH pada Kondisi Terbaik, (b) NaOH pada Kondisi Terburuk, (c) MDEA pada Kondisi Terbaik dan (d) KOH pada Kondisi Terbaik

Untuk membandingkan keempat grafik di atas dengan lebih jelas, maka gambar 4.10 dibuat dalam satu grafik seperti berikut:



Gambar 4.11 Penurunan Konsentrasi CO_2 pada Kondisi Operasi Terbaik dan Terburuk

Berdasarkan gambar 4.11, terlihat bahwa kolom gelembung pancaran mampu mengabsorpsi CO_2 dengan sangat cepat baik pada kondisi operasi terbaik maupun terburuk. Hal ini dibuktikan dari waktu yang singkat yang dibutuhkan untuk menurunkan kadar CO_2 . Selain itu, pada gambar di atas terlihat bahwa memang kondisi operasi terbaik membutuhkan waktu yang lebih singkat untuk menurunkan kadar CO_2 , jika dibandingkan dengan kondisi operasi terburuk. Hal ini menunjukkan bahwa dengan kondisi operasi terbaik, di mana laju *gas entrainment* maupun *holdup* gas-nya tinggi, akan menguntungkan untuk proses absorpsi. Hal ini dikarenakan dengan laju *gas entrainment* yang tinggi, berarti semakin banyak CO_2 yang tersedot ke dalam kolom. Selain itu, dengan laju *gas entrainment* yang tinggi, juga mengakibatkan resirkulasi eddy semakin tinggi sehingga membantu terbentuknya gelembung di dalam kolom. Dengan semakin banyak gelembung yang terbentuk, *holdup* gas akan meningkat sehingga luas kontak gas dan cair (CO_2 dengan absorben) yang terjadi semakin besar. Dengan luas kontak yang tinggi, maka absorpsi semakin bagus. Namun, tidak dipungkiri bahwa jenis absorben yang digunakan untuk absorpsi juga turut mempengaruhi proses absorpsi. Terlihat bahwa dengan absorben MDEA, absorpsi CO_2 yang terjadi paling cepat. Hal ini dikarenakan MDEA lebih bersifat basa jika dibandingkan dengan NaOH maupun KOH sehingga lebih cepat mengikat CO_2 yang bersifat asam.

BAB 5 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa laju *gas entrainment* dan *holdup* gas yang maksimum terjadi pada saat diameter nozzle 12.7 mm. Hal ini hanya berlaku untuk kondisi peralatan yang digunakan pada penelitian. Selain itu, diketahui juga bahwa variasi ketinggian permukaan cairan terhadap ujung pelepasan kolom *downcomer* (*Z*) tidak memberikan pengaruh yang terlalu signifikan terhadap laju *gas entrainment* dan *holdup* gas. Sebaliknya, perubahan viskositas dan densitas cairan memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap terhadap laju *gas entrainment* dan *holdup* gas.

Melalui penelitian ini, diperoleh suatu korelasi untuk laju *gas entrainment* dan *holdup* gas sebagai berikut:

$$\frac{Q_g}{Q_l} = 7.47 \times 10^{-4} Re_l^{-1.3481} A_r^{1.3352} H_r^{0.3563} Su^{2.2501} Mo^{0.7207}$$
$$\varepsilon_g = 4425.88 Re_l^{0.772} A_r^{-1.105} H_r^{+1.194} Su^{-1.681} Mo^{-0.583}$$

Korelasi di atas memiliki deviasi 17% dan 18%, masing-masing untuk laju *gas entrainment* dan *holdup* gas. Korelasi tersebut dapat digunakan untuk memprediksi kondisi operasi peralatan maupun untuk keperluan *scale up*. Selain itu, diketahui juga bahwa kemampuan peralatan untuk absorpsi CO₂ cukup bagus dilihat dari waktu yang cukup singkat yang diperlukan peralatan untuk menyerap CO₂.

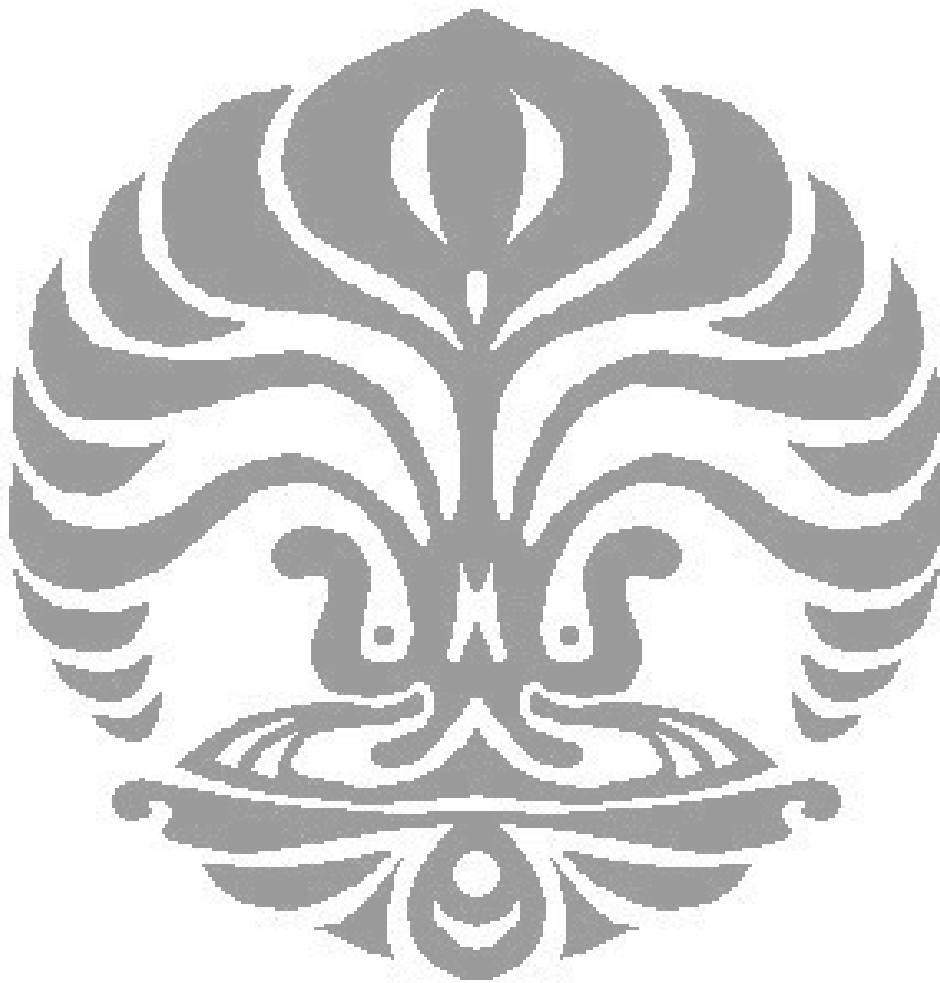
DAFTAR REFERENSI

- [1] Soemantojo, R. W. (2004). Diktat Kuliah Ilmu Lingkungan. Departemen Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Jakarta.
- [2] Dauglas, W. V. (1995). Carbon adsorption for indoor air cleaning. *ASHRAE J*, 37(2).
- [3] Moppett G. D., Rielly, C. D., dan Davidson, J. F. (1995). Oxygenator for waste water treatment using a stationary bubble cloud in a down-flowing liquid. *Instn. Chem. Eng.* 73, 685-689.
- [4] Mertes, A. T. (1938). *U.S. Pat.* 2, 128311.
- [5] Hantizen. *Kemampuan Adsorben Karbon Aktif dan Absorben KOH pada Sistem Kolom Gelembung Pancaran (Jet Bubble Column) untuk Mereduksi Kandungan Gas CO₂*. skripsi sarjana (Jakarta: Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2008).
- [6] Gozan, M. (2006). *Absorpsi, Leaching dan Ekstraksi pada Industri Kimia*. UI Press: Jakarta.
- [7] Fujie, K., Takaine, M., dan Kubota, H. (1980). Flow and oxygen transfer in cocurrent gas-liquid downflow. *J. Chem. Eng. Japan*, 13, 188-193.
- [8] Kundu, G., Mukherjee, D., dan Mitra, A. K. (1997). Ejector performance in a co-current gas-liquid downflow bubble column. *Can. J. Chem. Eng.* 75, 956-963.
- [9] Bando, Y., Kuraishi, M., Nishimura, M., Hattori, M., dan Asada, T. (1988). Cocurrent downflow bubble column with simultaneous gas-liquid injection nozzle. *J. Chem. Eng. Japan*, 21, 607-612.
- [10] Ohkawa, A., Kusabiraki, D., Kawai, Y., dan Sakai, N. (1986). Some flow characteristics of a vertical liquid jet system having downcomers. *Chem. Eng. Sci.* 41(9), 2347-2361.
- [11] Kundu, G., Mandal, A., dan Mukherjee, D. (2003). Interfacial area and liquid-side volumetric mass transfer coefficient in a downflow bubble column. *Can. J. Chem. Eng.* 81, 212-219.

- [12] Rielly, C. D., dan Low, K. C. "Plunging jet oxygenators." <http://www.lboro.ac.uk/departments/cg/research/productengineering/projects/polymer.htm> (7 Des. 2006)
- [13] El-Din, M. G., dan Smith, D.W. (2000). Maximizing enhanced ozone oxidation of pulp mill effluents, *intern project report* for sustainable forest management network, University of Alberta.
- [14] Cramers, P., dan Selinger, C. (2002). Advanced hydrogenation technology for fine-chemical and pharmaceutical applications. *Pharma Chem.*
- [15] Bin, A. K. (1993). Gas-entrainment by plunging liquid jet. *Chem. Eng. Sci.* 48(21), 3585-3630.
- [16] Oteyaka, B., Tasdemir, A., dan Tasdemir, T. (2007). Air entrainment rate and holdup in the Jameson cell. *Min. Eng.* 20, 761-765.
- [17] van de Donk, J. A. C. (1981). Water aeration with plunging jets. Ph.D. thesis, Technische Hogeschool Delft.
- [18] Evans, G.M., dan Liu, G. Gas entrainment and gas holdup in a confined plunging liquid jet reactor. Department of Chemical Engineering, University of Newcastle, Australia.
- [19] Bin, A. (1971). Investigation of the aeration effect of free liquid jet. Ph.D. thesis, Warsaw University of Technology.
- [20] Ciborowski, J., dan Bin, A. (1972). Investigation of the aeration effect of plunging liquid jets. *Inz. Chem. (Polish)* 2, 557-577.
- [21] Cumming, I. W. (1975). The impact of falling liquids with liquid surfaces. Ph.D. thesis, Loughborough University of Technology.
- [22] Evans, G. M. (1990). A study of a plunging jet bubble column. Ph.D. thesis, University of Newcastle, Australia.
- [23] Hera, H., Shimada, K., dan Kumagai, M. (1977). The behaviour of gas entrainment by a liquid jet. *Kagaku Kogaku Ronbunshu* 3, 424-425.
- [24] Kumagai, M., dan Endoh, K. (1982). Effects of kinematic viscosity and surface tension on gas entrainment rate of an impinging liquid jet. *J. Chem. Eng. Japan*, 15, 427-433.

