



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH KONFIGURASI *LIQUID JET FLOW* TERHADAP
KEMAMPUAN ABSORPSI DAN ADSORPSI GAS CO₂**

SKRIPSI

**NUR ISTIQOMAH HAPSARI
04 05 06 0482**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM SARJANA
DEPOK
JULI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH KONFIGURASI *LIQUID JET FLOW* TERHADAP
KEMAMPUAN ABSORPSI DAN ADSORPSI GAS CO₂**

SKRIPSI

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

**NUR ISTIQOMAH HAPSARI
04 05 06 0482**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM SARJANA
DEPOK
JULI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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



Nama : Nur Istiqomah Hapsari
NPM : 04 05 06 0482
Tanda Tangan :
Tanggal : 7 Juli 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Nur Istiqomah Hapsari
NPM : 04 05 06 0482
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Pengaruh Konfigurasi *Liquid Jet Flow* Terhadap Kemampuan Absorpsi dan Adsorpsi Gas 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. Sukirno, M. Eng ()
Penguji : Ir. Dewi Tristantini, MT., PhD ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juli 2009

UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamu'alaikum wr. wb.

Puji dan syukur saya panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini. 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, pada kesempatan ini saya ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada **Bapak Ir. Setiadi, M.Eng** selaku dosen pembimbing, yang senantiasa menyediakan waktu dan pikirannya untuk membantu dan membimbing saya dalam menyelesaikan skripsi ini. Selain itu saya juga ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua tercinta yang selalu memberikan dukungan, semangat dan perhatian.
2. Teman-teman Teknik Kimia angkatan 2005 atas persahabatan dan kebersamaannya terutama Wulan, Monic, Letti, Dwi dan Cindy.
3. Teman satu penelitian saya Venessia, Adlan dan Andres atas kerja sama, bantuan dan diskusinya selama penyusunan skripsi ini.
4. Mang Ijal, Kang Jajat, Mas Eko, Mas Taufik, Mas Heri dan seluruh karyawan Teknik Kimia-FTUI atas segala bantuannya.
5. Semua pihak yang telah membantu yang tidak bisa saya sebutkan satu-persatu.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, Juli 2009

Nur Istiqomah Hapsari

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Nur Istiqomah Hapsari

NPM : 04 05 06 0482

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

“ Pengaruh Konfigurasi *Liquid Jet Flow* Terhadap Kemampuan Absorpsi dan Adsorpsi Gas CO₂ ”

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan 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: 7 Juli 2009

Yang menyatakan

(Nur Istiqomah Hapsari)

ABSTRAK

Nama : Nur Istiqomah Hapsari
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Pengaruh Konfigurasi *Liquid Jet Flow* Terhadap Kemampuan Adsorpsi dan Adsorpsi Gas CO₂

82 jenis konfigurasi *liquid jet flow* telah diujikan dengan proses adsorpsi karbon aktif dan absorpsi oleh NaOH. Gas CO₂ berasal dari tabung dengan konsentrasi 96,60% dan laju alir 5 L/min. Untuk konfigurasi terbaik diperoleh nilai *hold-up* fasa gas pada kisaran 0,55–0,65 dan rasio Q_G/Q_L bernilai 1,3–1,8. Konsentrasi CO₂ berkurang dari 96,60% menjadi (67-88)% setelah adsorpsi dan menjadi (0,01-0,07)% setelah absorpsi pada menit ke-4. Total penurunan konsentrasi CO₂ ~100% dan tidak terjadi proses desorpsi. Gelembung yang lebih dominan memiliki rentang diameter yang lebih kecil (0,00097-0,00184 mm) dan nilai konstanta laju reaksi absorpsi CO₂ sebesar $k=0,3439$, $m=0,0243$ dan $n=-0,0844$.

Kata kunci:

Adsorpsi, absorpsi, konfigurasi *liquid jet flow*

ABSTRACT

Name : Nur Istiqomah Hapsari
Study Program: Chemical Engineering
Title : The Effect of Liquid Jet Flow Configuration on CO₂ Absorption and Adsorption Process

82 types of liquid jet flow configurations had been tested with active carbon adsorption and absorption using NaOH. CO₂ gas is taken from storage box with 96.60% of concentration and 5 L/min of rate. Best configurations had 0.55-0.6 of gas hold-up value range and 1.3-1.8 of Q_G/Q_L ratio. CO₂ concentration reduces from 96.60% to (67-88)% after process and 0.01%-0.07% after absorption in fourth minute. Total CO₂ concentration reduces ~100% and desorption process is not happened. Bubbles with smaller range of diameter (0.00097-0.00184) mm are more dominant and CO₂ absorption reaction rate constant values are $k=0,3439$, $m=0,0243$ and $n=-0,0844$.

Keywords:

Adsorption, absorption, liquid jet flow configuration

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR RUMUS	xi
DAFTAR NOTASI	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Kegunaan Penelitian	4
2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Absorpsi Gas-Cair Dengan <i>Reaktor Jet</i>	5
2.2 <i>Jet Bubble Column</i>	7
2.3 Pusaran Eddy	9
2.4 Sudut <i>Jet Bubble Column</i>	10
2.5 Studi Hidrodinamika Pada <i>Jet Bubble Column</i>	15
2.5.1 Menghitung <i>hold-up</i> fasa gas	19
2.6 Adsorpsi Dengan Karbon Aktif	20
3. METODE PENELITIAN	22
3.1 Diagram Alir Penelitian	22
3.2 Persiapan Peralatan	23
3.3 Komponen Peralatan	24
3.4 Spesifikasi Bahan	28
3.5 Persiapan Uji Operasi	28
3.5.1 Kalibrasi manometer CCl_4	28
3.5.2 Kalibrasi regulator CO_2	29
3.5.3 Uji aliran dan kebocoran pipa, <i>valve</i> dan kolom	29
3.5.4 Uji kerja pompa	29
3.6 Uji Operasi	30
3.6.1 Pengukuran sudut dan kedalaman <i>nozzle</i>	31
3.6.2 Uji hidrodinamika	32
3.6.3 Uji absorpsi CO_2	33
3.6.4 Uji kemampuan adsorpsi dan absorpsi CO_2	33
3.6.5 Penentuan konstanta laju reaksi absorpsi CO_2	34

3.6.6 Analisa sampel gas dengan <i>Gas Chromatography</i>	35
3.6.7 Analisa sampel absorben dengan metode titrasi	37
3.7 Pengolahan Data	37
3.7.1 Perhitungan <i>hold-up</i> fasa gas	37
3.7.2 Perhitungan konsentrasi CO ₂	37
3.7.3 Perhitungan distribusi gelembung	38
3.7.4 Perhitungan konstanta laju reaksi absorpsi CO ₂	39
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Pemilihan Konfigurasi Terbaik	41
4.2 Uji Absorpsi CO ₂ Terhadap Konfigurasi Terpilih	44
4.3 Uji Kemampuan Adsorpsi dan Absorpsi gas CO ₂	47
4.4 Pengukuran Distribusi Gelembung	50
4.5 Penentuan Konstanta Laju Reaksi Uji Absorpsi gas CO ₂	51
5. KESIMPULAN	54
DAFTAR REFERENSI	55
LAMPIRAN	57



DAFTAR GAMBAR

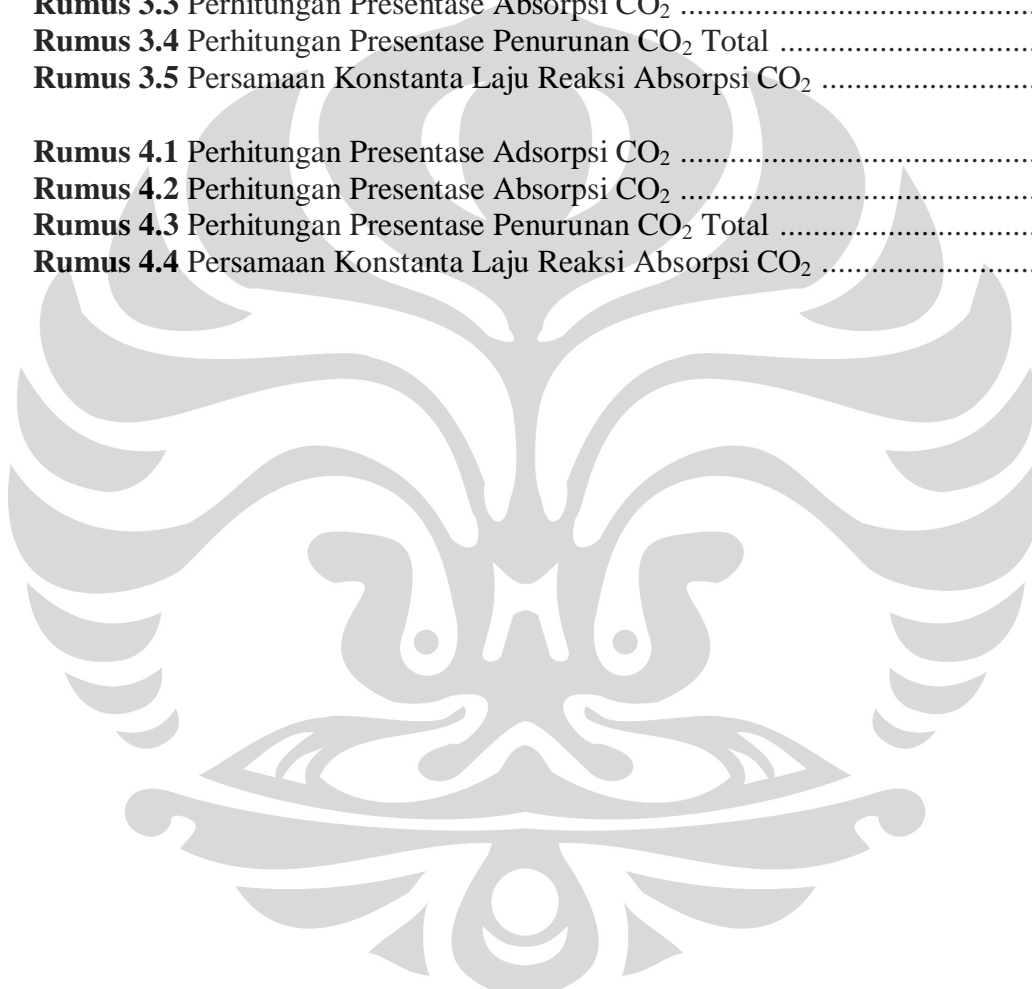
Gambar 2.1 Jenis-Jenis Kontaktor Gas-Cair (Lee dan Tsui, 1998)	6
Gambar 2.2 Jenis-Jenis Kolom Gelembung (Lee dan Tsui, 1998)	8
Gambar 2.3 Definisi Daerah Hidrodinamik di Dalam Daerah <i>Downcomer</i> Pada Alat Kolom Gelembung Pancaran (Evans, 1990)	9
Gambar 2.4 Desain <i>Nozzle</i>	11
Gambar 2.5 Perluasan <i>Submerged Liquid Jet</i>	11
Gambar 2.6 Hubungan Kecepatan Cairan Terhadap Laju <i>Gas Entrainment</i> (Rabindran, 2001).....	16
Gambar 2.7 Hubungan Laju Alir Volumetrik Cairan Terhadap <i>Hold-Up</i> Fasa Gas (Lee dan Tsui, 1998).....	17
Gambar 2.8 Pengaruh Luas Area Spesifik Terhadap Kecepatan Gas (a) dan Kecepatan Cairan (b) (Kundu <i>et al.</i> , 2003)	19
Gambar 2.9 Grafik Kalkulasi <i>Hold-Up</i> Fasa Gas Terhadap <i>Gas Entrainment Rate</i> Yang Telah Dinormalisasikan (Liu dan Evans, 1998)	20
Gambar 2.10 Struktur Karbon Aktif (Figuredo dan Mouljin, 1986)	21
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	22
Gambar 3.2 Skema Rangkaian Peralatan Kolom Gelembung Pancaran	24
Gambar 3.3 Kepala <i>Nozzle</i>	24
Gambar 3.4 Pompa	25
Gambar 3.5 <i>Valve</i>	26
Gambar 3.6 Meteran Air.....	26
Gambar 3.7 <i>Pressure Indicator</i>	27
Gambar 3.8 Manometer CCl_4	28
Gambar 3.9 Berbagai Sketsa Kedalaman <i>Nozzle</i> Tercelup Yang Dilakukan Pada Penelitian	30
Gambar 3.10 Berbagai Sketsa Sudut <i>Nozzle</i> Yang Dilakukan Pada Penelitian... 31	
Gambar 3.11 Prosedur Pengukuran Sudut dan Kedalaman <i>Nozzle</i> Terecelup 32	
Gambar 3.12 Skema Aliran Sirkulasi Gas CO_2	34
Gambar 3.13 Peralatan GC – TCD.....	37
Gambar 4.1 Prosedur Pengukuran Sudut dan Kedalaman <i>Nozzle</i> Tercelup	41
Gambar 4.2 Sepuluh Konfigurasi Terbaik dan Terburuk Berdasarkan Parameter <i>Gas Entrainment</i> dan <i>Hold-Up</i> Fasa Gas	42
Gambar 4.3 Tiga Konfigurasi Terbaik Sebelum Operasi (a-c) dan Saat Operasi (a'-c')	46
Gambar 4.4 Skema Rangkaian Peralatan Untuk Uji Kemampuan Adsorpsi dan Absorpsi Gas CO_2	47
Gambar 4.5 Grafik Penurunan Konsentrasi CO_2 Pada Proses Adsorpsi dan Absorpsi Dengan Naoh 1% Pada Konfigurasi ke-71	49
Gambar 4.6 Hubungan Rentang Diameter Gelembung Dengan % Distribusi Gelembung Pada Tiga Konfigurasi Terbaik dan Terburuk.....	50
Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Laju Reaksi Absorpsi Hasil Eksperimen dan Kalkulasi	52