- [25] Kusabiraki, D., Niki, H., Yamagiwa, K., dan Ohkawa, A. (1990). Gas entrainment rate and flow pattern of vertical plunging liquid jets. *Can. J. Chem. Eng.* 68, 893-903.
- [26] Yagasaki, T., dan Kuzuoka, T. (1979). Surface entrainment of gas by plunging liquid jet. *Research Reports of Kogakuin University* 47, 77-85.
- [27] Ohkawa, A., Kusabiraki, D., Kawai, Y., dan Sakai, N. (1987). Flow characteristics of an air-entrainment type aerator having a long downcomer. *Chem. Eng. Sci.* 42(11), 2788-2790.
- [28] Yamagiwa, K., dan Kusabiraki, D. (1990). Gas holdup and gas entrainment rate in downflow bubble column with gas entrainment by a liquid jet operating at high liquid throughput. *J. Chem. Eng. Japan*, 23(3), 343-348.
- [29] Kundu, G., Mukherjee, D., dan Mitra, A. K. (1994). Gas entrainment and depth of penetration in a co-current gas-liquid downflow bubble column. *J. Chem. Eng. Japan*, 27(5), 621-626.
- [30] Kundu, G., Mukherjee, D., dan Majumder, S. K. (2006). Efficient dispersion in a modified two-phase non-Newtonian downflow bubble column. *Chem. Eng. Sci.* 61, 6753-6764.
- [31] Hadiyani, N. T. *Penentuan Luas Kontak Antarfasa Gas-Cair dan Distribusi Gelembung dalam Sistem Jet Bubble Column untuk Absorpsi CO₂*. skripsi sarjana (Jakarta: Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2008).
- [32] Ohkawa, A., Shiokawa, Y., Sakai, N., dan Imai, H. (1985). Flow characteristics of downflow bubble column with gas entrainment by a liquid jet. *J. Chem. Eng. Japan*, 18(5), 466-469.
- [33] Zuber, N., dan Findlay, J. A. (1965). Average volume concentration in two-phase flow systems. *J. Heat Transfer (Trans. ASME), series C*, 453-468.
- [34] Kundu, G., Mukherjee, D., dan Mandal, A. (2003). Hydrodynamic studies on gas-liquid downflow bubble column with non-newtonian liquids. *J. Chem. Eng. Indian*, 84, 38-43.
- [35] Kumagai, M., dan Endoh, K. (1987). A note on the relationship between gas entrainment curve and its starting velocity. *J. Chem. Eng. Japan*, 16(1), 74-75.

- [36] Hikita H., Asai, S., Tanigawa, K., Segawa, K., dan Kitao, M. (1980). *J. Chem. Eng. Japan*, 20, 59-67.



Lampiran 1. Data Uji Absorpsi CO₂ pada Kondisi Terbaik

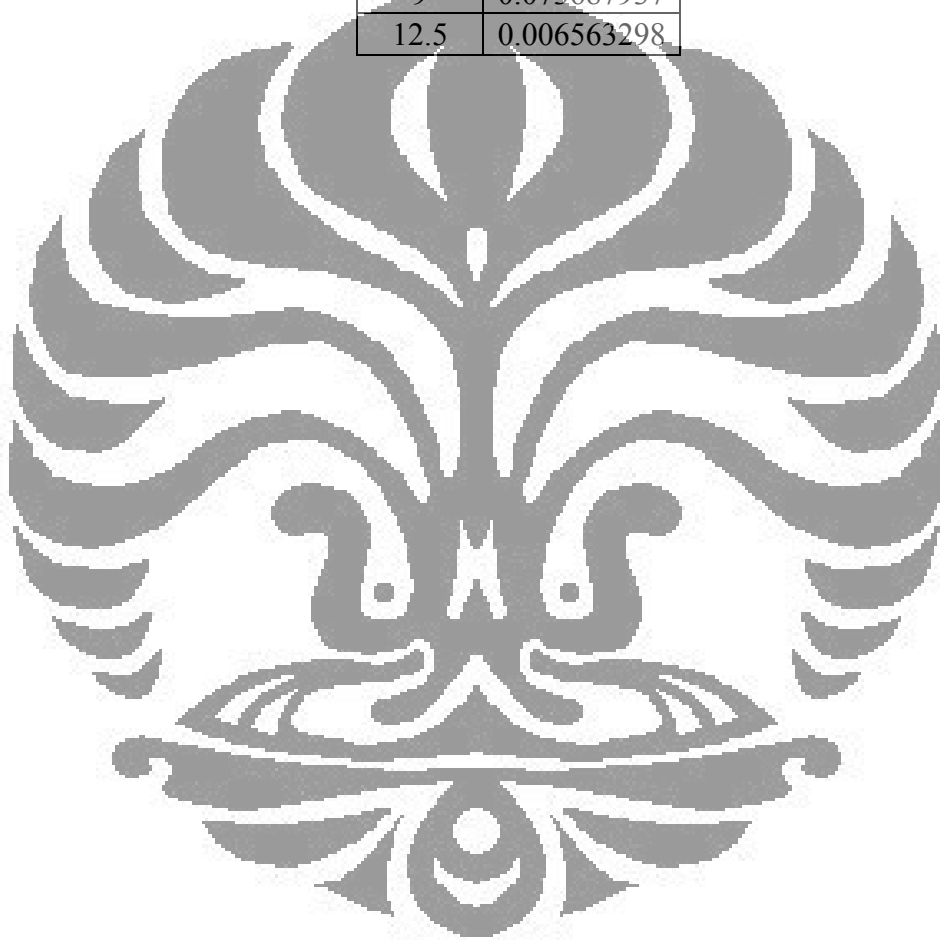
Absorben NaOH	
t, menit	[CO ₂], %v/v
0	65
1	60.4312279
3	0.043258101
6	0.089201187
9	0.023866538
12	0.013126596

Absorben KOH	
t, menit	[CO ₂], %v/v
0	65
1	40.61368826
3	0.005071639
12	0

Absorben MDEA	
t, menit	[CO ₂], %v/v
0	65
1	5.327906348
3	0.326971575
6	0.575780237
9	0.318916618
12	0

Lampiran 2. Data Uji Absorpsi CO₂ pada Kondisi Terburuk

Absorben NaOH	
t, menit	[CO ₂], %v/v
0	65
1	63.33
3	0.049821399
6	0.08621787
9	0.073687937
12.5	0.006563298



Lampiran 3. Data Hasil Uji Kinerja

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	Vl (m3)	t (s)	ϵ_g	Qg (m3/s)	Qg/Ql	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	Ql (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	Y (N/m)
76	88	0.005	12	0.005	11.63	0.136364	0.0004167	0.9691667	6.1	81	0.00043	14.71095	987.38	0.0009828	0.003059
76	86	0.005	13.13	0.005	12.85	0.116279	0.0003808	0.9786748	6.1	81	0.000389	13.31427	987.38	0.0009828	0.003059
76	80	0.005	21.53	0.005	18.04	0.05	0.0002322	0.8379006	6.1	81	0.000277	9.483833	987.38	0.0009828	0.003059
73	85	0.002	4.5	0.005	12.81	0.141176	0.0004444	1.1386667	6.1	78	0.00039	13.35584	987.38	0.0009828	0.003059
73	81.5	0.001	2.7	0.003	7.78	0.104294	0.0003704	0.9604938	6.1	78	0.000386	13.19447	987.38	0.0009828	0.003059
73	77	0.001	3.8	0.003	11.15	0.051948	0.0002632	0.9780702	6.1	78	0.000269	9.206548	987.38	0.0009828	0.003059
69	79	0.001	2.4	0.003	7.97	0.126582	0.0004167	1.1069444	6.1	75	0.000376	12.87993	987.38	0.0009828	0.003059
69	77	0.001	2.7	0.003	8.1	0.103896	0.0003704	1	6.1	75	0.00037	12.67321	987.38	0.0009828	0.003059
69	73	0.001	4	0.003	10.68	0.054795	0.00025	0.89	6.1	75	0.000281	9.611705	987.38	0.0009828	0.003059
65.5	75.5	0.001	2.3	0.003	7.82	0.13245	0.0004348	1.1333333	6.1	72	0.000384	13.12698	987.38	0.0009828	0.003059
65.5	74.5	0.001	2.6	0.003	8.25	0.120805	0.0003846	1.0576923	6.1	72	0.000364	12.44279	987.38	0.0009828	0.003059
65.5	68	0.001	4.2	0.003	11.94	0.036765	0.0002381	0.947619	6.1	72	0.000251	8.597405	987.38	0.0009828	0.003059
64	74	0.001	2.2	0.002	4.71	0.135135	0.0002123	0.5	6.1	68.5	0.000425	14.5298	987.38	0.0009828	0.003059
64	72	0.001	2.45	0.002	5.37	0.111111	0.0001862	0.5	6.1	68.5	0.000372	12.74401	987.38	0.0009828	0.003059
63.5	64.5	0.001	5.5	0.002	7	0.015504	0.0001429	0.5	6.1	68.5	0.000286	9.776477	987.38	0.0009828	0.003059
60	68	0.001	2.15	0.002	4.85	0.117647	0.0004651	1.127907	6.1	66	0.000412	14.11038	987.38	0.0009828	0.003059
60	66	0.001	2.5	0.002	5.85	0.090909	0.0004	1.17	6.1	66	0.000342	11.69835	987.38	0.0009828	0.003059
59.5	60.5	0.001	4.75	0.002	8.37	0.016529	0.0002105	0.8810526	6.1	66	0.000239	8.176266	987.38	0.0009828	0.003059
56	63	0.001	2.3	0.002	4.81	0.111111	0.0004348	1.0456522	6.1	63	0.000416	14.22772	987.38	0.0009828	0.003059
57	60	0.001	2.7	0.002	5.28	0.05	0.0003704	0.9777778	6.1	63	0.000379	12.96124	987.38	0.0009828	0.003059

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	ϵ_g	Qg (m3/s)	Qg/QI	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	QI (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	γ (N/m)
56.5	57	0.001	4.9	0.002	7.94	0.008772	0.0002041	0.8102041	6.1	63	0.000252	8.619061	987.38	0.0009828	0.003059
53.5	60.5	0.001	2.4	0.002	4.75	0.115702	0.0004167	0.9895833	6.1	60	0.000421	14.40744	987.38	0.0009828	0.003059
54.3	58	0.001	2.75	0.002	5.84	0.063793	0.0003636	1.0618182	6.1	60	0.000342	11.71838	987.38	0.0009828	0.003059
54	54.5	0.001	4.9	0.001	3.87	0.009174	0.0002041	0.7897959	6.1	60	0.000258	8.841775	987.38	0.0009828	0.003059
54	54.5	0.001	4.9	0.002	8.25	0.009174	0.0002041	0.8418367	6.1	60	0.000242	8.295193	987.38	0.0009828	0.003059
50	57	0.001	2.4	0.002	5.12	0.122807	0.0004167	1.0666667	6.1	57	0.000391	13.36628	987.38	0.0009828	0.003059
50.5	57	0.001	2.55	0.002	5.16	0.114035	0.0003922	1.0117647	6.1	57	0.000388	13.26266	987.38	0.0009828	0.003059
50	55	0.001	2.8	0.002	5.34	0.090909	0.0003571	0.9535714	6.1	57	0.000375	12.81561	987.38	0.0009828	0.003059
50	55	0.001	3.2	0.002	6.03	0.090909	0.0003125	0.9421875	6.1	57	0.000332	11.34914	987.38	0.0009828	0.003059
49	57.5	0.002	11.74	0.001	4.675	0.147826	0.0001704	0.7964225	6.1	55	0.000214	7.319288	987.38	0.0009828	0.003059
49	59	0.003	12.04	0.001	4.03	0.169492	0.0002492	1.0041528	6.1	55	0.000248	8.490737	987.38	0.0009828	0.003059
48.5	60.5	0.003	8.78	0.001	2.81	0.198347	0.0003417	0.9601367	6.1	55	0.000356	12.17711	987.38	0.0009828	0.003059
48.5	62	0.003	7.04	0.001	2.94	0.217742	0.0004261	1.2528409	6.1	55	0.00034	11.63866	987.38	0.0009828	0.003059
48	63.5	0.003	6.2	0.001	2.97	0.244094	0.0004839	1.4370968	6.1	55	0.000337	11.5211	987.38	0.0009828	0.003059
48	64.2	0.003	6.265	0.001	2.655	0.252336	0.0004789	1.2713488	6.1	55	0.000377	12.88801	987.38	0.0009828	0.003059
47.5	64.2	0.003	6.345	0.001	2.63	0.260125	0.0004728	1.2434988	6.1	55	0.00038	13.01052	987.38	0.0009828	0.003059
44.8	58.5	0.003	13.405	0.001	3.465	0.234188	0.0002238	0.7754569	6.1	52	0.000289	9.87523	987.38	0.0009828	0.003059
44.9	60.5	0.003	9.235	0.001	2.825	0.257851	0.0003249	0.9177044	6.1	52	0.000354	12.11245	987.38	0.0009828	0.003059
44.7	62.3	0.003	7.62	0.001	2.55	0.282504	0.0003937	1.003937	6.1	52	0.000392	13.41869	987.38	0.0009828	0.003059
44.8	64	0.003	7.485	0.001	2.28	0.3	0.0004008	0.9138277	6.1	52	0.000439	15.00775	987.38	0.0009828	0.003059
44.8	64.3	0.003	7.335	0.001	2.37	0.303266	0.000409	0.9693252	6.1	52	0.000422	14.43784	987.38	0.0009828	0.003059
44.8	64.1	0.003	7.33	0.001	2.815	0.301092	0.0004093	1.1521146	6.1	52	0.000355	12.15548	987.38	0.0009828	0.003059

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	eg	Qg (m3/s)	Qg/QI	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	QI (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	Y (N/m)
40.5	59.5	0.003	21.395	0.001	2.76	0.319328	0.0001402	0.3870063	6.1	49	0.000362	12.39771	987.38	0.0009828	0.003059
40.5	59.78	0.003	11.24	0.001	2.485	0.322516	0.0002669	0.6632562	6.1	49	0.000402	13.76969	987.38	0.0009828	0.003059
40.5	60.5	0.003	10.21	0.001	2.515	0.330579	0.0002938	0.7389814	6.1	49	0.000398	13.60544	987.38	0.0009828	0.003059
40.5	61.2	0.003	9.79	0.001	2.42	0.338235	0.0003064	0.741573	6.1	49	0.000413	14.13953	987.38	0.0009828	0.003059
40.5	62.1	0.003	10.24	0.001	2.655	0.347826	0.000293	0.777832	6.1	49	0.000377	12.88801	987.38	0.0009828	0.003059
40.5	60.5	0.003	10.29	0.001	2.56	0.330579	0.0002915	0.7463557	6.1	49	0.000391	13.36628	987.38	0.0009828	0.003059
61	72.5	0.003	9.19	0.001	3.175	0.158621	0.0003264	1.0364527	7	70	0.000315	8.184088	987.38	0.0009828	0.003059
61	75.5	0.003	7.245	0.001	2.205	0.192053	0.0004141	0.9130435	7	70	0.000454	11.78434	987.38	0.0009828	0.003059
59	80.5	0.003	5.345	0.001	2.17	0.267081	0.0005613	1.2179607	7	70	0.000461	11.97441	987.38	0.0009828	0.003059
59	82	0.003	5.12	0.001	1.94	0.280488	0.0005859	1.1367188	7	70	0.000515	13.39406	987.38	0.0009828	0.003059
58	82.2	0.003	5.285	0.001	2.205	0.294404	0.0005676	1.2516556	7	70	0.000454	11.78434	987.38	0.0009828	0.003059
56.8	62.5	0.002	8.575	0.001	4.22	0.0912	0.0002332	0.9842566	7	64	0.000237	6.15746	987.38	0.0009828	0.003059
55.5	66.9	0.003	9.5	0.001	2.92	0.170404	0.0003158	0.9221053	7	64	0.000342	8.898795	987.38	0.0009828	0.003059
55	72	0.003	7.02	0.001	2.53	0.236111	0.0004274	1.0811966	7	64	0.000395	10.27055	987.38	0.0009828	0.003059
54	75	0.003	5.57	0.001	2.3	0.28	0.0005386	1.2387792	7	64	0.000435	11.2976	987.38	0.0009828	0.003059
53	76	0.003	5.41	0.001	1.795	0.302632	0.0005545	0.9953789	7	64	0.000557	14.47603	987.38	0.0009828	0.003059
53	58	0.002	7.485	0.002	7.955	0.086207	0.0002672	1.0627923	7	61	0.000251	6.532868	987.38	0.0009828	0.003059
52	62	0.003	8.525	0.002	5.69	0.16129	0.0003519	1.001173	7	61	0.000351	9.133385	987.38	0.0009828	0.003059
50	72	0.002	5.285	0.002	4.34	0.305556	0.0003784	0.8211921	7	61	0.000461	11.97441	987.38	0.0009828	0.003059
50	72.5	0.002	5.105	0.002	3.87	0.310345	0.0003918	0.7580803	7	61	0.000517	13.42867	987.38	0.0009828	0.003059
50	72.5	0.002	5.21	0.002	4.185	0.310345	0.0003839	0.803263	7	61	0.000478	12.41791	987.38	0.0009828	0.003059
50.5	73.5	0.002	5.045	0.002	3.855	0.312925	0.0003964	0.7641229	7	61	0.000519	13.48092	987.38	0.0009828	0.003059