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Properti Dari Berbagai Kontaktor Gas-Cair (Lee dan Tsui, 1998)	6
Tabel 2.2 Berbagai Nilai Sudut <i>Jet</i> Pada <i>Submerged Jet</i>	12
Tabel 2.3 Pengaruh Rasio Alir Gas/Cair Pada Perhitungan Sudut <i>Jet</i> ($D_c = 74$ mm; $D_j = 4,76$ mm; $v_j = 11,5$ m/s; $\rho_L = 1000$ kg/m ³ ; $\sigma = 0,063$ N/m dan $\mu_L = 0,0009$ Pa-s)	13
Tabel 2.4 Pengaruh Diameter Kolom Pada Sudut <i>Submerged Jet</i> ($Q_G/Q_L =$ 0,127; $D_j = 4,76$ mm; $v_j = 11,5$ m/s; $\rho_L = 1000$ kg/m ³ ; $\sigma = 0,063$ N/m dan $\mu_L = 0,0009$ Pa-s)	13
Tabel 2.5 Pengaruh Densitas Cairan dan Viskositas Absolut Pada Sudut <i>Submerged Jet</i> ($D_c = 44$ mm; $D_j = 4,76$ mm; $v_j = 11,5$ m/s dan $\sigma =$ 0,063 N/m)	14
Tabel 2.6 Pengaruh Diameter <i>Jet</i> Pada Sudut <i>Jet</i> Untuk $D_c = 44$ dan 74 mm (<i>no</i> <i>baffle</i> ; $v_j = 11,5$ m/s; $\rho_L = 1000$ kg/m ³ ; $\sigma = 0,063$ N/m dan $\mu_L =$ 0,0009 Pa-s)	14
Tabel 2.7 Pengaruh Tegangan Permukaan Pada Sudut <i>Jet</i> Untuk Diameter <i>Jet</i> 4,76 dan 7,12 mm ($D_c = 44$ mm; $v_j = 11,5$ m/s; <i>no baffles</i> ; $\rho_L = 1000$ kg/m ³ dan $\mu_L = 0,0009$ Pa-s)	15
Tabel 2.8 Pengaruh Kecepatan <i>Jet</i> Pada Sudut <i>Submerged Jet</i> ($D_c = 74$ mm; D_j $= 4,76$ mm; $\rho_L = 1000$ kg/m ³ ; $\sigma = 0,063$ N/m dan $\mu_L = 0,0009$ Pa-s)	15
Tabel 2.9 Pengaruh Diameter Pancaran Terhadap Diameter Gelembung di Daerah <i>Mixing</i> ($\rho_L = 1000$ kg/m ³ ; $\mu_L = 0,0009$ Pa-s; $\sigma = 0,063$ N/m dan $V_j = 11,5$ m/s) (Evans, 1990).....	18
Tabel 2.10 Perbandingan Antara Adsorpsi Fisika Dan Adsorpsi Kimia (Slamet <i>et al.</i> , 2007)	21
Tabel 4.1 Sepuluh Konfigurasi Terbaik dan Terburuk Hasil Uji Hidrodinamika	43
Tabel 4.2 Tiga Konfigurasi Terbaik dan Terburuk Berdasarkan Uji Absorpsi CO ₂	44
Tabel 4.3 Kemampuan Adsorpsi dan Absorpsi CO ₂ Sesuai Konfigurasi <i>Liquid</i> <i>Jet Flow</i>	48
Tabel 4.4 Data-Data Untuk Perhitungan Konstanta Laju Reaksi Absorpsi	51
Tabel 4.5 Perbandingan Konstanta Laju Reaksi Absorpsi Pada Konfigurasi Terbaik (71) dan Terburuk (52)	52

DAFTAR RUMUS

Rumus 2.1 Perhitungan Sudut <i>Jet</i> Dari Panjang Zona Pencampuran, L_{MZ} dan Jari-Jari Kolom, R_C (Evans, 1990)	12
Rumus 2.2 Perhitungan <i>Hold-Up</i> Fasa Gas (Liu dan Evans, 1998)	19
Rumus 3.1 Perhitungan <i>Hold-Up</i> Fasa Gas (Liu dan Evans, 1998)	37
Rumus 3.2 Perhitungan Presentase Adsorpsi CO_2	38
Rumus 3.3 Perhitungan Presentase Absorpsi CO_2	38
Rumus 3.4 Perhitungan Presentase Penurunan CO_2 Total	38
Rumus 3.5 Persamaan Konstanta Laju Reaksi Absorpsi CO_2	39
Rumus 4.1 Perhitungan Presentase Adsorpsi CO_2	48
Rumus 4.2 Perhitungan Presentase Absorpsi CO_2	48
Rumus 4.3 Perhitungan Presentase Penurunan CO_2 Total	48
Rumus 4.4 Persamaan Konstanta Laju Reaksi Absorpsi CO_2	51



DAFTAR NOTASI

- a = Luas interfisial spesifik per volume (m^2/m^3)
 k = Konstanta laju reaksi total
 k_L = Koefisien transfer massa
 m = Orde reaksi terhadap NaOH
 n = Orde reaksi terhadap CO_2
 v_j = Kecepatan *jet* (m/s)
 D_c = Diameter kolom (cm)
 D_j = Diameter *jet* efektif (mm)
 L_{MZ} = Panjang zona pencampuran (cm)
 R_c = Jari-jari kolom (cm)
 Q_G = Laju alir volumetrik gas (L/min)
 Q_L = Laju alir volumetrik cairan (L/min)
 V_R = Volume alat kontak (m^3)
 β = Sudut *jet* (derajat)
 ε_g = *Hold-up* fasa gas
 ε_v = Energi yang hilang per satuan volume (kW/m^3)
 ρ_L = Densitas larutan (kg/m^3)
 σ = Tegangan permukaan (N/m)
 μ_L = Viskositas cairan (Pa-s)
 Δh = Perbedaan ketinggian cairan dalam manometer CCl_4 (cm)

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Uji Hidrodinamika	57
Lampiran 2. Sepuluh Konfigurasi Terbaik Hasil Uji Hidrodinamika	61
Lampiran 3. Sepuluh Konfigurasi Terburuk Hasil Uji Hidrodinamika	63
Lampiran 4. Hasil Analisa Sampel Gas Dengan Alat GC-TCD	65



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Pemanasan global sudah menjadi isu strategis internasional. Gejala ini muncul sebagai bentuk ketidakmampuan alam untuk menerima perlakuan manusia yang semena-mena. Temperatur rata-rata bumi meningkat $0,3^{\circ}\text{C}$ sejak 1990 dan terjadi sepanjang musim selama satu tahun. Tinggi permukaan laut rata-rata di Teluk Jakarta naik $0,57$ cm per tahun. Kedalaman rata-rata daerah yang tenggelam bervariasi antara $0,28$ hingga $4,17$ cm. Diperkirakan sekitar 2000 pulau kecil di wilayah perairan Indonesia akan tenggelam. Itulah beberapa potret efek pemanasan global yang kian kentara (Harsanto, 2003).

Semakin besarnya emisi CO_2 akibat pemakaian bahan bakar fosil untuk kegiatan perindustrian maupun transportasi memicu lubang ozon membesar dan berakibat mengerikan. Kepanikan dunia dapat dilihat dari berbagai upaya guna merembug solusi dari efek *global warming*. Diantaranya konferensi internasional tentang lingkungan hidup di Stockholm, Swedia 1972. KTT bumi yang diadakan PBB pada 1992 di Rio de Janeiro. Rapat tahunan COP III di Kyoto 1997 yang menghasilkan Protokol Kyoto. Pada 4-16 Desember 2007 diadakan konferensi perubahan iklim dan Indonesia didaulat sebagai tuan rumah (Sulastrri, 2008).

Efek *global warming* akan semakin terasa pada negara berkembang apalagi yang terletak di khatulistiwa seperti Indonesia. Negara berkembang juga tidak memiliki kemampuan baik secara ekonomi maupun teknologi sehingga sangat rentan terhadap perubahan iklim dan kemampuan adaptasinya rendah.

Untuk mencegah semakin meluasnya efek *global warming* tersebut maka emisi gas CO_2 harus dikurangi. Salah satu cara untuk mengurangi emisi gas CO_2 adalah dengan proses absorpsi dimana gas dikontakkan dengan cairan yang mampu melarutkan gas tersebut. Kolom gelembung pancaran (*jet bubble column*) merupakan salah satu alat kontak antara fasa gas dan cair yang berfungsi sebagai media perpindahan massa fasa gas ke dalam fasa cair. Di industri-industri seperti industri kimia dan petrokimia, kolom gelembung pancaran telah meluas

digunakan dan difungsikan sebagai reaktor kimia. Kolom gelembung pancaran juga penting dalam bidang proses aerasi natural, pengolahan mineral, pengolahan air limbah, proses fermentasi dan flotasi serta sistem industri, termasuk di dalamnya pabrik kimia (Rabindran, 2001).

Prinsip kerja alat ini cukup sederhana yaitu fasa gas akan terhisap melalui lubang cairan stagnan berbentuk terompet yang diakibatkan oleh tumbukan *liquid jet*. Tumbukan tersebut akan mengakibatkan pecahnya lapisan film cairan sehingga gas akan terperangkap dalam cairan dalam bentuk gelembung gas. Laju gas yang terhisap ini dipengaruhi oleh kedalaman penetrasi gelembung dari pancaran jatuh cairan. Kedalaman penetrasi gelembung memiliki korelasi terhadap efek geometri *nozzle* (Ito, 2000).

Keuntungan kolom gelembung pancaran diantaranya adalah sederhana dalam perancangan, mudah dalam pengoperasian dan pemeliharaan alatnya, volume reaktor yang dibutuhkan kecil, ukuran diameter gelembung yang terdispersi ke dalam cairan kecil, luas area spesifik antarfasa yang besar serta dapat memperoleh koefisien perpindahan massa yang sangat besar dibanding kolom gelembung konvensional lainnya (Ide *et al.*, 2001). Selain itu, pencampuran yang terjadi antara fasa gas - cair diperoleh sendiri dari gerakan tumbukan cairan yang menumbuk cairan stagnan di dalam kolom dan mengakibatkan terbentuknya lubang seperti terompet serta gas akan terhisap dan terperangkap di antara celah lubang tersebut. Tumbukan tersebut juga akan membentuk pusaran eddy sehingga tidak diperlukan lagi alat pengaduk (Liu dan Evans, 1998).

Dibandingkan dengan alat kontak gas – cair lain berbentuk tubular/venturi, kolom gelembung pancaran memiliki nilai koefisien perpindahan massa yang tinggi namun perbedaan di antara keduanya tidak terlalu signifikan. Namun dari segi energi yang hilang per satuan volume, kolom gelembung pancaran memiliki keunggulan yang cukup signifikan dibanding venturi (Lee dan Tsui, 1998). Ditambah lagi, jika dibandingkan dengan reaktor *packed column* dan *sieve tray*, pada kolom gelembung cairan tidak terdapat masalah dalam hal penurunan tekanan, persen *flooding*, *foaming*, *loading* maupun *channeling*.

Ito, dkk pada tahun 2000 melakukan penelitian tentang pengaruh sudut kontraksi *nozzle* tapi terbatas hanya pada sudut antara 15-90 derajat dan dengan posisi *nozzle* di atas permukaan cairan. Sedangkan pada penelitian ini akan dilakukan pengamatan tentang pengaruh konfigurasi *liquid jet flow* terhadap kemampuan adsorpsi dan absorpsi gas CO₂. Yang dimaksudkan dengan konfigurasi disini adalah variasi sudut dan kedalaman *nozzle* tercelup. *Nozzle* diposisikan tidak tercelup dan tercelup dengan berbagai kedalaman dan variasi sudut *nozzle* pada rentang yang lebih besar lagi. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan konfigurasi dengan populasi gelembung yang ideal yaitu gelembung dengan diameter yang sekecil-kecilnya dan kuantitas sebanyak-banyaknya untuk kemampuan penyerapan CO₂ yang lebih optimal.

Kemampuan absorpsi CO₂ akan ditentukan oleh jumlah gas yang terhisap (*gas entrainment* = Q), *hold-up* fasa gas (ε_g) dan distribusi (kuantitas dan diameter) gelembung. Penelitian ini akan mengukur parameter-parameter output (*dependent*) tersebut dalam berbagai kondisi konfigurasi *jet flow*.

1.2 Rumusan Masalah

Dari masalah yang diuraikan dalam latar belakang maka rumusan masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah:

- Berapa besar pengaruh dari konfigurasi arah *liquid jet flow* terhadap sistem kontak antara fasa gas dan cair terutama terhadap pusaran eddy yang akan terbentuk dari masing-masing konfigurasi?
- Bagaimana kemampuan absorpsi dan adsorpsi dari karbon aktif terhadap gas CO₂?
- Bagaimana laju reaksi absorpsi CO₂ untuk konfigurasi terbaik?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- Memperoleh konfigurasi arah *liquid jet flow* dalam sistem kontak antara fasa gas dan cair (*hold-up* fasa gas dan *gas entrainment*) yang optimal
- Memperoleh kemampuan adsorpsi dan absorpsi CO₂ yang optimal
- Menentukan konstanta laju reaksi absorpsi untuk konfigurasi terbaik

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan batasan-batasan sebagai berikut:

- Fasa gas adalah CO₂ dan udara
- Fasa cair adalah larutan (NaOH + indikator PP) dan air tanah di DTK-FTUI
- Fasa padat adalah karbon aktif

1.5 Kegunaan Penelitian

Kegunaan dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Memberikan kontribusi terhadap sistem kontak antara fasa gas dengan fasa cair yang lebih inovatif untuk mengurangi segala permasalahan yang umumnya timbul pada sistem kontak gas-cair konvensional seperti *flooding, channeling, foaming, loading* dan penurunan tekanan
- Memberikan alternatif terhadap metode CCS (*Carbon Capture and Storage*) dengan metode absorpsi CO₂
- Menjadi pertimbangan dasar dalam mendesain alat untuk kebutuhan praktis seperti untuk mengurangi emisi gas CO₂ dan pemurnian udara akibat pembakaran asap rokok maupun asap buangan dapur (rumah tangga)

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

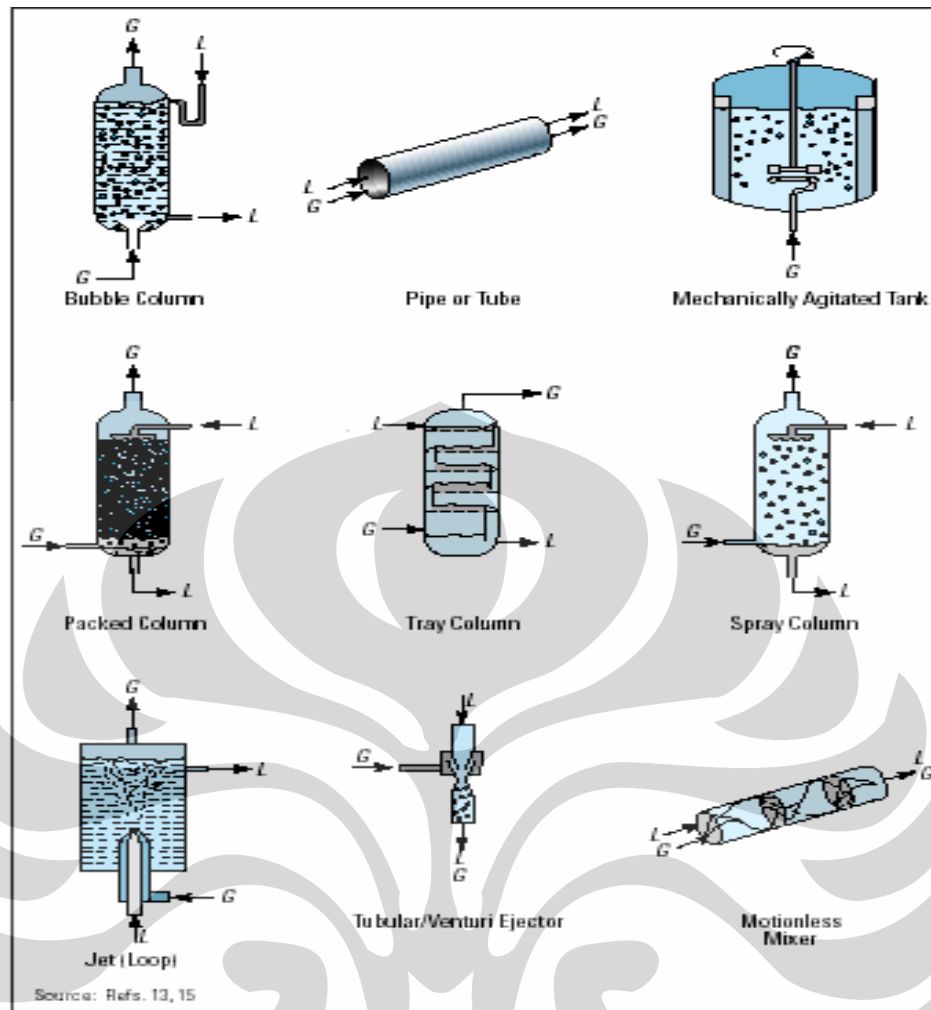
2.1 Absorpsi Gas – Cair Dengan Reaktor *Jet*

Peristiwa absorpsi adalah salah satu peristiwa perpindahan massa yang besar peranannya dalam proses industri. Peristiwa absorpsi ini dikontrol oleh laju difusi dan kontak antara dua fasa. Absorpsi dapat terjadi secara fisika maupun kimia. Tujuan dari operasi ini adalah memisahkan satu atau lebih komponen melalui pelarutan dari campuran gas ke dalam cairan yang sesuai (Bergeyk dan Liederken, 1981).