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	eg	Qg (m3/s)	Qg/QI	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	QI (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	γ (N/m)
50	55	0.002	8.805	0.002	7.995	0.090909	0.0002271	0.9080068	7	57.5	0.00025	6.500183	987.38	0.0009828	0.003059
49	58.5	0.003	9.1	0.002	6.115	0.162393	0.0003297	1.007967	7	57.5	0.000327	8.498604	987.38	0.0009828	0.003059
48	64	0.002	6.09	0.002	4.5	0.25	0.0003284	0.7389163	7	57.5	0.000444	11.54866	987.38	0.0009828	0.003059
47	67	0.002	5.155	0.002	4.03	0.298507	0.000388	0.7817653	7	57.5	0.000496	12.89552	987.38	0.0009828	0.003059
46.5	68	0.002	5.075	0.002	3.955	0.316176	0.0003941	0.7793103	7	57.5	0.000506	13.14007	987.38	0.0009828	0.003059
46.5	68	0.002	5.17	0.002	4.22	0.316176	0.0003868	0.8162476	7	57.5	0.000474	12.31492	987.38	0.0009828	0.003059
46	68.5	0.002	5.02	0.002	4	0.328467	0.0003984	0.7968127	7	57.5	0.0005	12.99224	987.38	0.0009828	0.003059
45.5	55	0.002	6.805	0.002	7.335	0.172727	0.0002939	1.0778839	7	54	0.000273	7.085066	987.38	0.0009828	0.003059
45	58	0.003	7.915	0.002	6.34	0.224138	0.000379	1.2015161	7	54	0.000315	8.196997	987.38	0.0009828	0.003059
44	61	0.003	6.07	0.002	5.155	0.278689	0.0004942	1.273888	7	54	0.000388	10.08127	987.38	0.0009828	0.003059
43	63	0.003	5.3	0.002	4.11	0.31746	0.000566	1.1632075	7	54	0.000487	12.64452	987.38	0.0009828	0.003059
43	63	0.003	5.425	0.002	4.16	0.31746	0.000553	1.1502304	7	54	0.000481	12.49254	987.38	0.0009828	0.003059
43	63.5	0.003	5.475	0.002	4.14	0.322835	0.0005479	1.1342466	7	54	0.000483	12.55289	987.38	0.0009828	0.003059
42.5	53	0.001	3.86	0.002	5.455	0.198113	0.0002591	0.7066062	7	51	0.000367	9.526849	987.38	0.0009828	0.003059
41	58	0.003	7.585	0.002	4.5	0.293103	0.0003955	0.8899143	7	51	0.000444	11.54866	987.38	0.0009828	0.003059
40	60	0.003	6.235	0.002	3.96	0.333333	0.0004812	0.9526864	7	51	0.000505	13.12348	987.38	0.0009828	0.003059
40	60.5	0.003	6.24	0.002	4.185	0.338843	0.0004808	1.0060096	7	51	0.000478	12.41791	987.38	0.0009828	0.003059
40	60	0.002	4.19	0.002	3.985	0.333333	0.0004773	0.951074	7	51	0.000502	13.04114	987.38	0.0009828	0.003059
40	60	0.002	4.085	0.002	4.185	0.333333	0.0004896	1.0244798	7	51	0.000478	12.41791	987.38	0.0009828	0.003059
39	54.5	0.001	9.82	0.002	5.815	0.284404	0.0001018	0.2960794	7	48	0.000344	8.937053	987.38	0.0009828	0.003059
38	56	0.002	7.09	0.002	4.8	0.321429	0.0002821	0.6770099	7	48	0.000417	10.82687	987.38	0.0009828	0.003059
37.5	55	0.002	5.98	0.002	4.41	0.318182	0.0003344	0.7374582	7	48	0.000454	11.78434	987.38	0.0009828	0.003059

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	eg	Qg (m3/s)	Qg/Ql	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	Ql (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	γ (N/m)
36.5	57	0.002	5.57	0.002	4.095	0.359649	0.0003591	0.7351885	7	48	0.000488	12.69083	987.38	0.0009828	0.003059
36	57	0.002	5.405	0.002	3.905	0.368421	0.00037	0.7224792	7	48	0.000512	13.30831	987.38	0.0009828	0.003059
71	81.5	0.001	5.315	0.002	5.705	0.128834	0.0001881	0.5366886	10	81	0.000351	4.463592	987.38	0.0009828	0.003059
69	85	0.002	6.98	0.002	5.095	0.188235	0.0002865	0.7299427	10	81	0.000393	4.997996	987.38	0.0009828	0.003059
66.5	88	0.002	5.95	0.002	3.96	0.244318	0.0003361	0.6655462	10	81	0.000505	6.430503	987.38	0.0009828	0.003059
63.5	94	0.002	4.02	0.002	3.75	0.324468	0.0004975	0.9328358	10	81	0.000533	6.790611	987.38	0.0009828	0.003059
63	94.5	0.002	3.955	0.002	3.485	0.333333	0.0005057	0.8811631	10	81	0.000574	7.30697	987.38	0.0009828	0.003059
63	94.5	0.002	4.03	0.002	3.595	0.333333	0.0004963	0.8920596	10	81	0.000556	7.083391	987.38	0.0009828	0.003059
63	95	0.002	4.125	0.002	3.62	0.336842	0.0004848	0.8775758	10	81	0.000552	7.034473	987.38	0.0009828	0.003059
68	76	0.001	8.39	0.002	5.89	0.105263	0.0001192	0.3510131	10	78	0.00034	4.323394	987.38	0.0009828	0.003059
65.5	81	0.001	3.875	0.002	5.155	0.191358	0.0002581	0.6651613	10	78	0.000388	4.939824	987.38	0.0009828	0.003059
63.5	84	0.002	6.21	0.002	4.625	0.244048	0.0003221	0.7447665	10	78	0.000432	5.505901	987.38	0.0009828	0.003059
60.5	89	0.002	4.33	0.002	3.505	0.320225	0.0004619	0.8094688	10	78	0.000571	7.265276	987.38	0.0009828	0.003059
59	91	0.002	4.095	0.002	4.03	0.351648	0.0004884	0.984127	10	78	0.000496	6.318807	987.38	0.0009828	0.003059
58.5	91	0.002	3.81	0.002	3.425	0.357143	0.0005249	0.8989501	10	78	0.000584	7.434975	987.38	0.0009828	0.003059
59	91	0.002	3.98	0.002	3.42	0.351648	0.0005025	0.8592965	10	78	0.000585	7.445845	987.38	0.0009828	0.003059
64.5	72	0.002	7.655	0.002	6.43	0.104167	0.0002613	0.8399739	10	74.5	0.000311	3.96031	987.38	0.0009828	0.003059
62	78	0.002	7.165	0.002	4.815	0.205128	0.0002791	0.6720167	10	74.5	0.000415	5.288638	987.38	0.0009828	0.003059
59	81.5	0.002	5.78	0.002	3.935	0.276074	0.000346	0.6807958	10	74.5	0.000508	6.471357	987.38	0.0009828	0.003059
56.5	84	0.002	4.415	0.002	3.39	0.327381	0.000453	0.7678369	10	74.5	0.00059	7.511738	987.38	0.0009828	0.003059
55	86	0.002	4.03	0.002	3.235	0.360465	0.0004963	0.8027295	10	74.5	0.000618	7.871651	987.38	0.0009828	0.003059
55	86	0.002	4.105	0.002	3.5	0.360465	0.0004872	0.8526188	10	74.5	0.000571	7.275655	987.38	0.0009828	0.003059

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	eg	Qg (m3/s)	Qg/QI	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	QI (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	Y (N/m)
56	86	0.002	3.965	0.002	3.455	0.348837	0.0005044	0.8713745	10	74.5	0.000579	7.370417	987.38	0.0009828	0.003059
59	67.5	0.002	5.975	0.002	5.83	0.125926	0.0003347	0.9757322	10	70	0.000343	4.367889	987.38	0.0009828	0.003059
55.5	71	0.002	6.445	0.002	4.57	0.21831	0.0003103	0.7090768	10	70	0.000438	5.572164	987.38	0.0009828	0.003059
53	75	0.002	5.81	0.002	3.95	0.293333	0.0003442	0.6798623	10	70	0.000506	6.446783	987.38	0.0009828	0.003059
50	79	0.002	4.095	0.002	3.375	0.367089	0.0004884	0.8241758	10	70	0.000593	7.545123	987.38	0.0009828	0.003059
50.5	79	0.002	4.035	0.002	3.375	0.360759	0.0004957	0.8364312	10	70	0.000593	7.545123	987.38	0.0009828	0.003059
50.5	79	0.002	4.16	0.002	3.62	0.360759	0.0004808	0.8701923	10	70	0.000552	7.034473	987.38	0.0009828	0.003059
54.4	61	0.002	5.815	0.002	6.065	0.108197	0.0003439	1.0429923	10	65	0.00033	4.198646	987.38	0.0009828	0.003059
49.5	67	0.002	5.94	0.002	4.56	0.261194	0.0003367	0.7676768	10	65	0.000439	5.584384	987.38	0.0009828	0.003059
47	69	0.002	4.995	0.002	3.715	0.318841	0.0004004	0.7437437	10	65	0.000538	6.854587	987.38	0.0009828	0.003059
45.5	70	0.002	4.52	0.002	3.295	0.35	0.0004425	0.7289823	10	65	0.000607	7.728313	987.38	0.0009828	0.003059
45	71	0.002	4.35	0.002	3.51	0.366197	0.0004598	0.8068966	10	65	0.00057	7.254926	987.38	0.0009828	0.003059
45	72	0.002	4.395	0.002	3.5	0.375	0.0004551	0.7963595	10	65	0.000571	7.275655	987.38	0.0009828	0.003059
50	55	0.002	5.48	0.002	5.565	0.090909	0.000365	1.0155109	10	60	0.000359	4.575883	987.38	0.0009828	0.003059
48.5	58	0.002	6.725	0.002	4.84	0.163793	0.0002974	0.7197026	10	60	0.000413	5.26132	987.38	0.0009828	0.003059
45	61	0.002	5.53	0.002	3.81	0.262295	0.0003617	0.6889693	10	60	0.000525	6.683672	987.38	0.0009828	0.003059
45	61	0.002	4.5	0.002	3.47	0.262295	0.0004444	0.7711111	10	60	0.000576	7.338556	987.38	0.0009828	0.003059
44.5	64	0.002	4.5	0.002	3.36	0.304688	0.0004444	0.7466667	10	60	0.000595	7.578807	987.38	0.0009828	0.003059
44	65	0.002	4.4	0.002	3.71	0.323077	0.0004545	0.8431818	10	60	0.000539	6.863825	987.38	0.0009828	0.003059
43	55	0.002	3.96	0.002	5.155	0.218182	0.0005051	1.3017677	10	55	0.000388	4.939824	987.38	0.0009828	0.003059
41	56	0.002	5.92	0.002	4.035	0.267857	0.0003378	0.6815878	10	55	0.000496	6.310977	987.38	0.0009828	0.003059
40.5	57	0.002	4.89	0.002	3.51	0.289474	0.000409	0.7177914	10	55	0.00057	7.254926	987.38	0.0009828	0.003059