Secara umum proses absorpsi dilakukan menggunakan kontaktor gas-cair. Perpindahan massa kontaktor gas-cair diperoleh dengan kontak langsung dan dispersi satu fasa ke fasa yang lainnya. Kontaktor industri diklasifikasikan ke dalam tiga kategori tergantung pada fasa terdispersinya yaitu (Noverri, 2008):

- Kontaktor dimana cairan mengalir sebagai film tipis (contoh: *packed column, disc contactors*, dll)
- Kontaktor dimana gas didispersikan ke dalam fasa cairan (contoh: *plate column, bubble column, mechanically agitated contactors*, dll)
- Kontaktor dimana cairan didispersikan ke dalam fasa gas (contoh: *spray column, venturi scrubbers*, dll)

Berbagai jenis kontaktor gas-cair dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Jenis-Jenis Kontaktor Gas-Cair (Lee dan Tsui, 1998)

Tabel 2.1 Properti Dari Berbagai Kontaktor Gas-Cair (Lee dan Tsui, 1998)

Contactors	$k_L a^*$ 1/s	a , m^2/m^3	ϵ_G	V_A , m^3	ϵ_D , kW/m^3	Backmixing Liquid Flow	Backmixing Gas Flow
Bubble column excluding jet (loop)	0.005-0.01	~20	<0.2	0.002-300	0.01-1	CSTR-PFR	CSTR-PFR
Spray column	0.0007-0.015†	10-100†	>0.8	—	—	CSTR‡	CSTR‡
Packed column, countercurrent	0.005-0.02	~200	>0.95	0.005-300	0.01-0.2	PFR	PFR
Plate column	0.01-0.05	100-400†	>0.8	0.005-300	0.01-0.2	CSTR-PFR	CSTR-PFR
Pipe/tube	0.01-0.7**	50-2,000†	0.05-0.95	—	0.1-100**	PFR	PFR
Mechanically agitated tank	0.02-0.2	~200	<0.1	0.002-100	0.5-4	CSTR	Intermediate-PFR
Jet (loop)	0.01-2.2	200-2,000	<0.5	0.02-100	0.8-90	CSTR- Intermediate	CSTR- Intermediate
Tubular/venturi ejector and motionless mixer	0.1-3	1,000-7,000	-0.5††	<10	10-700	PFR	PFR

Modified from Ref. 13.

* Typical for O₂ (air)/water unless noted otherwise.

** For typical pipes/tubes of diameter on the order of an inch. For the monolith of diameter on the order of mm, $k_L a$ can be as high as 3/s-1, and ϵ_D as high as 1,000 kW/m³.

† Taken from Ref. 16, including values for G/L pairs other than O₂/water.

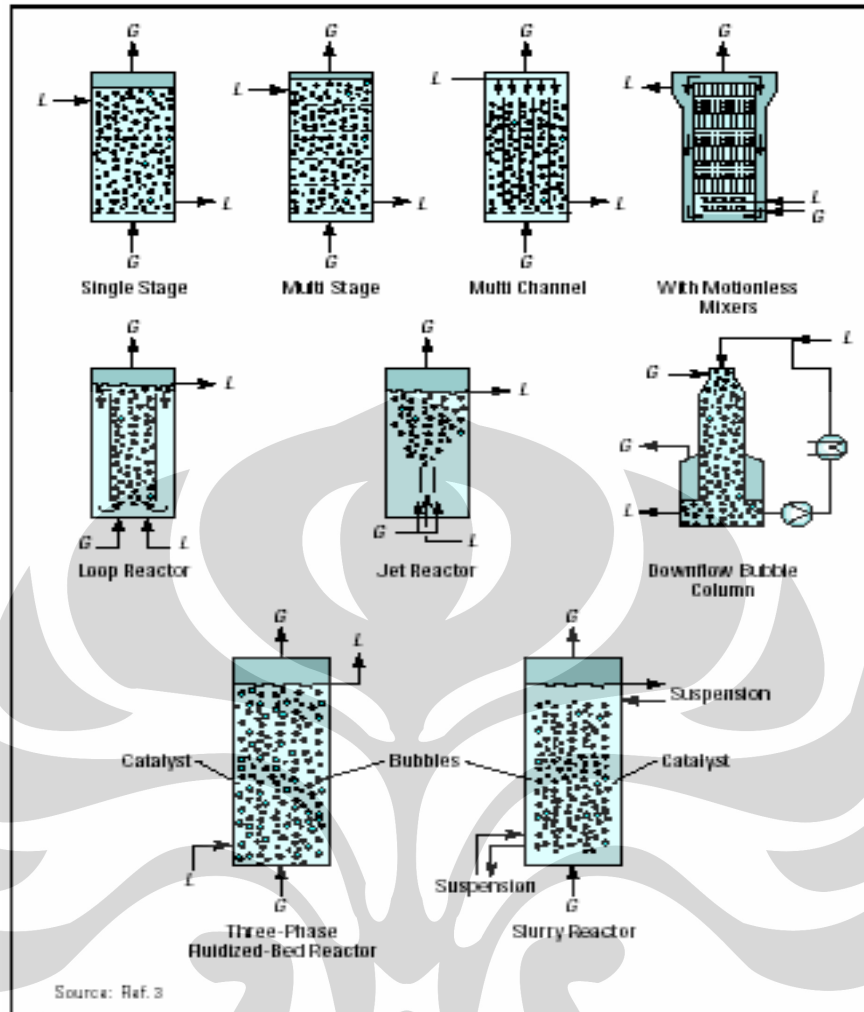
†† Calculated as the ratio of the gas-flow rate to the sum of the gas and liquid flow rates, which may not be a valid assumption.

‡ Because a spray column is considered to have only one or, at most, two equilibrium stages (16,20).

Dari berbagai jenis peralatan kontak seperti terlihat pada tabel 2.1, reaktor *jet* memberikan luasan kontak yang cukup tinggi ($200\sim 2000\text{ m}^2/\text{m}^3$) dibanding kolom gelembung tanpa pancaran ($\sim 20\text{ m}^2/\text{m}^3$), *spray column* ($10\sim 100+\text{ m}^2/\text{m}^3$), *packed column* ($\sim 200\text{ m}^2/\text{m}^3$) maupun tangki berpengaduk mekanik ($\sim 200\text{ m}^2/\text{m}^3$). Dari segi koefisien perpindahan massa, reaktor *jet* bernilai $0,01\sim 2,2\text{ s}^{-1}$ dibanding kolom gelembung tanpa pancaran ($0,005\sim 0,01\text{ s}^{-1}$), *spray column* ($0,0007\sim 0,015+\text{ s}^{-1}$) dan *packed column* ($0,005\sim 0,02\text{ s}^{-1}$). Terlihat dari aspek hidrodinamika dan perilaku perpindahan massanya, penggunaan reaktor *jet* lebih efektif sebagai tempat berlangsungnya reaksi antara fasa gas dan cair (Meikap *et al.*, 2001).

2.2 Jet Bubble Column

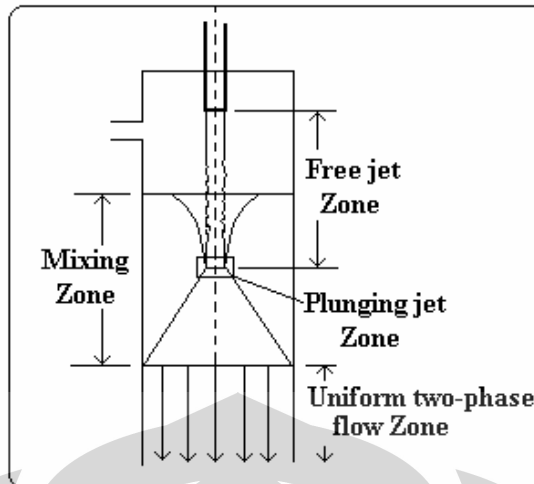
Terdapat berbagai jenis *jet bubble column* seperti terlihat pada gambar 2.2. Reaktor *jet (loop)* ini merupakan tipe khusus dari kolom gelembung dimana pancaran cairan atau campuran gas dan cair diinjeksikan ke dalam kolom dengan kecepatan tinggi. Pencampuran dalam kolom seluruhnya diakibatkan oleh *jet* tersebut (Lee dan Tsui, 1998). Pada gambar 2.2 dapat dilihat tipe-tipe lain dari *jet bubble column*.



Gambar 2.2 Jenis-Jenis Kolom Gelembung (Lee dan Tsui, 1998)

Cara kerja alat ini cukup sederhana yaitu fasa gas akan terhisap melalui lubang cairan stagnan berbentuk terompet yang diakibatkan oleh tumbukan *liquid jet* berkecepatan tinggi. Tumbukan tersebut akan mengakibatkan pecahnya lapisan film cairan sehingga gas akan terperangkap dalam cairan dalam bentuk gelembung gas (Evans, 1990).

Laju gas yang terhisap dipengaruhi oleh kedalaman penetrasi gelembung dari pancaran jatuh cairan. Kedalaman penetrasi gelembung memiliki korelasi terhadap efek geometri *nozzle* (Ito, 2000).



Gambar 2.3 Definisi Daerah Hidrodinamik di Dalam Daerah *Downcomer* Pada Alat Kolom Gelembung Pancaran (Evans, 1990)

Terdapat tiga daerah hidrodinamika pada *jet bubble column* seperti terlihat pada gambar 2.3 yaitu daerah pancaran bebas (*free jet zone*), daerah pancaran jatuh (*plunging jet zone*) dan daerah aliran dua fasa yang seragam (*uniform two-phase flow jet*). Lubang cairan yang berbentuk seperti terompet terjadi di daerah pancaran bebas dan daerah pancaran jatuh yang mengakibatkan gas akan terhisap ke dalam kolom gelembung. Pada kedua daerah tersebut akan terjadi pusaran eddy (*eddy current*). Sedangkan pada daerah aliran dua fasa yang seragam, fasa gas akan terdispersi merata ke dalam fasa cair (Evans, 1990).

Keuntungan *jet bubble column* diantaranya adalah sederhana dalam desain/konstruksi, mudah dalam pengoperasian dan pemeliharaan alat serta modal awal dan biaya operasi yang cukup rendah. Pencampuran yang terjadi antara gas dan cairan diperoleh sendiri dari pusaran eddy yang berasal dari tekanan pancaran cairan bertumbukan dengan cairan stagnan serta dinding pada kolom *downcomer* sehingga tidak diperlukan lagi alat pengaduk dan alat untuk mengalirkan gas (kompresor).

2.3 Pusaran Eddy

Berdasarkan sifat alirannya, pada umumnya terdapat tiga jenis aliran fluida yaitu laminar, transisi dan turbulen. Pada aliran laminar, fluida mengalir tenang tanpa diiringi oleh pusaran (vortek) meskipun terdapat gangguan di

sepanjang aliran fluida. Sebaliknya pada aliran turbulen, aliran fluida bersifat *chaos* (terlihat tak beraturan) yang dicirikan dengan keberadaan pusaran-pusaran fluida. Kondisi transisi merupakan daerah peralihan antara laminar dan turbulen dan merupakan wilayah aliran yang tidak stabil sehingga sering digambarkan sebagai garis putus-putus dalam diagram alir fluida.

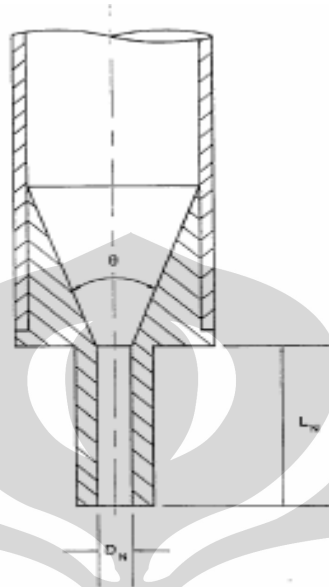
Pusaran-pusaran dalam aliran turbulen dikenal dengan sebutan eddy. Pusaran eddy ini memiliki ukuran yang bervariasi, dari orde kilometer (contoh: pada pergerakan atmosfer atau debu antar-galaksi) hingga yang berorde mikron (contoh: pada aliran turbulen dalam pipa). Keberadaan eddy tentu saja mengkonsumsi energi aliran; pada skala makro hal tersebut dicirikan dengan tingginya koefisien gesek pada aliran turbulen (dibandingkan dengan aliran laminar pada bilangan Reynolds yang sama). Tingginya koefisien gesek berpengaruh secara langsung kepada besarnya penurunan tekanan dan pada akhirnya kepada besarnya energi yang diperlukan untuk mengalirkan fluida.

Dalam beberapa hal, aliran turbulen diharapkan terjadi, misalnya pada proses pencampuran (*mixing*). Pencampuran bahan bakar dan udara di dalam silinder motor bakar, pencampuran zat pewarna dalam suatu larutan dan sebagainya akan sangat diuntungkan bila aliran bersifat turbulen. Karena komponen kecepatan arah normal pada aliran turbulen juga cukup besar, maka perpindahan panas pada jenis aliran ini juga sangat tinggi. Di sisi lain, untuk keperluan transportasi fluida, aliran turbulen tidak diharapkan karena berkorelasi dengan tingginya energi pengaliran (Indartono, 2008). Pada *jet bubble column* sendiri, pusaran eddy terbentuk akibat cairan yang dipancarkan oleh *nozzle* dengan kecepatan tinggi ke dalam kolom absorpsi sehingga mengakibatkan aliran dalam kolom absorpsi menjadi turbulen.

2.4 Sudut Jet Bubble Column

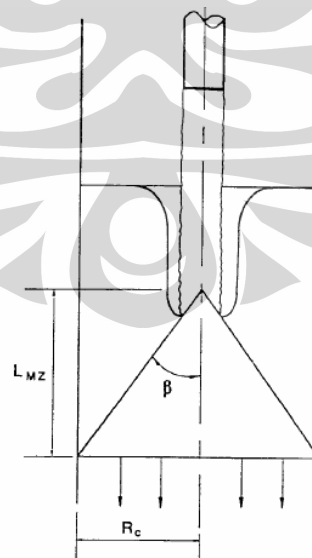
Pada kolom gelembung, *liquid jet* dialirkan dengan kecepatan tertentu melalui *nozzle*. Pada gambar 2.4 dapat dilihat desain suatu *jet nozzle*. *Nozzle* tersebut berada pada bagian atas kolom sehingga aliran cairan diarahkan ke arah vertikal kolom dan dijatuhkan ke dalam kolom. Aliran melewati *nozzle* dapat dirubah dengan mengatur pompa atau *control valve*. Pompa mono digunakan

karena memberikan laju alir yang konstan walaupun tekanan operasi yang digunakan sangat bervariasi tanpa menyebabkan panas yang berlebihan dari cairan. Temperatur cairan konstan selama berlangsungnya operasi (Evans, 1990).



Gambar 2.4 Desain *Nozzle*

Saat *liquid jet* jatuh ke cairan dalam kolom vertikal maka akan menghasilkan *submerged jet* yang meluas untuk menutupi seluruh *cross-sectional area* pada kolom seperti pada gambar 2.5, dimana β merupakan sudut *jet*.



Gambar 2.5 Perluasan *Submerged Liquid Jet*

Pada tabel 2.2 dapat dilihat berbagai sudut *jet* yang dihasilkan dari berbagai penelitian. Hasil ini menunjukkan bahwa penentuan sudut *jet* dipengaruhi secara signifikan oleh kondisi eksperimen. Kecuali studi Lane dan Rice (1982), semua studi lainnya dilakukan pada *unconfined jet*.

Tabel 2.2 Berbagai Nilai Sudut *Jet* Pada *Submerged Jet*

Penulis	Sudut <i>jet</i> (derajat)	Catatan
Binnie (1942)	14	
Moss (1947)	15	
Folsom (1948)	20	
Donald dan Singer (1959)	14	
Sucui dan Smigelschi (1976)	14	Sudut <i>jet</i> ditentukan dengan kerucut dimana terdapat daerah <i>submerged biphasic</i> yang dibuat oleh <i>plunging liquid jet</i> pada <i>unconfined liquid</i>
Unno dan Inoue (1980)	24 – 29	<i>Submerged liquid jet</i> muncul dari <i>orifice</i> dan lewat atas menuju diameter kolom 150 mm
Lane dan Rice (1982)	22 - 25	Sirkulasi <i>submerged jet</i> dalam sistem tertutup

Persamaan yang digunakan untuk menghitung sudut *jet* dari panjang zona pencampuran, L_{MZ} dan jari-jari kolom, R_C adalah:

$$\tan\beta = \frac{R_C}{L_{MZ}} \quad (2.1)$$

Berikut adalah hasil penelitian yang dilakukan oleh G. M. Evans pada tahun 1990 terhadap sejumlah variabel yang mempengaruhi sudut *jet*:

- **Pengaruh rasio aliran gas/cair**

Sudut *jet* berkurang dengan berkurangnya densitas campuran di dalam pusaran eddy seperti dapat terlihat pada tabel 2.3. Kecenderungan ini diakibatkan

oleh berkurangnya disipasi radial momentum *jet* karena kenaikan perbedaan densitas antara cairan dalam *submerged jet* dan pusaran eddy.

Tabel 2.3 Pengaruh Rasio Alir Gas/Cair Pada Perhitungan Sudut *Jet* ($D_c = 74$ mm; $D_j = 4,76$ mm; $v_j = 11,5$ m/s; $\rho_L = 1000$ kg/m³; $\sigma = 0,063$ N/m dan $\mu_L = 0,0009$ Pa-s)

Rasio alir gas/cair	Panjang zona pencampuran (mm)	Perhitungan sudut <i>jet</i> (derajat)	Densitas campuran dua fasa (kg/m ³)
0	150	13,9	999
0,126	170	12,3	800
0,296	216	9,8	620
0,645	260	8,1	474

▪ Pengaruh diameter kolom

Sudut *jet* terkoreksi naik dengan naiknya diameter kolom seperti terlihat pada tabel 2.4. Pada kasus ini, cairan pada batas antara *submerged jet* dan pusaran eddy bergerak dengan kecepatan yang sama dan tidak ada momentum radial *jet* yang terdisipasi ke pusaran eddy. Hal ini mengakibatkan tidak adanya *submerged jet* yang meluas.

Tabel 2.4 Pengaruh Diameter Kolom Pada Sudut *Submerged Jet* ($Q_G/Q_L = 0,127$; $D_j = 4,76$ mm; $v_j = 11,5$ m/s; $\rho_L = 1000$ kg/m³; $\sigma = 0,063$ N/m dan $\mu_L = 0,0009$ Pa-s)

Diameter kolom (mm)	Panjang zona pencampuran (mm)	Densitas campuran (kg/m ³)	Sudut <i>jet</i> (derajat)		Laju resirkulasi maks.(m/s)
			Perhitungan	Terkoreksi	
44	148	847	8,5	10,0	1,488
74	170	800	12,3	15,4	0,970
95	157	759	16,8	22,1	0,776

▪ Pengaruh densitas cairan

Sudut *jet* naik dengan berkurangnya densitas cairan. Hal ini dapat dilihat dari tabel 2.5. Sudut *jet* berbanding terbalik dengan kuadrat densitas cairan. Donald dan Singer (1959) menemukan bahwa sudut merupakan fungsi dari viskositas absolut.

Tabel 2.5 Pengaruh Densitas Cairan dan Viskositas Absolut Pada Sudut *Submerged Jet* ($D_c = 44$ m; $D_j = 4,76$ mm; $v_j = 11,5$ m/s dan $\sigma = 0,063$ N/m)

Cairan		Panjang zona pencampuran (mm)	Densitas campuran (kg/m^3)	Sudut <i>jet</i> (derajat)	
Viskositas absolut (10^{-3} kg/ms)	Densitas (kg/m^3)			Perhitungan	Terkoreksi
0,871	1000	148	847	8,5	10,0
1,653	1064	198	929	6,4	7,3
2,854	1114	223	984	5,7	6,5

▪ **Pengaruh diameter *jet***

Sudut *jet* turun dengan naiknya diameter *jet*. Hal ini dapat dilihat pada tabel 2.6. Dari percobaan diketahui bahwa diameter *jet* mendekati nol pada sudut *jet* mendekati 90 derajat.

Tabel 2.6 Pengaruh Diameter *Jet* Pada Sudut *Jet* Untuk $D_c = 44$ dan 74 mm (*no baffle*; $v_j = 11,5$ m/s; $\rho_L = 1000$ kg/m^3 ; $\sigma = 0,063$ N/m dan $\mu_L = 0,0009$ Pa-s)

Diameter kolom (mm)	Diameter <i>jet</i> (mm)	Panjang zona pencampuran (mm)	Densitas campuran (kg/m^3)	Sudut <i>jet</i> (derajat)	
				Perhitungan	Terkoreksi
44	7,12	175	882	7,2	8,2
	4,76	148	847	8,5	10,0
	2,38	72	805	17,1	21,2
74	7,12	247	872	8,6	9,9
	4,76	170	800	12,3	15,4
	2,38	113	553	18,2	32,9

▪ **Pengaruh tegangan permukaan**

Merubah tegangan permukaan (σ) tidak memberikan efek yang signifikan pada densitas campuran dua fasa atau pun sudut *jet*. Hal ini dapat dilihat dari tabel 2.7.

Tabel 2.7 Pengaruh Tegangan Permukaan Pada Sudut *Jet* Untuk Diameter *Jet* 4,76 dan 7,12 mm
($D_c = 44$ mm; $v_j = 11,5$ m/s; *no baffles*; $\rho_L = 1000$ kg/m³ dan $\mu_L = 0,0009$ Pa-s)

Diameter <i>jet</i> (mm)	Tegangan permukaan (N/m)	Panjang zona pencampuran (mm)	Densitas campuran (kg/m ³)	Sudut <i>jet</i> (derajat)	
				Perhitungan	Terkoreksi
7,12	0,048	175	888	7,2	8,1
	0,052	170	890	7,4	8,3
	0,062	175	882	7,2	8,2
4,76	0,047	150	876	8,4	9,6
	0,053	148	874	8,5	9,7
	0,065	148	847	8,5	10,0

▪ **Pengaruh kecepatan *jet***

Dari hasil percobaan diketahui bahwa sudut *jet* turun dengan naiknya kecepatan *jet*. Hal ini dapat dilihat pada tabel 2.8.

Tabel 2.8 Pengaruh Kecepatan *Jet* Pada Sudut *Submerged Jet* ($D_c = 74$ mm; $D_j = 4,76$ mm; $\rho_L = 1000$ kg/m³; $\sigma = 0,063$ N/m dan $\mu_L = 0,0009$ Pa-s)

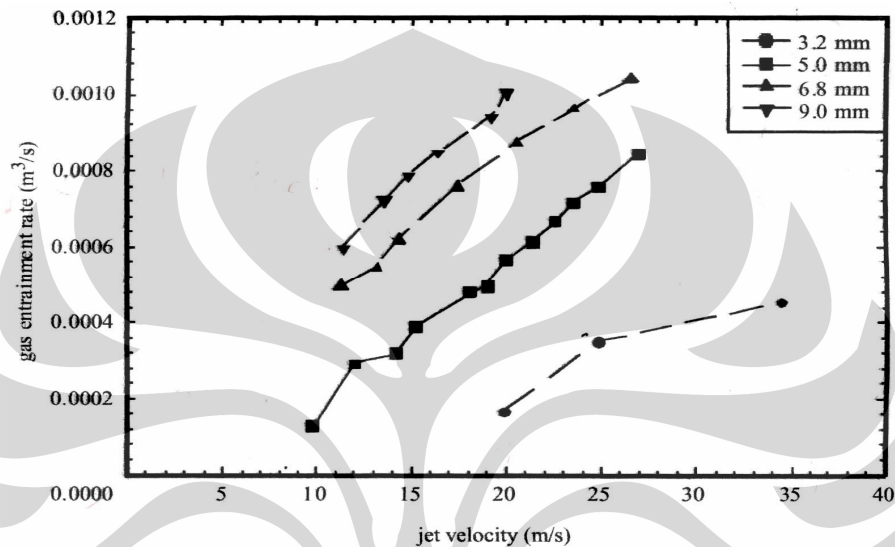
Kecepatan (m/s)		$\frac{(V_c)_{\max}}{V_j}$	Panjang zona pencampuran (mm)	Densitas campuran (kg/m ³)	Sudut <i>jet</i> (derajat)	
<i>Jet</i>	Eddy				Perhitungan	Terkoreksi
15,0	1,276	11,76	248	822	8,5	10,3
11,5	0,976	11,78	170	800	12,3	15,4
7,8	0,663	11,77	74	750	26,7	35,6

2.5 Studi Hidrodinamika Pada *Jet Bubble Column*

Studi hidrodinamika pada *jet bubble column* telah banyak dilakukan sebelumnya. Tujuannya antara lain untuk menentukan *gas entrainment*, *hold-up* fasa gas, ukuran diameter gelembung serta luas area spesifik antarfasa yang merupakan faktor penting dalam mendesain kolom gelembung pancaran (Havelka *et al.*, 2000).

a. Laju alir volumetrik gas

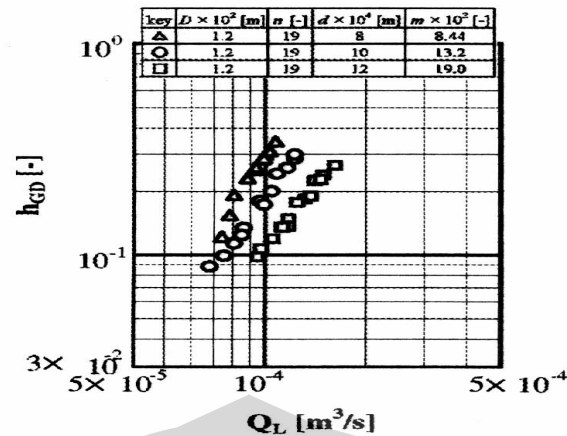
Dengan meningkatnya laju alir volumetrik cairan maka akan semakin meningkat pula laju alir volumetrik gas. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.6. Begitu juga dengan naiknya ukuran diameter *nozzle*. Hal ini diakibatkan energi momentum yang masuk ke dalam sistem semakin besar.



Gambar 2.6 Hubungan Kecepatan Cairan Terhadap Laju Gas Entrainment
(Rabindran, 2001)

b. *Hold-up* fasa gas

Meningkatnya laju alir volumetrik cairan akan semakin meningkatkan pula *hold-up* fasa gas. Yang dimaksud dengan *hold-up* fasa gas adalah fraksi fasa gas yang mengisi ruang-ruang di antara cairan dalam bentuk gelembung dan terjadi akibat tumbukan *liquid jet* terhadap cairan stagnan dalam kolom. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.7 dan diakibatkan oleh energi momentum yang menumbuk cairan di dalam kolom semakin besar sehingga kedalaman penetrasi semakin besar.



Gambar 2.7 Hubungan Laju Alir Volumetrik Cairan Terhadap *Hold-Up* Fasa Gas
(Lee dan Tsui, 1998)

c. Ukuran diameter gelembung

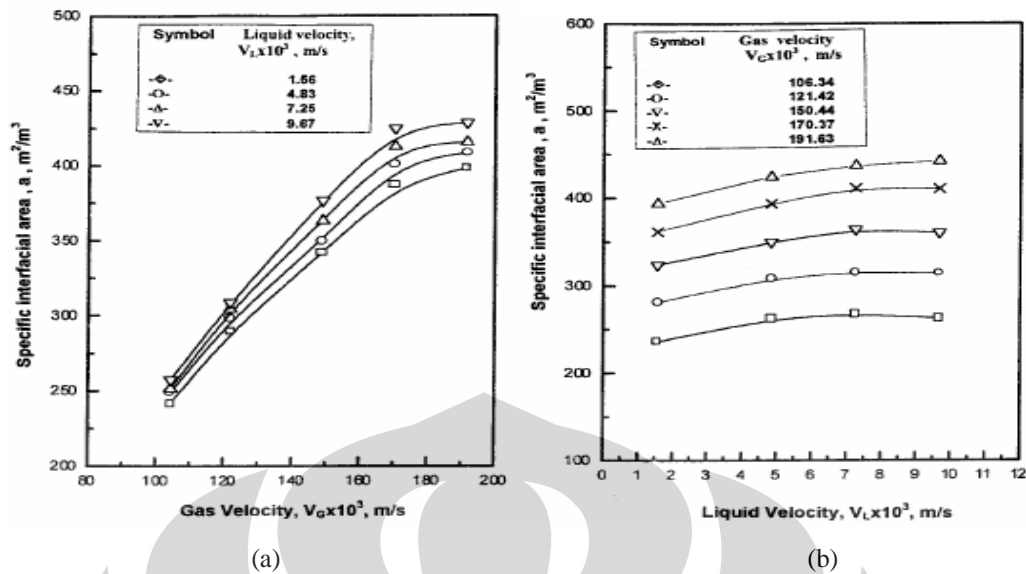
Ukuran diameter gelembung berkaitan dengan pusaran eddy yang dihasilkan pada daerah pencampuran sehingga menghasilkan *hold-up* fasa gas yang memiliki ukuran gelembung semakin kecil. Ukuran gelembung gas juga dipengaruhi oleh sifat-sifat fisik fluida dan efek dari diameter pancaran. Dengan meningkatnya diameter pancaran maka akan semakin kecil ukuran diameter gelembung. Hal ini dapat dilihat pada tabel 2.9 dan diakibatkan oleh semakin besarnya energi yang masuk ke dalam daerah pencampuran sehingga laju alir massa semakin besar.

Tabel 2.9 Pengaruh Diameter Pancaran Terhadap Diameter Gelembung di Daerah *Mixing*
 $(\rho_L = 1000 \text{ kg/m}^3; \mu_L = 0,0009 \text{ Pa-s}; \sigma = 0,063 \text{ N/m}; V_j = 11,5 \text{ m/s})$ (Evans, 1990)

Diameter <i>Jet</i> (mm)	Diameter Kolom (mm)	<i>Baffles</i> <i>Installed</i> (Yes/No)	Diameter Gelembung (μm) Maksimum $(d_b)_{\text{max}}$		<i>Sauter</i> <i>Mean</i>	$\frac{(d_b)_{\text{vs}}}{(d_b)_{99}}$
			Terukur $(d_b)_{99}$	Prediksi $(d_b)_{\text{vs}}$		
2,38	44	No	412	380	233	0,566
4,76			222	288	136	0,613
7,12			280	226	156	0,557
2,38	74	No	594	813	372	0,626
4,76			543	544	324	0,597
7,12			441	457	264	0,599
2,38	74	Yes	716	488	488	0,682
4,76			614	378	378	0,616
7,12			488	314	314	0,605

d. Luas area spesifik antarfasa

Luas area spesifik antar fasa bergantung pada ukuran diameter gelembung gas yang terbentuk dan kecepatan laju alir gas maupun cairan. Semakin kecil ukuran diameter gelembung gas maka luas area spesifik antar fasa akan semakin besar pula. Hal ini disebabkan oleh kecepatan alir cairan maupun gas yang semakin besar sehingga membuat ukuran diameter gelembung menjadi sangat kecil. Hal ini ditunjukkan pada gambar 2.8.