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	eg	Qg (m3/s)	Qg/Ql	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	Ql (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	γ (N/m)
40	58	0.002	4.505	0.002	3.675	0.310345	0.000444	0.8157603	10	55	0.000544	6.929195	987.38	0.0009828	0.003059
39	58	0.002	4.61	0.002	3.73	0.327586	0.0004338	0.8091106	10	55	0.000536	6.827022	987.38	0.0009828	0.003059
39	59	0.002	4.59	0.002	3.235	0.338983	0.0004357	0.704793	10	55	0.000618	7.871651	987.38	0.0009828	0.003059
36	54	0.001	7.35	0.002	3.895	0.333333	0.0001361	0.264966	10	50	0.000513	6.537815	987.38	0.0009828	0.003059
33	55	0.001	3.485	0.002	3.56	0.4	0.0002869	0.5107604	10	50	0.000562	7.153031	987.38	0.0009828	0.003059
33.5	54	0.001	4.96	0.002	3.595	0.37963	0.0002016	0.3623992	10	50	0.000556	7.083391	987.38	0.0009828	0.003059
33.5	55	0.001	6.85	0.002	3.48	0.390909	0.000146	0.2540146	10	50	0.000575	7.317469	987.38	0.0009828	0.003059
34	56	0.001	6.86	0.002	3.75	0.392857	0.0001458	0.2733236	10	50	0.000533	6.790611	987.38	0.0009828	0.003059
32	51.5	0.001	4.97	0.002	3.595	0.378641	0.0002012	0.36167	10	47	0.000556	7.083391	987.38	0.0009828	0.003059
31	53	0.001	3.925	0.002	3.28	0.415094	0.0002548	0.4178344	10	47	0.00061	7.763656	987.38	0.0009828	0.003059
31	53	0.001	3.94	0.002	3.535	0.415094	0.0002538	0.4486041	10	47	0.000566	7.203618	987.38	0.0009828	0.003059
30	45	0.001	10.19	0.002	3.765	0.333333	9.814E-05	0.1847399	10	44	0.000531	6.763557	987.38	0.0009828	0.003059
24	42	0.001	9.34	0.002	3.94	0.428571	0.0001071	0.2109208	10	41	0.000508	6.463145	987.38	0.0009828	0.003059
27	48	0.001	5.63	0.002	3.5	0.4375	0.0001776	0.3108348	10	41	0.000571	7.275655	987.38	0.0009828	0.003059
27	46	0.001	5.06	0.002	3.75	0.413043	0.0001976	0.3705534	10	41	0.000533	6.790611	987.38	0.0009828	0.003059
20	39	0.001	10.81	0.002	3.84	0.487179	9.251E-05	0.1776133	10	38	0.000521	6.631456	987.38	0.0009828	0.003059
25	46	0.001	6.06	0.002	3.69	0.456522	0.000165	0.3044554	10	38	0.000542	6.901027	987.38	0.0009828	0.003059
72	81	0.002	5.015	0.003	16.64	0.111111	0.0003988	2.2120306	12.7	83	0.00018	1.423215	987.38	0.0009828	0.003059
68	85	0.002	3.86	0.003	11.42	0.2	0.0005181	1.9723661	12.7	83	0.000263	2.073757	987.38	0.0009828	0.003059
63	91.5	0.002	3.375	0.003	9.75	0.311475	0.0005926	1.9259259	12.7	83	0.000308	2.428954	987.38	0.0009828	0.003059
62	93.5	0.002	3.105	0.003	9.455	0.336898	0.0006441	2.030059	12.7	83	0.000317	2.504739	987.38	0.0009828	0.003059
62	93	0.003	4.155	0.003	9.26	0.333333	0.000722	2.2286402	12.7	83	0.000324	2.557484	987.38	0.0009828	0.003059

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	eg	Qg (m3/s)	Qg/Ql	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	Ql (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	γ (N/m)
62	93	0.002	2.72	0.003	9.31	0.333333	0.0007353	2.2818627	12.7	83	0.000322	2.543749	987.38	0.0009828	0.003059
63	79	0.002	3.685	0.003	11.31	0.202532	0.0005427	2.046133	12.7	78	0.000265	2.093926	987.38	0.0009828	0.003059
61	82	0.002	3.615	0.003	9.97	0.256098	0.0005533	1.8386353	12.7	78	0.000301	2.375356	987.38	0.0009828	0.003059
58	85.5	0.003	4.33	0.003	8.85	0.321637	0.0006928	2.0438799	12.7	78	0.000339	2.675966	987.38	0.0009828	0.003059
57	86.5	0.003	4.23	0.003	8.675	0.34104	0.0007092	2.0508274	12.7	78	0.000346	2.729948	987.38	0.0009828	0.003059
57	86.5	0.003	4.14	0.003	8.5	0.34104	0.0007246	2.0531401	12.7	78	0.000353	2.786153	987.38	0.0009828	0.003059
55	72.5	0.002	3.69	0.003	12.27	0.241379	0.000542	2.2168022	12.7	73	0.000244	1.930098	987.38	0.0009828	0.003059
53	74.5	0.002	3.175	0.003	10.905	0.288591	0.0006299	2.2897638	12.7	73	0.000275	2.171692	987.38	0.0009828	0.003059
52	76	0.002	3.185	0.003	10.3	0.315789	0.0006279	2.1559393	12.7	73	0.000291	2.299253	987.38	0.0009828	0.003059
51.5	76.5	0.002	3.075	0.003	10.045	0.326797	0.0006504	2.1777778	12.7	73	0.000299	2.357621	987.38	0.0009828	0.003059
52	78	0.002	2.69	0.003	8.28	0.333333	0.0007435	2.0520446	12.7	73	0.000362	2.860182	987.38	0.0009828	0.003059
52	65	0.002	4.125	0.003	16.54	0.2	0.0004848	2.6731313	12.7	68	0.000181	1.43182	987.38	0.0009828	0.003059
49	67.5	0.002	3.535	0.003	11.905	0.274074	0.0005658	2.2451674	12.7	68	0.000252	1.989274	987.38	0.0009828	0.003059
47	69	0.002	3.315	0.003	10.955	0.318841	0.0006033	2.2031171	12.7	68	0.000274	2.16178	987.38	0.0009828	0.003059
46.5	69.5	0.002	3.16	0.003	10.815	0.330935	0.0006329	2.2816456	12.7	68	0.000277	2.189764	987.38	0.0009828	0.003059
46	69	0.002	3.035	0.003	10.485	0.333333	0.000659	2.3031301	12.7	68	0.000286	2.258684	987.38	0.0009828	0.003059
46	69	0.002	2.91	0.003	10.47	0.333333	0.0006873	2.3986254	12.7	68	0.000287	2.26192	987.38	0.0009828	0.003059
48	57.5	0.002	4.72	0.003	18.235	0.165217	0.0004237	2.575565	12.7	63	0.000165	1.298728	987.38	0.0009828	0.003059
45	60.5	0.002	3.795	0.003	11.765	0.256198	0.000527	2.0667545	12.7	63	0.000255	2.012945	987.38	0.0009828	0.003059
42	62.5	0.002	3.28	0.003	10.535	0.328	0.0006098	2.1412602	12.7	63	0.000285	2.247964	987.38	0.0009828	0.003059
41	64	0.003	4.58	0.003	10	0.359375	0.000655	2.1834061	12.7	63	0.0003	2.36823	987.38	0.0009828	0.003059
40	64	0.003	4.53	0.003	9.8	0.375	0.0006623	2.1633554	12.7	63	0.000306	2.416562	987.38	0.0009828	0.003059

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	ϵ_g	Qg (m3/s)	Qg/QI	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	QI (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	γ (N/m)
40	64	0.003	4.51	0.003	9.7	0.375	0.0006652	2.1507761	12.7	63	0.000309	2.441475	987.38	0.0009828	0.003059
44.5	53	0.002	4.89	0.003	21.77	0.160377	0.000409	2.9679618	12.7	58	0.000138	1.087841	987.38	0.0009828	0.003059
41.5	54.5	0.002	3.735	0.003	12.465	0.238532	0.0005355	2.2248996	12.7	58	0.000241	1.899904	987.38	0.0009828	0.003059
38	57	0.002	3.265	0.003	10.75	0.333333	0.0006126	2.1949974	12.7	58	0.000279	2.203005	987.38	0.0009828	0.003059
37	58	0.002	3.125	0.003	10.23	0.362069	0.00064	2.1824	12.7	58	0.000293	2.314986	987.38	0.0009828	0.003059
36	57.5	0.002	2.985	0.003	10.045	0.373913	0.00067	2.2434394	12.7	58	0.000299	2.357621	987.38	0.0009828	0.003059
36	57.5	0.002	2.96	0.003	10	0.373913	0.0006757	2.2522523	12.7	58	0.0003	2.36823	987.38	0.0009828	0.003059
39	48.5	0.002	4.825	0.003	18.065	0.195876	0.0004145	2.4960276	12.7	53	0.000166	1.31095	987.38	0.0009828	0.003059
36	50.5	0.002	3.845	0.003	11.92	0.287129	0.0005202	2.0667534	12.7	53	0.000252	1.98677	987.38	0.0009828	0.003059
33	52	0.002	3.56	0.003	10.77	0.365385	0.0005618	2.0168539	12.7	53	0.000279	2.198914	987.38	0.0009828	0.003059
31	53	0.002	3.295	0.003	10.285	0.415094	0.000607	2.0809307	12.7	53	0.000292	2.302606	987.38	0.0009828	0.003059
30.5	53.5	0.002	3.155	0.003	10.265	0.429907	0.0006339	2.1690438	12.7	53	0.000292	2.307092	987.38	0.0009828	0.003059
30	53	0.002	3.08	0.003	10.18	0.433962	0.0006494	2.2034632	12.7	53	0.000295	2.326356	987.38	0.0009828	0.003059
36	45	0.002	4.53	0.003	19	0.2	0.0004415	2.7961737	12.7	50	0.000158	1.246437	987.38	0.0009828	0.003059
32	47	0.002	3.88	0.003	12.1	0.319149	0.0005155	2.0790378	12.7	50	0.000248	1.957215	987.38	0.0009828	0.003059
29	49	0.002	3.5	0.003	10.56	0.408163	0.0005714	2.0114286	12.7	50	0.000284	2.242642	987.38	0.0009828	0.003059
28.5	49	0.002	3.12	0.003	10	0.418367	0.000641	2.1367521	12.7	50	0.0003	2.36823	987.38	0.0009828	0.003059
28	49	0.002	3.04	0.003	9.905	0.428571	0.0006579	2.1721491	12.7	50	0.000303	2.390944	987.38	0.0009828	0.003059
28	49.5	0.002	2.88	0.003	9.9	0.434343	0.0006944	2.2916667	12.7	50	0.000303	2.392152	987.38	0.0009828	0.003059
33	41	0.002	4.97	0.003	22.43	0.195122	0.0004024	3.008719	12.7	47	0.000134	1.055832	987.38	0.0009828	0.003059
30.5	43	0.002	3.97	0.003	13.31	0.290698	0.0005038	2.2350966	12.7	47	0.000225	1.779286	987.38	0.0009828	0.003059
28	44	0.002	3.57	0.003	11.53	0.363636	0.0005602	2.1531279	12.7	47	0.00026	2.053972	987.38	0.0009828	0.003059