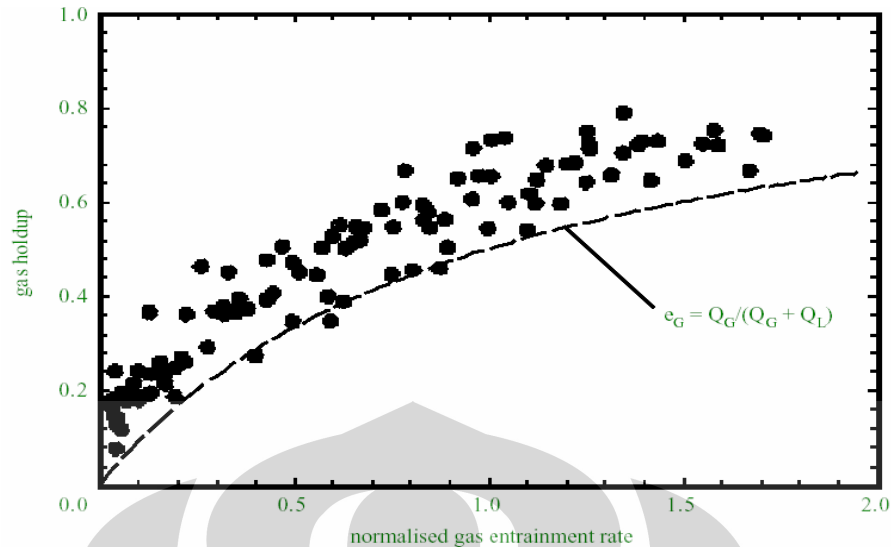
Gambar 2.8 Pengaruh Luas Area Spesifik Terhadap Kecepatan Gas (a) dan Kecepatan Cairan (b) (Kundu *et al.*, 2003)

2.5.1 Menghitung *hold-up* fasa gas

Hold-up fasa gas telah diplot sebagai fungsi dari laju *gas entrainment* yang telah dinormalisasi seperti terlihat pada gambar 2.9. Untuk memperoleh data digunakan diameter *nozzle* 3,2, 5 dan 6,8 mm serta kecepatan *jet* bervariasi dari 7-35 m/s. Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai *hold-up* fasa gas naik seiring dengan naiknya laju *gas entrainment* yang telah dinormalisasi. Terlihat pula bahwa prediksi nilai *hold-up* fasa gas berdasarkan kondisi *no-slip* antara fasa gas dan cair menghasilkan:

$$\epsilon_g = \frac{Q_g}{Q_g + Q_l} \quad (2.2)$$

Persamaan 2.2 diplot pada gambar 2.9 dimana terlihat bahwa nilai *hold-up* fasa gas kalkulasi lebih besar daripada nilai yang diprediksi untuk *gas entrainment rate* tertentu yang telah dinormalisasi (Yamagiwa dan Kusabiraki, 1990). Penyebab dari ketidaksesuaian ini adalah *slip* antara fasa gas (gelembung) dan cairan dalam kolom yang menghasilkan kenaikan nilai *hold-up* fasa gas (Hasan, 1995).

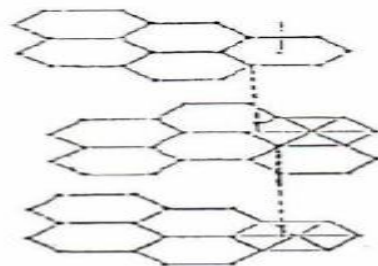


Gambar 2.9 Grafik Kalkulasi *Hold-Up* Fasa Gas Terhadap *Gas Entrainment Rate* Yang Telah Dinormalisasi (Liu dan Evans, 1998)

2.6 Adsorpsi dengan Karbon Aktif

Adsorpsi merupakan suatu proses pelekatan molekul gas/cairan pada permukaan padatan. Molekul zat yang satu dapat melekat lebih sempurna dibanding yang lain pada permukaan padat. Sifat inilah yang dipergunakan untuk memperoleh suatu pemisahan. Adsorben yang sering digunakan berupa karbon aktif yang merupakan padatan amorf yang memiliki luas permukaan internal dan volume pori yang sangat besar. Keunikan karakteristik ini berhubungan dengan sifatnya yang adsorptif terhadap zat adsorbat baik fasa gas atau cair (Sugiarso, 1996).

Karbon aktif biasanya dibuat dengan dekomposisi termal dari material berkarbon yang diikuti dengan *steam* pada suhu tinggi. Struktur karbon aktif seperti pada gambar 2.10 mengandung mikrokristalit dari grafit yang terkumpul pada arah yang acak dan membentuk pori mikro (Ruthven, Yang, 1987).



Gambar 2.10 Struktur Karbon Aktif (Figuredo dan Mouljin, 1986)

Adsorpsi biasanya dinyatakan dalam isotherm, istilah yang menyatakan jumlah adsorbat yang diserap oleh adsorben yang dinyatakan dalam tekanan (untuk gas) dan konsentrasi (untuk cairan). Banyaknya adsorbat gas yang diserap oleh adsorben dipengaruhi oleh jenis dan luas permukaan adsorben, adsorbat gas, serta temperatur dan tekanan gas. Secara umum, adsorpsi dapat dibedakan menjadi 2 jenis yaitu adsorpsi fisika dan kimia (Maron dan Lando, 1965).

Tabel 2.10 Perbandingan Antara Adsorpsi Fisika Dan Adsorpsi Kimia (Slamet *et al.*, 2007)

Adsorpsi fisika	Adsorpsi kimia
Panas adsorpsi rendah (kurang dari 2-3 kali kalor penguapan)	Panas adsorpsi tinggi (lebih dari 2-3 kali panas penguapan)
Non-spesifik	Sangat spesifik
Monolayer dan multilayer	Monolayer
Tidak ada disosiasi adsorbat	Ada disosiasi adsorbat
Signifikan hanya pada suhu relatif rendah	Signifikan pada rentang suhu yang tinggi

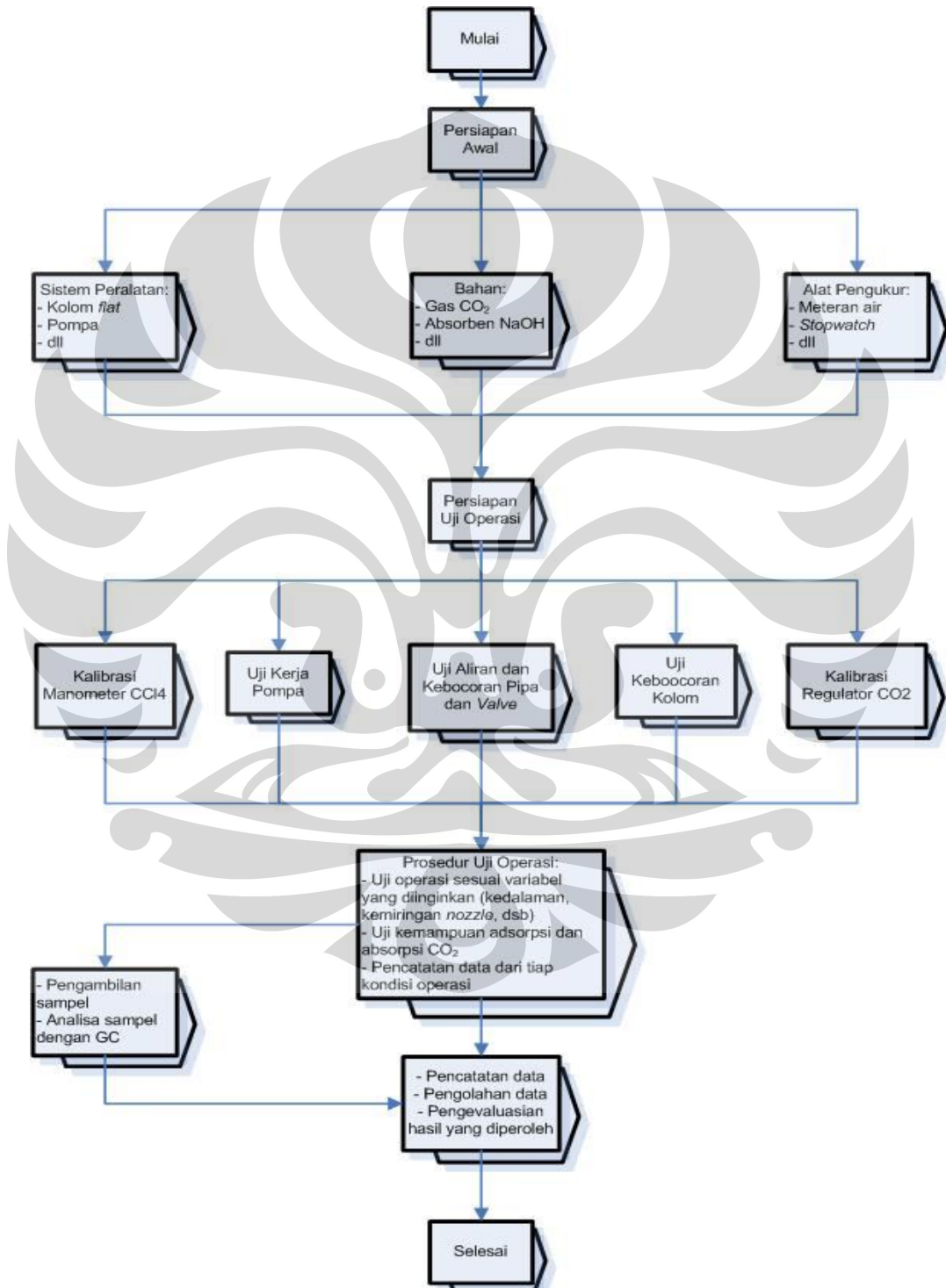
Aktivitas karbon aktif sebagai adsorben dibentuk oleh unsur mineral dan senyawa kimia yang ditambahkan saat aktivasi, yang akan meresap ke dalamnya dan membuka permukaan yang tadinya tertutup oleh komponen kimia sehingga pori-pori akan semakin membesar. Pori-pori yang terbuka ini menyebabkan karbon aktif menjadi adsorben yang sangat tinggi kualitasnya. Produk komersial umumnya memiliki luas permukaan spesifik 200-1500 m²/gr (Othmer, 1994).

Karbon aktif adalah senyawa kompleks yang sulit diklarifikasikan berdasarkan sifat dasar, karakteristik permukaan dan metode preparasinya, namun dapat diklasifikasikan menjadi (Wikipedia, 2008):

- *Powdered Activated Carbon* (PAC)
- *Granulated Activated Carbon* (GAC)
- *Extruded Activated Carbon* (EAC)
- *Impregnated Carbon*
- *Polymer Coated Carbon*

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

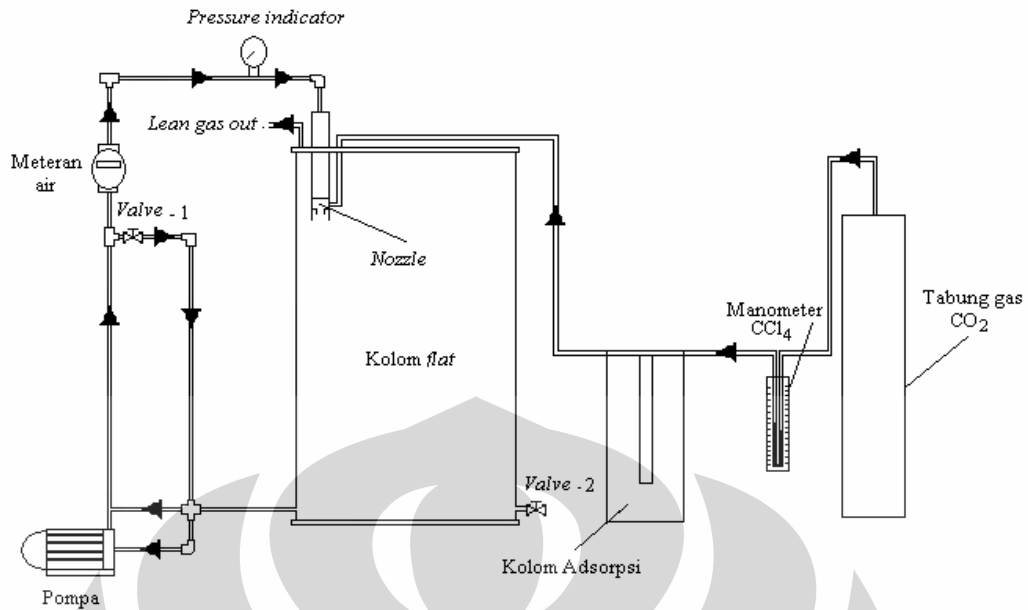


Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Dari gambar 3.1 dapat dilihat tahapan-tahapan dalam penelitian ini yang diawali dengan persiapan sistem peralatan, bahan serta alat pengukur. Setelah itu, dilakukan persiapan uji operasi pada kalibrasi manometer CCl_4 dan regulator CO_2 , uji aliran dan kebocoran pipa dan *valve*, uji kerja pompa serta uji kebocoran kolom. Kemudian dilakukan prosedur uji operasi sesuai variabel yang diinginkan (sudut dan kedalaman *nozzle* tercelup), uji kemampuan adsorpsi dan absorpsi CO_2 serta pencatatan data-data dari tiap kondisi operasi. Saat uji operasi, diambil sampel gas CO_2 sebelum dan sesudah masuk ke kolom *flat*. Sampel tersebut kemudian dianalisa dengan alat *Gas Chromatography*. Data-data yang diperoleh kemudian diolah dan hasilnya dianalisa serta dievaluasi.

3.2 Persiapan Peralatan

Gas CO_2 dari tabung dialirkan menuju kolom. Sebelumnya sampel gas diambil untuk dianalisa konsentrasi CO_2 awal. Sementara itu, *nozzle* diposisikan dengan sudut yang diinginkan dan cairan dimasukkan ke kolom *flat* hingga mencapai *nozzle* tercelup sampai kedalaman yang diinginkan. Laju alir volumetrik cairan diketahui dari meteran air, tekanan cairan diketahui dari *pressure indicator* dan laju alir gas diketahui dari perbedaan ketinggian dalam manometer CCl_4 yang telah dikalibrasi. Cairan dipancarkan oleh kepala *nozzle* ke dalam kolom *flat* sehingga gas akan terhisap melalui lubang yang terdapat pada bagian samping kepala *nozzle*. Saat cairan bertumbukan dengan cairan stagnan di dalam kolom *flat* akan terbentuk lubang seperti terompet yang akan menghisap gas masuk ke dalam cairan stagnan di dalam kolom *flat*. Selanjutnya gas akan terperangkap dalam bentuk gelembung akibat pecahnya lapisan film cairan karena tumbukan tersebut. Tumbukan tersebut juga mengakitnya terjadinya pusaran eddy sehingga terjadi pengadukan di dalam kolom *flat* dengan sendirinya dan fasa gas akan terdistribusi secara merata dalam fasa cair di kolom *flat*. *Lean gas* akan keluar dari bagian atas kolom *flat*. Sedangkan cairan akan keluar lewat bagian bawah kolom dan diresirkulasi menuju pompa. Untuk uji hidrodinamika, digunakan air dan udara. Kemudian pada sejumlah konfigurasi terpilih dilakukan uji absorpsi CO_2 dengan menggunakan absorben NaOH dan gas CO_2 . Prosedur di atas pun diulangi kembali.