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	eg	Qg (m3/s)	Qg/QI	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	QI (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	γ (N/m)
26	44	0.002	3.375	0.003	10.32	0.409091	0.0005926	2.0385185	12.7	47	0.000291	2.294797	987.38	0.0009828	0.003059
25.5	44.5	0.002	3.31	0.003	10.75	0.426966	0.0006042	2.1651561	12.7	47	0.000279	2.203005	987.38	0.0009828	0.003059
26	45	0.002	3	0.003	10.56	0.422222	0.0006667	2.3466667	12.7	47	0.000284	2.242642	987.38	0.0009828	0.003059
28	37.5	0.002	4.78	0.001	6.38	0.253333	0.0004184	2.6694561	12.7	44	0.000157	1.23732	987.38	0.0009828	0.003059
24.5	39	0.002	3.9	0.001	4.16	0.371795	0.0005128	2.1333333	12.7	44	0.00024	1.89762	987.38	0.0009828	0.003059
23	41	0.002	3.44	0.001	3.81	0.439024	0.0005814	2.2151163	12.7	44	0.000262	2.071943	987.38	0.0009828	0.003059
20.5	40	0.002	3.34	0.001	3.5	0.4875	0.0005988	2.0958084	12.7	44	0.000286	2.255457	987.38	0.0009828	0.003059
21	40.5	0.002	3.08	0.001	3.5	0.481481	0.0006494	2.2727273	12.7	44	0.000286	2.255457	987.38	0.0009828	0.003059
20.5	40	0.002	2.9	0.001	3.36	0.4875	0.0006897	2.3172414	12.7	44	0.000298	2.349435	987.38	0.0009828	0.003059
25	33	0.002	4.94	0.001	8.69	0.242424	0.0004049	3.5182186	12.7	41	0.000115	0.908412	987.38	0.0009828	0.003059
21.5	35	0.002	3.93	0.001	4.28	0.385714	0.0005089	2.178117	12.7	41	0.000234	1.844416	987.38	0.0009828	0.003059
18.5	36	0.002	3.44	0.001	3.87	0.486111	0.0005814	2.25	12.7	41	0.000258	2.039819	987.38	0.0009828	0.003059
17.5	36	0.002	3.31	0.001	3.71	0.513889	0.0006042	2.2416918	12.7	41	0.00027	2.12779	987.38	0.0009828	0.003059
17	36	0.002	3.25	0.001	3.63	0.527778	0.0006154	2.2338462	12.7	41	0.000275	2.174683	987.38	0.0009828	0.003059
60	81.5	0.002	9.28	0.002	3.5	0.263804	0.0002155	0.3771552	15.1	80	0.000571	3.190937	987.38	0.0009828	0.003059
58	84	0.002	8.16	0.002	3.19	0.309524	0.0002451	0.3909314	15.1	80	0.000627	3.501028	987.38	0.0009828	0.003059
57	84	0.002	8.03	0.002	2.93	0.321429	0.0002491	0.3648817	15.1	80	0.000683	3.811699	987.38	0.0009828	0.003059
56.5	84	0.002	7.9	0.002	2.84	0.327381	0.0002532	0.3594937	15.1	80	0.000704	3.932492	987.38	0.0009828	0.003059
56	83.5	0.002	7.69	0.002	2.79	0.329341	0.0002601	0.3628088	15.1	80	0.000717	4.002967	987.38	0.0009828	0.003059
58.5	70.5	0.001	16.5	0.002	4.4	0.170213	6.061E-05	0.1333333	15.1	75	0.000455	2.538245	987.38	0.0009828	0.003059
56	73.5	0.002	10	0.002	3.72	0.238095	0.0002	0.372	15.1	75	0.000538	3.002225	987.38	0.0009828	0.003059
52.5	76	0.002	8.35	0.002	3.31	0.309211	0.0002395	0.3964072	15.1	75	0.000604	3.374102	987.38	0.0009828	0.003059

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	ϵ_g	Qg (m3/s)	Qg/QI	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	QI (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	γ (N/m)
51.5	77	0.002	7.78	0.002	3.03	0.331169	0.0002571	0.3894602	15.1	75	0.00066	3.6859	987.38	0.0009828	0.003059
51.5	77.5	0.002	7.75	0.002	3.03	0.335484	0.0002581	0.3909677	15.1	75	0.00066	3.6859	987.38	0.0009828	0.003059
51	77.5	0.002	7.37	0.002	2.87	0.341935	0.0002714	0.3894166	15.1	75	0.000697	3.891386	987.38	0.0009828	0.003059
53	65.5	0.001	16.47	0.002	3.94	0.19084	6.072E-05	0.1196114	15.1	70	0.000508	2.834588	987.38	0.0009828	0.003059
49	68	0.002	9.22	0.002	3.47	0.279412	0.0002169	0.3763557	15.1	70	0.000576	3.218524	987.38	0.0009828	0.003059
46.5	69	0.002	8.13	0.002	3	0.326087	0.000246	0.3690037	15.1	70	0.000667	3.722759	987.38	0.0009828	0.003059
46	70	0.002	7.59	0.002	2.94	0.342857	0.0002635	0.3873518	15.1	70	0.00068	3.798734	987.38	0.0009828	0.003059
46	70	0.002	7.32	0.002	2.88	0.342857	0.0002732	0.3934426	15.1	70	0.000694	3.877874	987.38	0.0009828	0.003059
46	70	0.002	7	0.002	2.75	0.342857	0.0002857	0.3928571	15.1	70	0.000727	4.061192	987.38	0.0009828	0.003059
46.5	62	0.001	6.82	0.002	3.85	0.25	0.0001466	0.2822581	15.1	65	0.000519	2.900851	987.38	0.0009828	0.003059
42.5	63.5	0.002	8.25	0.002	3.31	0.330709	0.0002424	0.4012121	15.1	65	0.000604	3.374102	987.38	0.0009828	0.003059
41.5	64	0.002	8.12	0.002	3.03	0.351563	0.0002463	0.3731527	15.1	65	0.00066	3.6859	987.38	0.0009828	0.003059
41.5	64	0.002	7.88	0.002	2.94	0.351563	0.0002538	0.3730964	15.1	65	0.00068	3.798734	987.38	0.0009828	0.003059
41.5	64	0.002	7.7	0.002	2.69	0.351563	0.0002597	0.3493506	15.1	65	0.000743	4.151776	987.38	0.0009828	0.003059
40	63.5	0.002	7.6	0.002	2.63	0.370079	0.0002632	0.3460526	15.1	65	0.00076	4.246494	987.38	0.0009828	0.003059
42	56	0.002	10.78	0.002	3.72	0.25	0.0001855	0.3450835	15.1	60	0.000538	3.002225	987.38	0.0009828	0.003059
39.5	57.5	0.002	10.5	0.002	3.22	0.313043	0.0001905	0.3066667	15.1	60	0.000621	3.468409	987.38	0.0009828	0.003059
36.5	58	0.002	7.72	0.002	3.03	0.37069	0.0002591	0.392487	15.1	60	0.00066	3.6859	987.38	0.0009828	0.003059
36.5	58	0.002	7.72	0.002	2.91	0.37069	0.0002591	0.376943	15.1	60	0.000687	3.837896	987.38	0.0009828	0.003059
36	58	0.002	7.59	0.002	2.8	0.37931	0.0002635	0.3689065	15.1	60	0.000714	3.988671	987.38	0.0009828	0.003059
36	51	0.002	9.47	0.002	3.57	0.294118	0.0002112	0.3769799	15.1	55	0.00056	3.128369	987.38	0.0009828	0.003059
32.5	52.5	0.002	7.72	0.002	3.06	0.380952	0.0002591	0.3963731	15.1	55	0.000654	3.649764	987.38	0.0009828	0.003059