Gambar 3.2 Skema Rangkaian Peralatan

3.3 Komponen Peralatan

a. Kepala *nozzle*

Berfungsi untuk mengalirkan cairan dengan kecepatan *jet* (pancaran) serta menghisap gas ke dalam kolom *flat*. Gas akan terhisap melalui lubang yang terdapat pada bagian samping kepala *nozzle*.



Gambar 3.3 Kepala *Nozzle*

b. Kolom *flat*

Merupakan peralatan utama dalam percobaan ini. Kolom ini berfungsi sebagai kolom gelembung pancaran (kolom absorpsi) tempat berlangsungnya

proses perpindahan massa fasa gas ke dalam fasa cair. Bagian ini berbentuk *flat glass* dengan spesifikasi:

- Bahan kolom : lembar *acrylic*
- Tinggi : 100 cm
- Lebar : 47 cm
- Tebal : 5 cm

c. Tabung gas CO₂

Berfungsi sebagai tempat penyimpanan gas CO₂.

d. Pompa

Berfungsi untuk mengalirkan fluida cair dari tangki penampung ke dalam kolom *flat*. 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



Gambar 3.4 Pompa

e. *Valve*

Peralatan penelitian ini membutuhkan *valve* sebanyak 3 buah.



Gambar 3.5 Valve

f. Meteran air.

Berfungsi untuk mengukur kecepatan aliran cairan yang masuk ke dalam kolom *flat*. Spesifikasi meteran air yang digunakan adalah:

- Merek : Schlumberger
- Ql : $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$



Gambar 3.6 Meteran Air

g. *Pressure indicator*

Berfungsi sebagai pengukur tekanan cairan yang masuk ke dalam *nozzle*.

Spesifikasi *pressure indicator* yang digunakan adalah:

- Merek : Steins
- Tekanan maksimum : $1,6 \text{ kg/cm}^2$



Gambar 3.7 Pressure Indicator

h. Kamera

Berfungsi untuk mengambil foto konfigurasi sehingga dapat diukur sudut *jet* dan juga untuk perhitungan distribusi gelembung. Spesifikasi kamera yang digunakan adalah:

- Merek : Canon
- Tipe : PowerShot A710
- Nomor seri : 3148206169 made in Japan

i. *Syringe*

Berfungsi untuk mengambil sampel gas CO₂ sebanyak 1 ml sebelum dan sesudah masuk ke kolom *flat* untuk analisa konsentrasi CO₂ dengan GC. Selain itu, *syringe* juga digunakan untuk mengambil sampel absorben NaOH untuk analisa konsentrasi absorben.

j. Manometer CCl₄

Berfungsi untuk mengukur laju alir CO₂ dengan menggunakan setelah sebelumnya dilakukan kalibrasi perbedaan ketinggian (Δh) cairan dalam manometer CCl₄ terhadap laju alir CO₂.



Gambar 3.8 Manometer CCl_4

3.4 Spesifikasi Bahan

- Fasa cair : air dan larutan NaOH
- Fasa gas : udara dan gas CO_2
- Fasa padat : karbon aktif

3.5 Persiapan Uji Operasi

3.5.1 Kalibrasi manometer CCl_4

- Menyiapkan rangkaian peralatan percobaan seperti pada gambar 3.2
- Menghubungkan manometer CCl_4 dengan *flowmeter* CO_2
- Menutup *valve* - 1
- Menyalakan pompa
- Mencatat perbedaan ketinggian yang terbaca pada manometer CCl_4 dan laju alir pada *flowmeter* CO_2
- Melepas selang yang menghubungkan manometer CCl_4 dengan *flowmeter* CO_2
- Mencatat perbedaan ketinggian yang terbaca pada manometer CCl_4 yang langsung terhubung dengan udara luar
- Mengulangi langkah di atas sebanyak lima kali

- Mengulangi prosedur di atas dengan bukaan *valve* – 1 yang berbeda. Demikian seterusnya sampai jumlah titik data yang diperlukan untuk membuat kurva kalibrasi yang diinginkan terpenuhi

3.5.2 Kalibrasi regulator CO₂

- Menghubungkan selang regulator CO₂ dengan *soap bubble flowmeter*
- Membuka *valve* regulator CO₂ dengan laju alir tertentu
- Mencatat waktu yang diperlukan oleh *soap bubble* untuk mencapai ketinggian/volume tertentu dalam tabung dengan menggunakan *stopwatch*
- Mengulangi langkah di atas sebanyak lima kali
- Mengulangi prosedur di atas dengan bukaan *valve* regulator CO₂ yang berbeda. Demikian seterusnya sampai jumlah titik data yang diperlukan untuk membuat kurva kalibrasi yang diinginkan terpenuhi

3.5.3 Uji aliran dan kebocoran pipa, *valve* dan kolom

- Menyiapkan rangkaian peralatan percobaan seperti pada gambar 3.2
- Memasukkan air ke kolom *flat* secukupnya
- Membuka penuh *valve* - 1
- Menyalakan pompa dan mengamati apakah aliran dalam perpipaan, *valve* maupun kolom dalam kondisi baik atau tidak
- Mengamati kebocoran yang terjadi pada seluruh sambungan yang ada
- Mengatasi segala kemungkinan kebocoran yang terjadi (salah satunya dengan jalan menambah isolasi pipa, lem atau menambahkan penahan agar kolom tidak mudah bocor)
- Menyimpulkan peralatan untuk dapat layak dioperasikan

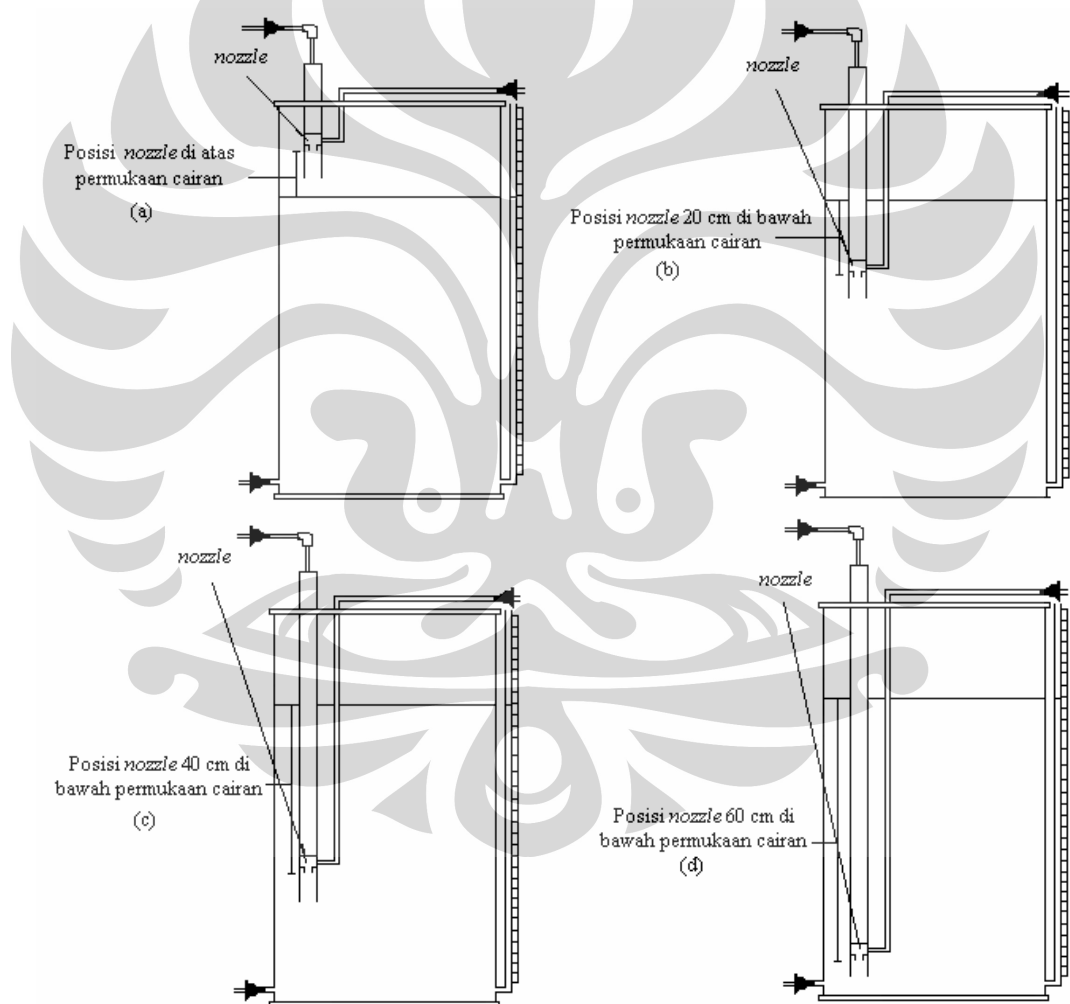
3.5.4 Uji kerja pompa

- Menyiapkan rangkaian peralatan percobaan seperti pada gambar 3.2
- Menyalakan pompa
- Jika pompa tidak mengeluarkan bunyi bising akibat *surging* atau tekanan pompa yang terbaca pada *pressure indicator* tidak turun dengan tiba-tiba maka pompa berada dalam kondisi yang baik

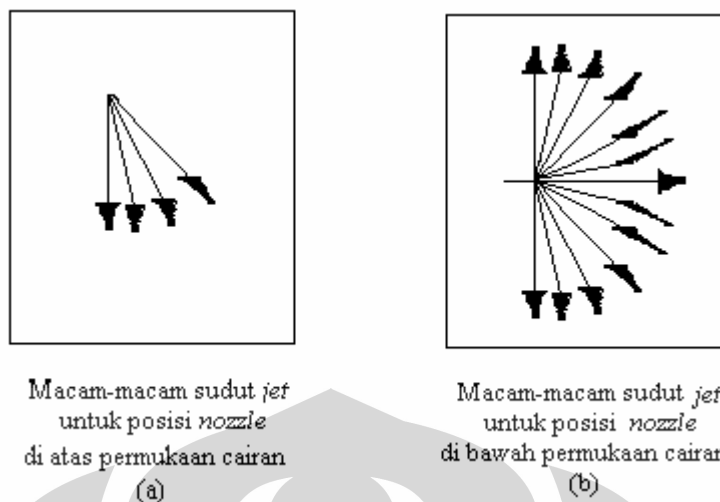
- Apabila terjadi *surging* maka katup sirkulasi ditutup. *Surging* terjadi akibat terlalu banyak gelembung yang terbawa oleh aliran cairan ke pompa
- Jika tekanan pompa turun dengan tiba-tiba maka perlu dicek kembali kebocoran pada perpipaan, *valve*, kolom, sambungan dan pompa serta posisi keluaran *jet* di dalam kolom *flat*

3.6 Uji Operasi

Berikut adalah sketsa konfigurasi *liquid jet flow* dengan variasi sudut dan kedalaman *nozzle* tercelup yang akan dilakukan pada penelitian:



Gambar 3.9 Berbagai Sketsa Kedalaman *Nozzle* Tercelup Yang Dilakukan Pada Penelitian

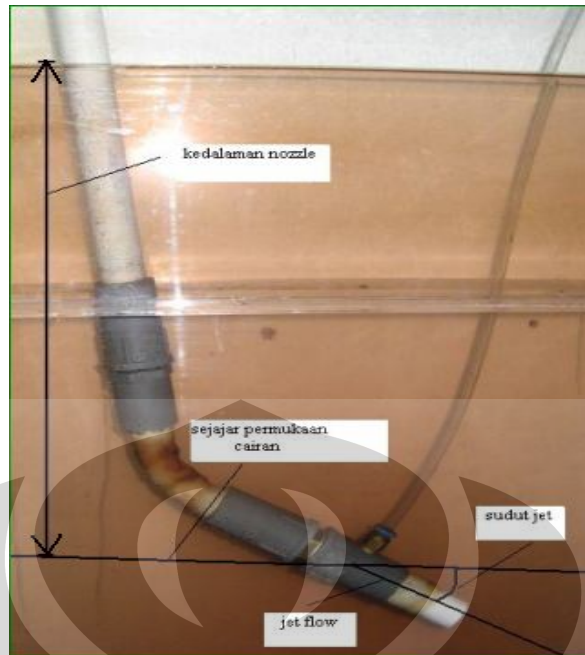


Gambar 3.10 Berbagai Sketsa Sudut *Nozzle* Yang Dilakukan Pada Penelitian

Pada intinya, posisi *nozzle* tercelup dibagi menjadi dua yaitu tercelup dan tidak tercelup. *Nozzle* yang tidak tercelup berada di atas permukaan cairan (gambar 3.9.a) sedangkan *nozzle* yang tercelup berada di dalam cairan pada kolom *flat* dengan kedalaman yang divariasikan antara 0 - 60 cm (gambar 3.9.b-d). Untuk *nozzle* yang tidak tercelup, tidak banyak variasi sudut yang dapat dilakukan karena posisinya yang terhalang dinding kolom untuk sudut-sudut *nozzle* yang lain (gambar 3.10.a). Sedangkan untuk *nozzle* yang tercelup (gambar 3.10.b), lebih banyak variasi sudut yang dapat dilakukan walaupun untuk kedalaman *nozzle* tercelup yang cukup dalam (~60 cm) dimana posisi *nozzle* dekat dengan dasar kolom *flat* juga terdapat halangan dinding kolom (gambar 3.9.d).

3.6.1 Pengukuran sudut dan kedalaman *nozzle*

- Memasang *nozzle* dengan sudut yang diinginkan
- Mengisi kolom *flat* dengan cairan hingga *nozzle* tercelup dengan kedalaman yang diinginkan
- Mengukur ketinggian dari permukaan cairan stagnan dalam kolom sampai dengan posisi *nozzle* yang ditandai oleh selang di bagian samping *nozzle*
- Mengukur sudut *nozzle* sejajar permukaan cairan stagnan dalam kolom *flat* berlawanan arah dengan jarum jam
- Mengulangi langkah di atas untuk konfigurasi (sudut dan kedalaman *nozzle* tercelup) yang berbeda



Gambar 3.11 Prosedur Pengukuran Sudut dan Kedalaman *Nozzle* Tercelup

3.6.2 Uji hidrodinamika

Uji ini bertujuan untuk menguji kelayakan operasi/kinerja alat dengan mengukur laju alir gas dan cairan serta menghitung gas *entrainment* dan *hold-up* fasa gas. Langkah-langkahnya sebagai berikut:

- Menyiapkan rangkaian peralatan percobaan seperti pada gambar 3.2
- Memasang *nozzle* dengan sudut yang diinginkan
- Mengisi air ke dalam kolom *flat* hingga *nozzle* tercelup dengan kedalaman yang diinginkan
- Membuka penuh *valve* - 1
- Menghidupkan pompa
- Mencatat perbedaan ketinggian pada manometer CCl_4
- Mencatat tekanan pompa dari *pressure indicator* dan laju alir cairan pada meteran air
- Mengulangi langkah di atas untuk konfigurasi (sudut dan kedalaman *nozzle* tercelup) yang berbeda

3.6.3 Uji absorpsi CO_2

- Menyiapkan rangkaian peralatan percobaan seperti pada gambar 3.2

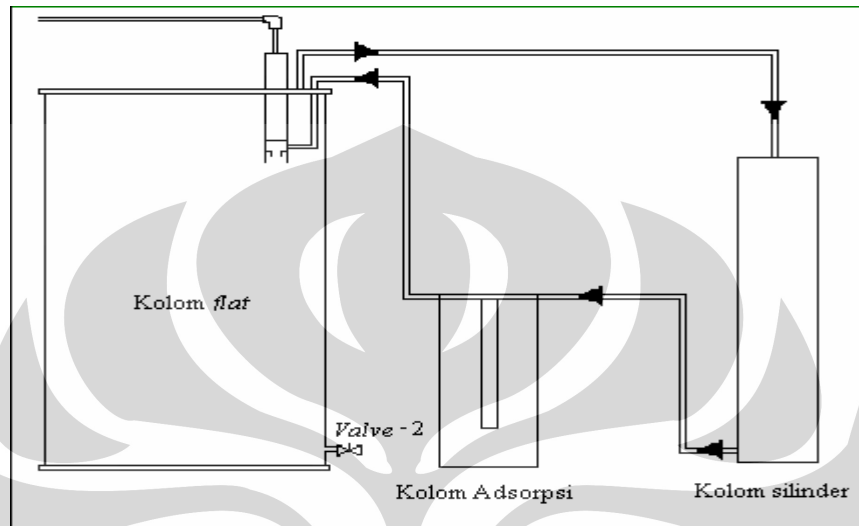
- Memasang *nozzle* dengan sudut yang diinginkan
- Mengisi air ke dalam kolom *flat* hingga *nozzle* tercelup dengan kedalaman yang diinginkan
- Memasukkan larutan NaOH dengan konsentrasi 0,01 M
- Menambahkan indikator phenolptalein (pp) sebanyak 30 tetes ke dalam kolom *flat*
- Membuka penuh *valve* - 1
- Membuka *valve* regulator CO₂ dengan laju alir 5 L/min
- Menghidupkan pompa
- Mencatat waktu mulai pada saat pompa dihidupkan sampai terjadi perubahan warna pada larutan NaOH dari ungu hingga menjadi bening
- Mengambil foto gelembung dalam kolom *flat* untuk perhitungan distribusi gelembung
- Mengulangi langkah di atas untuk konfigurasi (sudut dan kedalaman *nozzle* tercelup) yang berbeda

3.6.4 Uji kemampuan adsorpsi dan absorpsi gas CO₂

- Menyiapkan rangkaian peralatan percobaan seperti pada gambar 3.2
- Memasang *nozzle* dengan sudut yang diinginkan
- Mengisi air ke dalam kolom *flat* hingga *nozzle* tercelup dengan kedalaman yang diinginkan
- Memasukkan larutan NaOH 1%
- Memasukkan 600 gram karbon aktif ke dalam kolom adsorpsi
- Membuka penuh *valve* - 1
- Membuka *valve* regulator CO₂ dengan laju alir 5 L/min
- Menghidupkan pompa
- Mengambil sampel gas sebelum masuk ke kolom adsorpsi sebanyak 1 ml untuk mengetahui konsentrasi awal CO₂ dari tabung gas
- Mengambil sampel gas sebelum dan sesudah masuk ke kolom absorpsi sebanyak 1 ml setelah menit keempat
- Mengulangi langkah di atas untuk konfigurasi (sudut dan kedalaman *nozzle* tercelup) yang berbeda

3.6.5 Penentuan konstanta laju reaksi absorpsi CO₂

Pada gambar 3.12 adalah skema peralatan yang digunakan dalam percobaan ini dengan sistem sirkulasi dimana tabung gas CO₂ digantikan oleh kolom silinder yang berfungsi sebagai kotak sampel gas CO₂:



Gambar 3.12 Skema Aliran Sirkulasi Gas CO₂

Langkah-langkahnya sebagai berikut:

- Menghubungkan input kolom silinder dengan tabung gas CO₂ menggunakan selang plastik
- Membuka output kolom silinder ke udara bebas (melepaskan selang yang menghubungkan kolom silinder dengan kolom absorpsi)
- Membuka *valve* regulator pada tabung gas CO₂ dengan laju alir 5 L/min
- Melakukan proses *purging* selama ± 10 menit
- Menyiapkan rangkaian peralatan percobaan seperti pada gambar 3.12
- Memasang konfigurasi ke-71 dengan sudut *nozzle* sebesar -60 derajat
- Mengisi air ke dalam kolom *flat* hingga *nozzle* berada pada ketinggian 2,3 cm di atas permukaan cairan
- Memasukkan larutan NaOH 1%
- Membuka penuh *valve* - 1
- Menghidupkan pompa
- Mengambil sampel gas sebelum dan sesudah masuk ke kolom absorpsi sebanyak 1 ml setelah 1 menit

- Mengambil sampel absorben sebanyak 5 ml melalui *valve* – 2 setelah 1 menit
- Mengulangi langkah di atas untuk konsentrasi absorben NaOH 2% dan 3%

3.6.6 Analisa sampel gas dengan *Gas Chromatography*

Gas Chromatography yang digunakan adalah jenis GC – TCD dengan gas pembawa argon. Percobaan ini bertujuan untuk menganalisa konsentrasi gas CO₂ pada sampel gas yang diperoleh dari percobaan konfigurasi *liquid jet flow*. Sebelum melakukan analisa sampel, dilakukan kalibrasi GC terlebih dahulu pada gas CO₂ murni.

I. Pemanasan alat (*warming up*)

1. GC

- Menekan tombol pembacaan temperatur pada INJ
- Mengatur temperatur kolom yang diinginkan (untuk program *isothermal*, *initial* dan *final* diisi dengan temperatur yang sama)
- Mengatur temperatur injektor (INJ) dan detektor (DET); temperatur minimal harus 20 °C di atas temperatur kolom
- Menastikan masing-masing temperatur telah naik
- Mengatur pengontrol POL pada posisi positif, besar ATT pada 1
- Menunggu alat sampai stabil selama 15 – 30 menit
- Mengatur Arus GC pada posisi 60 mA

2. Recorder C-R6A

- Menekan *power on* pada *recorder*
- Menekan I – N – I (sambil menekan *shift down*) dan *enter*
- Menekan *shift down* – *plot* – *enter* dan menunggu sampai garis kromatogram stabil. Untuk menghentikan *ploting*, menekan sekali lagi *shift down* - *plot* - *enter*
- Menekan *print* kemudian *level* sambil menekan *ctrl* (melepas setelah menekan *level*) - *enter*

- Mengatur *zero point* kromatograf pada level -1000 sampai dengan +5000 (μV) (jika belum masuk *range*, menunggu beberapa menit untuk diuji lagi)
- Menekan *zero - enter*
- Menekan *shift down - self test - enter*
- Menekan *Attenuation Recorder* pada 7

II. Analisa sampel

1. Menginjeksikan sampel yang akan dianalisa dengan *syringe* sebanyak 1 ml
2. Setelah muncul *peak* antara 5 – 10 menit, menekan *stop* apabila diperkirakan tidak akan muncul *peak* lagi
3. Apabila sudah diketahui waktu akhir munculnya *peak* dari sampel maka dapat difungsikan *automatic stopped* dengan memencet tombol *stop time* pada *recorder* dan mengisinya dengan *stop time* yang diinginkan

III. Pemberhentian alat

1. Mengatur temperatur *initial* dan *final* pada 20 °C serta membuka pintu kolom
2. Mematikan detektor TCD dengan mengatur *current GC* pada 0
3. Mengatur temperatur INJ dan TCD pada 20 °C
4. Memastikan temperatur kolom telah turun sampai temperatur ruang serta temperatur INJ dan DET di bawah 60 °C
5. Mematikan GC dan *recorder* dengan menekan *power off*
6. Menutup *valve* utama tabung silinder *carrier gas* (gas pembawa) argon



Gambar 3.13 Peralatan GC – TCD

3.6.7 Analisa sampel absorben dengan metode titrasi

- Menambahkan 5 tetes indikator phenolptalein (pp) pada 5 ml sampel absorben NaOH
- Mentitrasi sampel absorben NaOH dengan larutan HNO₃ 0,5% hingga larutan tepat menjadi bening
- Mencatat volume larutan HNO₃ yang diperlukan untuk titrasi

3.7 Pengolahan Data

3.7.1 Perhitungan *hold-up* fasa gas

Dari tahapan uji operasi hidrodinamika akan didapatkan data laju alir gas dan cairan dari tiap konfigurasi. Kemudian dihitung dengan rumus (Liu dan Evans, 1998):

$$\varepsilon_g = \frac{Q_g}{Q_g + Q_l}$$

(3.1)

3.7.2 Perhitungan konsentrasi CO₂

Konsentrasi CO₂ dapat diketahui setelah hasil dari *gas chromatography* (kromatogram) diperoleh. Area untuk komponen CO₂ pada kromatogram dari tiap sampel yang dianalisa dikalikan dengan faktor kalibrasi yang dihitung dari hasil kalibrasi GC untuk gas CO₂ murni. Volume gas CO₂ per 1 mL sampel akan

diperoleh sehingga dapat dihitung konsentrasi CO₂ (y_i dan y_o , % v/v) yang masuk dan keluar dari kolom absorpsi untuk tiap konfigurasi.

Dari volume CO₂ yang didapatkan, dihitung jumlah mol CO₂ pada temperatur ruang (25 °C). Kemudian jumlah mol CO₂ tersebut dibagi dengan volume total gas yang masuk ke dalam kolom absorpsi yang dapat dihitung dari laju alir volumetrik gas dikalikan dengan waktu reaksi (t_f) sehingga akan didapatkan konsentrasi CO₂ yang masuk dan keluar dari kolom absorpsi. Persamaan-persamaan yang digunakan untuk menghitung presentase adsorpsi, absorpsi dan penurunan CO₂ total dapat dilihat pada persamaan 3.2-3.4.

$$\% \text{ Adsorpsi} = \left[\frac{\% \text{ CO}_2 \text{ Awal} - \% \text{ CO}_2 \text{ Output Adsorpsi}}{\% \text{ CO}_2 \text{ Awal}} \right] \times 100\% \quad (3.2)$$

$$\% \text{ Absorpsi} = \left[\frac{\% \text{ CO}_2 \text{ Output Adsorpsi} - \% \text{ CO}_2 \text{ Output Absorpsi}}{\% \text{ CO}_2 \text{ Awal}} \right] \times 100\% \quad (3.3)$$

$$\% \text{ Penurunan CO}_2 = \% \text{ Adsorpsi} + \% \text{ Absorpsi} \quad (3.4)$$

3.7.3 Perhitungan distribusi gelembung

Pada uji absorpsi telah dilakukan pengambilan foto gelembung dalam kolom *flat* untuk tiga konfigurasi terbaik dan terburuk berdasarkan hasil uji absorpsi CO₂ dengan parameter waktu absorpsi CO₂. Dari foto tersebut yang kemudian diperbesar ukurannya dapat diukur diameter gelembung dalam foto secara manual melalui layar komputer. Dengan kalibrasi menggunakan rasio diameter pipa dalam foto dibandingkan dengan diameter pipa yang sebenarnya maka akan diperoleh ukuran diameter gelembung yang sebenarnya. Gelembung-gelembung tersebut kemudian dibagi menjadi empat rentang diameter yaitu:

Rentang diameter 1 = (0,00097 – 0,00184) mm

Rentang diameter 2 = (0,00273 – 0,00360) mm

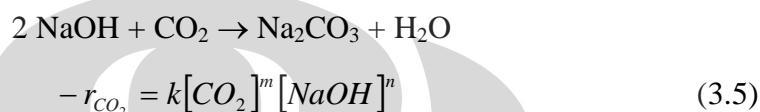
Rentang diameter 3 = (0,00449 – 0,00536) mm

Rentang diameter 4 = (0,00625 – 0,00712) mm

Persentase distribusi jumlah gelembung didapatkan dengan membandingkan kuantitas gelembung pada rentang diameter tertentu terhadap kuantitas gelembung keseluruhan dalam satu area kolom.

3.7.4 Perhitungan konstanta laju reaksi absorpsi CO₂

Untuk menghitung konstanta laju reaksi absorpsi CO₂ dalam larutan NaOH dapat ditentukan dari persamaan kinetika reaksi. Adapun reaksinya adalah sebagai berikut :



dimana :

$-r_{\text{CO}_2}$ = laju reaksi absorpsi CO₂

[CO₂] = konsentrasi CO₂

[NaOH] = konsentrasi NaOH

k = konstanta laju reaksi total

m = ordo reaksi terhadap NaOH

n = ordo reaksi terhadap CO₂

Dipandang bahwa :

- Persamaan laju reaksi adalah reaksi ordo 2 (Meikap *et al.*, 2001)
- Kadar larutan NaOH homogen karena adanya pengadukan dari sirkulasi pompa dan efek pusaran eddy dalam kolom
- Reaktan NaOH tidak mungkin berdifusi ke dalam lapisan film gas karena operasi berlangsung pada temperatur kamar sehingga tidak mungkin terjadi penguapan larutan NaOH secara langsung
- Reaksi berlangsung sangat cepat (< 5 menit) sehingga reaksi dapat dipandang sebagai laju reaksi awal penurunan NaOH (*initial rate reaction*), maka untuk persamaan laju reaksi dapat digunakan konsentrasi awal NaOH dan konsentrasi awal CO₂

Untuk menyelesaikan persamaan 3.5 digunakan metode regresi linear berganda dan persamaan akan menjadi:

$$\log(-r_{\text{CO}_2}) = \log k + m \log[\text{NaOH}] + n \log[\text{CO}_2]$$

sehingga dapat diketahui nilai k , m dan n . Kemudian akan diplot grafik antara $(-r_{CO_2})$ yang diperoleh dari hasil eksperimen dengan $(-r_{CO_2})$ dari hasil kalkulasi menggunakan metode regresi linear berganda untuk uji linearisasi.

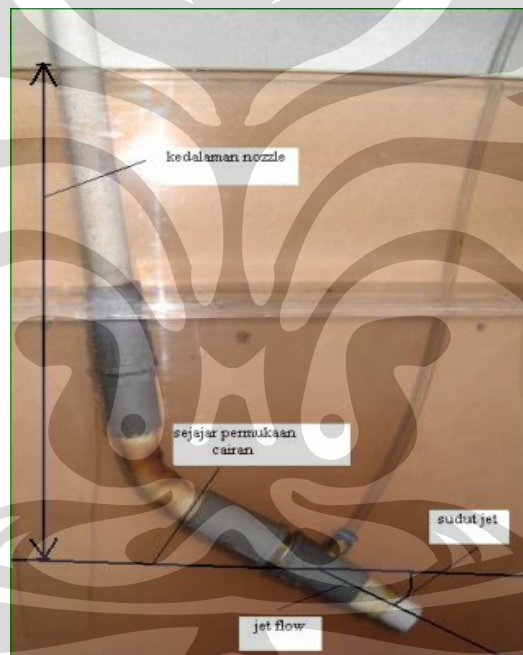


BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemilihan Konfigurasi Terbaik

Pada tahapan pemilihan konfigurasi terbaik dilakukan pengujian terhadap 82 jenis konfigurasi yang divariasikan berdasarkan aspek hidrodinamikanya. Kriteria parameter utamanya adalah *hold-up* fasa gas dan *gas entrainment* yang setinggi-tingginya. Data lengkap dari ke 82 konfigurasi tersebut dapat dilihat pada lampiran 1.