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	eg	Qg (m3/s)	Qg/Ql	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	Ql (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	Y (N/m)
32	52.5	0.002	7.69	0.002	2.97	0.390476	0.0002601	0.3862159	15.1	55	0.000673	3.760363	987.38	0.0009828	0.003059
31.5	53	0.002	7.35	0.002	2.75	0.40566	0.0002721	0.3741497	15.1	55	0.000727	4.061192	987.38	0.0009828	0.003059
31	52	0.002	7.5	0.002	3.09	0.403846	0.0002667	0.412	15.1	55	0.000647	3.614329	987.38	0.0009828	0.003059
31	53	0.002	7.78	0.002	3	0.415094	0.0002571	0.3856041	15.1	55	0.000667	3.722759	987.38	0.0009828	0.003059
33	46	0.002	11.81	0.002	3.56	0.282609	0.0001693	0.3014395	15.1	51	0.000562	3.137157	987.38	0.0009828	0.003059
28.5	47.5	0.002	8.78	0.002	3.31	0.4	0.0002278	0.3769932	15.1	51	0.000604	3.374102	987.38	0.0009828	0.003059
27	48	0.002	8.07	0.002	3.03	0.4375	0.0002478	0.3754647	15.1	51	0.00066	3.6859	987.38	0.0009828	0.003059
27	48	0.002	7.65	0.002	3	0.4375	0.0002614	0.3921569	15.1	51	0.000667	3.722759	987.38	0.0009828	0.003059
26	48.5	0.002	7.9	0.002	3.03	0.463918	0.0002532	0.3835443	15.1	51	0.00066	3.6859	987.38	0.0009828	0.003059
29.5	43	0.001	6.19	0.003	5.59	0.313953	0.0001616	0.3010232	15.1	48	0.000537	2.996855	987.38	0.0009828	0.003059
26	44.5	0.002	8.53	0.003	4.62	0.41573	0.0002345	0.3610785	15.1	48	0.000649	3.626064	987.38	0.0009828	0.003059
24	45	0.002	7.87	0.003	4.25	0.466667	0.0002541	0.3600169	15.1	48	0.000706	3.941745	987.38	0.0009828	0.003059
24	45	0.002	7.66	0.003	4.25	0.466667	0.0002611	0.3698869	15.1	48	0.000706	3.941745	987.38	0.0009828	0.003059
23	46	0.002	7.68	0.003	4.09	0.5	0.0002604	0.3550347	15.1	48	0.000733	4.095946	987.38	0.0009828	0.003059
24	39	0.001	5.75	0.003	5.06	0.384615	0.0001739	0.2933333	15.1	45	0.000593	3.310754	987.38	0.0009828	0.003059
21	39.5	0.002	8.62	0.003	4.81	0.468354	0.000232	0.3720031	15.1	45	0.000624	3.482831	987.38	0.0009828	0.003059
19.5	40	0.002	8.22	0.003	4.44	0.5125	0.0002433	0.3600973	15.1	45	0.000676	3.773067	987.38	0.0009828	0.003059
19	40	0.002	8.13	0.003	4.41	0.525	0.000246	0.3616236	15.1	45	0.00068	3.798734	987.38	0.0009828	0.003059
19	40	0.002	8.19	0.003	4.28	0.525	0.0002442	0.3483923	15.1	45	0.000701	3.914116	987.38	0.0009828	0.003059
20	34	0.001	7	0.003	5.18	0.411765	0.0001429	0.2466667	15.1	41	0.000579	3.234057	987.38	0.0009828	0.003059
17	36	0.001	4.22	0.003	4.41	0.527778	0.000237	0.3483412	15.1	41	0.00068	3.798734	987.38	0.0009828	0.003059
16.5	37	0.001	4.06	0.003	4.1	0.554054	0.0002463	0.3366174	15.1	41	0.000732	4.085955	987.38	0.0009828	0.003059

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	ϵ_g	Qg (m3/s)	Qg/QI	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	QI (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	γ (N/m)
16.5	37.5	0.001	4.07	0.003	4.09	0.56	0.0002457	0.3349713	15.1	41	0.000733	4.095946	987.38	0.0009828	0.003059
16.5	37	0.001	3.91	0.003	4.06	0.554054	0.0002558	0.3461211	15.1	41	0.000739	4.126211	987.38	0.0009828	0.003059
53.5	62	0.001	6.06	0.003	11.62	0.137097	0.000165	0.6391639	6.1	65	0.000258	8.834166	998.64	0.0013313	0.001902
56	84	0.001	4.47	0.003	8.07	0.333333	0.0002237	0.6017897	6.1	65	0.000372	12.72032	998.64	0.0013313	0.001902
		0.001	3.41	0.003	6.9		0.0002933	0.6744868	6.1	65	0.000435	14.87725	998.64	0.0013313	0.001902
		0.001	3.28	0.002	4.28		0.0003049	0.652439	6.1	65	0.000467	15.98957	998.64	0.0013313	0.001902
		0.001	3	0.002	4.44		0.0003333	0.74	6.1	65	0.00045	15.41337	998.64	0.0013313	0.001902
55	68.5	0.002	6.19	0.002	6.97	0.19708	0.0003231	1.1260097	7	65	0.000287	7.456092	998.64	0.0013313	0.001902
		0.001	4.38	0.003	7.06		0.0002283	0.5372907	7	65	0.000425	11.04156	998.64	0.0013313	0.001902
		0.002	7.84	0.003	6.34		0.0002551	0.5391156	7	65	0.000473	12.2955	998.64	0.0013313	0.001902
		0.001	3.96	0.002	4.13		0.0002525	0.5214646	7	65	0.000484	12.58328	998.64	0.0013313	0.001902
		0.001	3.06	0.002	4		0.0003268	0.6535948	7	65	0.0005	12.99224	998.64	0.0013313	0.001902
49	60	0.003	9.03	0.002	5.16	0.183333	0.0003322	0.8571429	10	65	0.000388	4.935037	998.64	0.0013313	0.001902
49	76	0.002	8.87	0.003	6.41	0.355263	0.0002255	0.4817738	10	65	0.000468	5.958999	998.64	0.0013313	0.001902
		0.002	3.59	0.001	3.22		0.0005571	1.7938719	10	65	0.000311	3.95416	998.64	0.0013313	0.001902
		0.001	3.03	0.002	3.25		0.00033	0.5363036	10	65	0.000615	7.83532	998.64	0.0013313	0.001902
46.5	57	0.002	10.47	0.003	7.32	0.184211	0.000191	0.4660936	12.7	65	0.00041	3.235287	998.64	0.0013313	0.001902
		0.002	7.12	0.003	5.81		0.0002809	0.5440075	12.7	65	0.000516	4.076128	998.64	0.0013313	0.001902
42	61	0.002	6.69	0.003	5.5	0.311475	0.000299	0.5480817	12.7	65	0.000545	4.305873	998.64	0.0013313	0.001902
41	74	0.002	9.25	0.003	4.69	0.445946	0.0002162	0.338018	12.7	65	0.00064	5.049532	998.64	0.0013313	0.001902
44	81	0.002	7.65	0.003	5.03	0.45679	0.0002614	0.4383442	12.7	65	0.000596	4.708211	998.64	0.0013313	0.001902
45	57	0.001	8.47	0.003	6.22	0.210526	0.0001181	0.2447855	15.1	65	0.000482	2.693315	998.64	0.0013313	0.001902

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	ϵ_g	Qg (m3/s)	Qg/Ql	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	Ql (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	γ (N/m)
45	62	0.002	6.81	0.003	6.12	0.274194	0.0002937	0.5991189	15.1	65	0.00049	2.737323	998.64	0.0013313	0.001902
40	67	0.002	8	0.003	4.81	0.402985	0.00025	0.4008333	15.1	65	0.000624	3.482831	998.64	0.0013313	0.001902
38.5	66	0.002	7.37	0.003	4.5	0.416667	0.0002714	0.4070556	15.1	65	0.000667	3.722759	998.64	0.0013313	0.001902
38	66	0.002	6.12	0.003	4.5	0.424242	0.0003268	0.4901961	15.1	65	0.000667	3.722759	998.64	0.0013313	0.001902
		0.002	7.74	0.003	11.57		0.0002584	0.9965547	6.1	62	0.000259	8.872343	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	9.02	0.003	8.9		0.0002217	0.6577975	6.1	62	0.000337	11.53405	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	6.82	0.003	7.48		0.0002933	0.7311828	6.1	62	0.000401	13.72366	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	6.56	0.003	4.75		0.0003049	0.4827236	6.1	62	0.000632	21.61116	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	6.73	0.003	6.55		0.0002972	0.6488361	6.1	62	0.000458	15.67222	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	6.21	0.003	6.76		0.0003221	0.7257112	6.1	62	0.000444	15.18536	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	7.28	0.003	10.15		0.0002747	0.9294872	7	62	0.000296	7.680142	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	8.13	0.003	8.19		0.000246	0.6715867	7	62	0.000366	9.518125	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	7.54	0.003	6.97		0.0002653	0.6162688	7	62	0.00043	11.18414	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	8.05	0.003	6.74		0.0002484	0.5581781	7	62	0.000445	11.56579	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	8.35	0.002	4.58		0.0002395	0.548503	7	62	0.000437	11.34693	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	6.12	0.003	6.15		0.0003268	0.6699346	7	62	0.000488	12.67536	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	13.7	0.003	8.63		0.000146	0.4199513	10	62	0.000348	4.426093	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	5.22	0.003	6.83		0.0003831	0.8722861	10	62	0.000439	5.59256	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	7.47	0.003	5.83		0.0002677	0.5203034	10	62	0.000515	6.551833	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	7.04	0.003	4.97		0.0002841	0.4706439	10	62	0.000604	7.685551	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	6.42	0.003	5.31		0.0003115	0.5514019	10	62	0.000565	7.193444	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	7.72	0.003	5.42		0.0002591	0.4680484	10	62	0.000554	7.047451	1002.4	0.0016888	0.001942

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	ϵ_g	Qg (m3/s)	Qg/QI	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	QI (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	γ (N/m)
		0.002	6.48	0.003	5.54		0.0003086	0.5699588	10	62	0.000542	6.894799	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	9.33	0.003	8.3		0.0002144	0.593069	12.7	62	0.000361	2.85329	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	6.35	0.003	6.5		0.000315	0.6824147	12.7	62	0.000462	3.643431	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	5.8	0.003	5.62		0.0003448	0.645977	12.7	62	0.000534	4.213933	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	6.65	0.003	4.76		0.0003008	0.477193	12.7	62	0.00063	4.975274	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	7.71	0.003	4.81		0.0002594	0.4159101	12.7	62	0.000624	4.923556	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	5.23	0.003	5.12		0.0003824	0.652645	12.7	62	0.000586	4.62545	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	5.94	0.003	5.44		0.0003367	0.6105499	12.7	62	0.000551	4.353365	1002.4	0.0016888	0.001942
37.5	69	0.002	7.26	0.003	4.79	0.456522	0.0002755	0.4398531	15.1	62	0.000626	3.497373	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	7.25	0.003	4.7		0.0002759	0.4321839	15.1	62	0.000638	3.564344	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	7.92	0.003	4.88		0.0002525	0.4107744	15.1	62	0.000615	3.432872	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	12.68	0.003	5.91		0.0001577	0.3107256	15.1	62	0.000508	2.834588	1002.4	0.0016888	0.001942
45	60	0.002	20.24	0.003	6.9	0.25	9.881E-05	0.2272727	15.1	62	0.000435	2.427887	1002.4	0.0016888	0.001942
		0.002	6.62	0.003	10.64		0.0003021	1.0715005	6.1	60	0.000282	9.64784	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	7.2	0.003	8.87		0.0002778	0.8212963	6.1	60	0.000338	11.57306	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	8.49	0.003	7.87		0.0002356	0.6179819	6.1	60	0.000381	13.04358	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	7.61	0.003	6.66		0.0002628	0.5834428	6.1	60	0.00045	15.41337	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	8.41	0.003	6.45		0.0002378	0.5112961	6.1	60	0.000465	15.9152	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	7.26	0.003	7.06		0.0002755	0.6483012	6.1	60	0.000425	14.54009	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	8.33	0.003	7.53		0.0002401	0.6026411	6.1	60	0.000398	13.63254	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	7.19	0.003	10.02		0.0002782	0.9290682	7	60	0.000299	7.779785	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	8.58	0.003	7.64		0.0002331	0.5936286	7	60	0.000393	10.20333	1006.59	0.0019905	0.001705

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	eg	Qg (m3/s)	Qg/Ql	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	Ql (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	γ (N/m)
		0.002	7.4	0.003	6.87		0.0002703	0.6189189	7	60	0.000437	11.34693	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	7.89	0.003	6.1		0.0002535	0.5154204	7	60	0.000492	12.77925	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	7.47	0.003	6.62		0.0002677	0.5908077	7	60	0.000453	11.77544	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	7.27	0.003	6.95		0.0002751	0.6373223	7	60	0.000432	11.21632	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	6.03	0.003	7.38		0.0003317	0.8159204	7	60	0.000407	10.5628	1006.59	0.0019905	0.001705
47.5	58	0.002	6.24	0.003	7.45	0.181034	0.0003205	0.7959402	10	60	0.000403	5.127139	1006.59	0.0019905	0.001705
48	77	0.002	7.75	0.003	6.13	0.376623	0.0002581	0.5273118	10	60	0.000489	6.231189	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	7.09	0.003	5.27		0.0002821	0.4955336	10	60	0.000569	7.248043	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	6.7	0.003	4.95		0.0002985	0.4925373	10	60	0.000606	7.716603	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	7.24	0.003	5.26		0.0002762	0.4843462	10	60	0.00057	7.261822	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	7.06	0.003	4.96		0.0002833	0.4683664	10	60	0.000605	7.701046	1006.59	0.0019905	0.001705
43	56	0.002	7.15	0.003	6.07	0.232143	0.0002797	0.5659674	12.7	60	0.000494	3.901533	1006.59	0.0019905	0.001705
41	62	0.002	5.83	0.003	5.17	0.33871	0.0003431	0.591195	12.7	60	0.00058	4.580716	1006.59	0.0019905	0.001705
39.5	70	0.002	6.37	0.003	4.73	0.435714	0.000314	0.4950288	12.7	60	0.000634	5.006829	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	4.45	0.003	4.58		0.0004494	0.6861423	12.7	60	0.000655	5.170808	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	5.14	0.003	4.51		0.0003891	0.5849546	12.7	60	0.000665	5.251065	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	5.83	0.003	4.41		0.0003431	0.5042882	12.7	60	0.00068	5.370137	1006.59	0.0019905	0.001705
		0.002	6.2	0.003	4.4		0.0003226	0.4731183	12.7	60	0.000682	5.382342	1006.59	0.0019905	0.001705
40	55	0.001	8.62	0.003	5.43	0.272727	0.000116	0.2099768	15.1	60	0.000552	3.08516	1006.59	0.0019905	0.001705
37.5	55	0.001	5.36	0.003	4.76	0.318182	0.0001866	0.2960199	15.1	60	0.00063	3.519415	1006.59	0.0019905	0.001705
35	50	0.001	4.45	0.003	4.33	0.3	0.0002247	0.3243446	15.1	60	0.000693	3.868919	1006.59	0.0019905	0.001705
34.5	57	0.001	4.13	0.003	4.31	0.394737	0.0002421	0.3478612	15.1	60	0.000696	3.886872	1006.59	0.0019905	0.001705

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	eg	Qg (m3/s)	Qg/Ql	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	Ql (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	γ (N/m)
33.5	56	0.002	4.37	0.003	4.24	0.401786	0.0004577	0.6468345	15.1	60	0.000708	3.951042	1006.59	0.0019905	0.001705
33	55	0.002	4.42	0.003	4.2	0.4	0.0004525	0.6334842	15.1	60	0.000714	3.988671	1006.59	0.0019905	0.001705
34	54.5	0.001	6.46	0.003	5.06	0.376147	0.0001548	0.2610939	6.1	57	0.000593	20.28716	1010.26	0.0023624	0.008617
32	55	0.001	4.52	0.003	4.45	0.418182	0.0002212	0.3281711	6.1	57	0.000674	23.06809	1010.26	0.0023624	0.008617
31	56	0.001	3.97	0.003	4.23	0.446429	0.0002519	0.3551637	6.1	57	0.000709	24.26785	1010.26	0.0023624	0.008617
30	56	0.001	4.05	0.003	4.34	0.464286	0.0002469	0.3572016	6.1	57	0.000691	23.65277	1010.26	0.0023624	0.008617
30.5	56	0.002	4.15	0.003	4.24	0.455357	0.0004819	0.6811245	6.1	57	0.000708	24.21062	1010.26	0.0023624	0.008617
30.5	56	0.002	4.05	0.003	4.3	0.455357	0.0004938	0.7078189	6.1	57	0.000698	23.87279	1010.26	0.0023624	0.008617
40	55	0.002	8.76	0.003	6.13	0.272727	0.0002283	0.4665145	7	57	0.000489	12.71671	1010.26	0.0023624	0.008617
38	58	0.002	6.27	0.003	5.03	0.344828	0.000319	0.5348219	7	57	0.000596	15.4977	1010.26	0.0023624	0.008617
35	64	0.002	5.8	0.003	4.67	0.453125	0.0003448	0.5367816	7	57	0.000642	16.69239	1010.26	0.0023624	0.008617
36	66	0.003	8.06	0.003	4.5	0.454545	0.0003722	0.5583127	7	57	0.000667	17.32299	1010.26	0.0023624	0.008617
35	68	0.002	5.39	0.003	4.52	0.485294	0.0003711	0.55906	7	57	0.000664	17.24634	1010.26	0.0023624	0.008617
35	69	0.002	5.44	0.003	4.38	0.492754	0.0003676	0.5367647	7	57	0.000685	17.79759	1010.26	0.0023624	0.008617
36	70	0.002	5.3	0.003	4.44	0.485714	0.0003774	0.5584906	7	57	0.000676	17.55708	1010.26	0.0023624	0.008617
41.5	53	0.002	11.5	0.003	7.26	0.216981	0.0001739	0.4208696	10	57	0.000413	5.26132	1010.26	0.0023624	0.008617
41	59.5	0.002	5.76	0.003	5.92	0.310924	0.0003472	0.6851852	10	57	0.000507	6.452227	1010.26	0.0023624	0.008617
40	67	0.002	5.24	0.003	5.3	0.402985	0.0003817	0.6743003	10	57	0.000566	7.207016	1010.26	0.0023624	0.008617
		0.002	7.38	0.003	5.22		0.000271	0.4715447	10	57	0.000575	7.317469	1010.26	0.0023624	0.008617
		0.002	7.34	0.003	4.98		0.0002725	0.4523161	10	57	0.000602	7.670118	1010.26	0.0023624	0.008617
		0.002	7.34	0.003	4.99		0.0002725	0.4532243	10	57	0.000601	7.654747	1010.26	0.0023624	0.008617
		0.002	7.33	0.003	4.92		0.0002729	0.4474761	10	57	0.00061	7.763656	1010.26	0.0023624	0.008617

Data Pengamatan						Variabel Output			Variabel Input						
hf (cm)	Hf (cm)	Vg (m3)	t (s)	VI (m3)	t (s)	eg	Qg (m3/s)	Qg/Ql	Dn (mm)	H (cm) (=Z-55)	Ql (m3/s)	v (m/s)	ρ (kg/m3)	μ (kg/m.s)	Y (N/m)
42	55	0.001	7.7	0.003	7.1	0.236364	0.0001299	0.3073593	12.7	57	0.000423	3.335536	1010.26	0.0023624	0.008617
40	59	0.002	10.8	0.003	5.4	0.322034	0.0001852	0.3333333	12.7	57	0.000556	4.385612	1010.26	0.0023624	0.008617
38	63	0.002	57	0.003	5.8	0.396825	3.509E-05	0.0678363	12.7	57	0.000517	4.083156	1010.26	0.0023624	0.008617
36.5	66	0.002	5.3	0.003	4.2	0.44697	0.0003774	0.5283019	12.7	57	0.000714	5.638644	1010.26	0.0023624	0.008617
35	68	0.002	5.4	0.003	4.4	0.485294	0.0003704	0.5432099	12.7	57	0.000682	5.382342	1010.26	0.0023624	0.008617
35	71	0.002	5.3	0.003	4.6	0.507042	0.0003774	0.5786164	12.7	57	0.000652	5.148327	1010.26	0.0023624	0.008617
		0.002	5.4	0.003	4.4		0.0003704	0.5432099	12.7	57	0.000682	5.382342	1010.26	0.0023624	0.008617
35	56	0.001	9.16	0.003	5.26	0.375	0.0001092	0.1914119	15.1	57	0.00057	3.18487	1010.26	0.0023624	0.008617
32.5	54	0.001	5.23	0.003	4.64	0.398148	0.0001912	0.2957298	15.1	57	0.000647	3.610435	1010.26	0.0023624	0.008617
31.5	56	0.001	4.53	0.003	4.35	0.4375	0.0002208	0.3200883	15.1	57	0.00069	3.85113	1010.26	0.0023624	0.008617
30	55	0.001	4.32	0.003	4.31	0.454545	0.0002315	0.3325617	15.1	57	0.000696	3.886872	1010.26	0.0023624	0.008617
31	55	0.001	4.28	0.003	4.25	0.436364	0.0002336	0.3309969	15.1	57	0.000706	3.941745	1010.26	0.0023624	0.008617
31	55	0.001	4.39	0.003	4.34	0.436364	0.0002278	0.3295368	15.1	57	0.000691	3.860004	1010.26	0.0023624	0.008617
31	56	0.001	4.35	0.003	4.26	0.446429	0.0002299	0.3264368	15.1	57	0.000704	3.932492	1010.26	0.0023624	0.008617