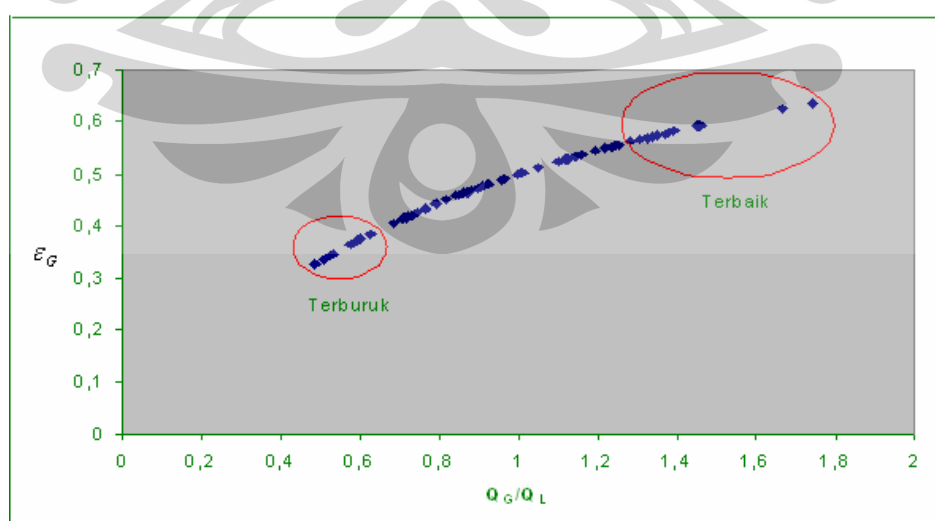


Gambar 4.1 Prosedur Pengukuran Sudut dan Kedalaman *Nozzle* Tercelup

Konfigurasi *liquid jet flow* didefinisikan sebagai sudut dan kedalaman *nozzle* tercelup dalam cairan di kolom *flat*. Pengukuran sudut dan kedalaman untuk masing-masing konfigurasi diilustrasikan pada gambar 4.1. Pengukuran sudut tumbukan *liquid jet* berdasarkan arah horizontal berlawanan dengan arah jarum jam. Pengukuran tersebut dilakukan sebelum peralatan eksperimen *jet* dioperasikan. Sedangkan kedalaman *nozzle* tercelup diukur dari permukaan cairan sampai dengan posisi *nozzle* yang ditandai oleh selang plastik di samping *nozzle*.

Sebelumnya pada tahun 2000, Ito, *et al.* telah mengamati korelasi antara kedalaman penetrasi gelembung terhadap efek geometri *nozzle*. Namun, hal tersebut hanya dilakukan pada *vertical liquid jet* dengan posisi *nozzle* di atas permukaan cairan atau tidak tercelup. Konsep konfigurasi pada penelitian ini sangat penting untuk dilakukan pengamatan karena pada prinsipnya cairan stagnan dalam kolom terbelah oleh tumbukan *liquid jet* dengan maksud untuk mendapatkan kualitas gelembung dengan diameter yang sekecil-kecilnya dan kuantitas gelembung yang sebanyak-banyaknya. Dengan demikian sistem kontak antara fasa gas dan cair akan menjadi lebih sempurna melalui bidang kontak gelembung-gelembung yang terbentuk.

Berdasarkan uji hidrodinamika dengan parameter *gas entrainment* dan *hold-up* fasa gas ditentukan sepuluh konfigurasi terbaik. Kedua parameter tersebut sangat penting dalam kinerja peralatan pada sistem kontak gas-cair. Yang dimaksud dengan *gas entrainment* adalah banyaknya gas yang terhisap masuk ke dalam cairan dalam kolom. Sedangkan *hold-up* fasa gas adalah fraksi fasa gas yang mengisi ruang-ruang di antara cairan dalam bentuk gelembung dan terjadi akibat tumbukan antara *liquid jet* dengan cairan stagnan dalam kolom. Pemilihan konfigurasi terbaik berdasarkan nilai kedua parameter tersebut adalah yang setinggi-tingginya dan jika sebaliknya berarti konfigurasi tersebut kurang baik dalam sistem kontak gas-cair.



Gambar 4.2 Sepuluh Konfigurasi Terbaik dan Terburuk Berdasarkan Parameter *Gas Entrainment* dan *Hold-Up* Fasa Gas

Hasil pengukuran *hold-up* fasa gas (ε_G) dan *gas entrainment rate* yang dinyatakan dalam rasio laju alir gas terhadap laju alir cairan (Q_G/Q_L) terlihat pada gambar 4.2. Dari 82 jenis konfigurasi yang diujikan terdapat 10 konfigurasi terbaik yaitu konfigurasi ke-80, 81, 76, 45, 66, 71, 12, 61, 60 dan 77 dengan nilai ε_G berkisar antara 0,55 – 0,65 dan rasio Q_G/Q_L antara 1,3 – 1,8. Disamping itu, dari hasil uji hidrodinamika juga ditentukan 10 konfigurasi terburuk yaitu konfigurasi ke-47, 35, 53, 70, 30, 64, 32, 37, 21 dan 52 untuk perbandingan.

Data-data lengkap dari 10 konfigurasi terbaik dan terburuk hasil uji hidrodinamika dapat dilihat pada tabel 4.1. Sedangkan gambar dari 10 konfigurasi terbaik dan terburuk ini dapat dilihat pada lampiran 2 dan 3.

Tabel 4.1 Sepuluh Konfigurasi Terbaik dan Terburuk Hasil Uji Hidrodinamika

No.	Konfigurasi ke-	Sudut (derajat)	Kedalaman <i>nozzle</i> tercelup (cm)	Q_G/Q_L	ε_G	Waktu absorpsi (s)
Sepuluh konfigurasi terbaik						
1.	80	-80	0,7	1,94	0,66	21,62
2.	81	-80	16,8	1,91	0,66	25,39
3.	76	-70	-2,6	2,02	0,67	18,62
4.	45	-10	16,8	0,13	0,12	23,72
5.	66	-55	-1,6	2,22	0,69	20,87
6.	71	-60	-2,3	2,47	0,71	15,84
7.	12	95	41,2	0,13	0,12	22,75
8.	61	-40	-2,2	2,00	0,67	17,03
9.	60	-35	11,2	0,13	0,11	23,15
10.	77	-70	11,7	0,13	0,11	24,97
Sepuluh konfigurasi terburuk						
1.	47	-15	-3,1	2,04	0,67	26,38
2.	35	25	48,6	0,40	0,29	25,88
3.	53	-20	59,6	3,02	0,75	33,31
4.	70	-55	63,4	1,88	0,66	27,84
5.	30	35	46,2	0,40	0,29	28,66
6.	64	-45	61	1,96	0,66	28,34
7.	32	30	58,1	0,14	0,12	35,03
8.	37	20	49,6	0,39	0,28	24,34
9.	21	60	41,3	0,26	0,21	29,82
10.	52	-15	68,3	1,97	0,66	32,99

4.2 Uji Absorpsi CO₂ Terhadap Konfigurasi Terpilih

Sepuluh konfigurasi terbaik yang telah diperoleh dari uji hidrodinamika diperkirakan akan menjadi konfigurasi terbaik pada uji kemampuan absorpsi CO₂. Sistem kontak gas-cair dengan nilai *hold-up* fasa gas yang tinggi akan menghasilkan kemampuan absorpsi yang tinggi juga. Untuk itu, dari sepuluh konfigurasi terbaik pada hasil uji hidrodinamika dilakukan pengujian kemampuan absorpsi CO₂. Disamping itu, untuk memastikan apakah kesepuluh konfigurasi terbaik tersebut memang memiliki kemampuan yang tinggi maka dipilih juga sepuluh konfigurasi terburuk sebagai perbandingan. Kondisi operasinya adalah konsentrasi CO₂ awal sebesar 96,60% dan laju alir CO₂ sebesar 5 L/min. Waktu diukur berdasarkan kecepatan perubahan warna absorben NaOH 0,01 M dari ungu menjadi bening akibat penambahan indikator phenolptalein (pp) sebanyak 30 tetes. Berdasarkan perubahan warna absorben tersebut dapat diukur waktu absorpsi sampai absorben NaOH habis bereaksi.

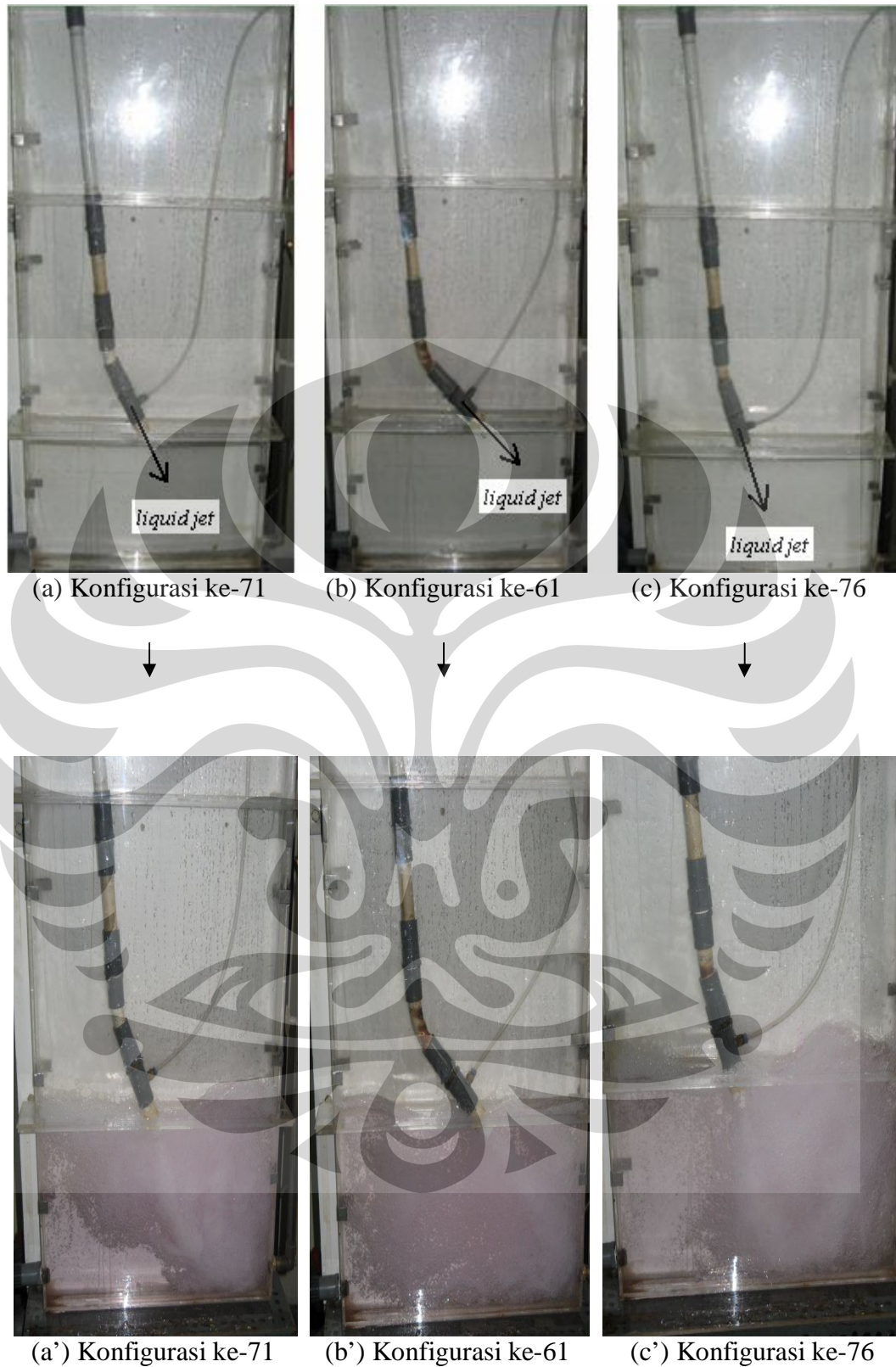
Tabel 4.2 Tiga Konfigurasi Terbaik dan Terburuk Berdasarkan Uji Absorpsi CO₂

Konfigurasi ke-	Sudut (derajat)	Kedalaman <i>nozzle</i> tercelup (cm)	Q_G/Q_L	ε_G	Waktu absorpsi (s)
Tiga konfigurasi terbaik					
71	-60	-2,3	2,46156	0,71111	15,84
61	-40	-2,2	1,99719	0,66635	17,03
76	-70	-2,6	2,02004	0,66888	18,62
Tiga konfigurasi terburuk					
32	-30	58,1	0,13884	0,12192	35,03
53	-20	59,6	3,01944	0,75121	33,31
52	-15	68,3	1,974	0,66375	32,99

Dari hasil uji absorpsi CO₂ diperoleh tiga konfigurasi terbaik seperti terlihat pada tabel 4.2. Semakin singkat waktu absorpsi yang dibutuhkan maka semakin efisien konfigurasi tersebut untuk proses absorpsi. Tiga konfigurasi terbaik yaitu konfigurasi ke 71, 61 dan 76 memberikan waktu absorpsi yang paling singkat (di bawah 20 detik). Untuk konfigurasi yang kurang baik dari hasil uji parameter yaitu konfigurasi ke 32, 53 dan 52 memberikan waktu absorpsi yang paling lama (di atas 30 detik).

Ilustrasi dari ketiga konfigurasi terbaik dapat dilihat pada gambar 4.3. *Nozzle* pada tiga konfigurasi terbaik berada sedikit di atas permukaan cairan atau dengan kata lain *nozzle* tidak tercelup dalam cairan di kolom *flat*. Sedangkan *nozzle* pada tiga konfigurasi terburuk tercelup pada cairan dengan kedalaman yang cukup dalam hingga hampir berada di dasar kolom *flat*. Posisi tersebut tidak memberikan ruang yang cukup bagi *liquid jet* untuk menumbuk cairan dengan optimal karena terhalang oleh dinding kolom *flat* sehingga kemampuan absorpsinya kurang baik. Berbeda dengan konfigurasi terbaik yang kemampuan absorpsinya baik karena terdapat lebih banyak gelembung akibat cukupnya ruang yang tersedia untuk tumbukan *liquid jet* terhadap cairan stagnan yang optimal.

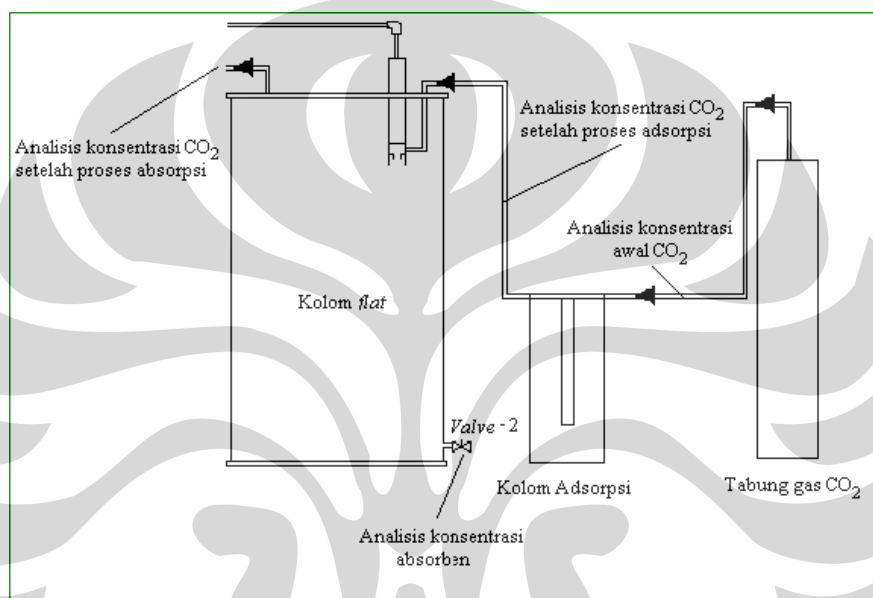




Gambar 4.3 Tiga Konfigurasi Terbaik Sebelum Operasi (a-c) dan Saat Operasi (a'-c')

4.3 Uji Kemampuan Adsorpsi dan Absorpsi Gas CO₂

Uji kemampuan adsorpsi dan absorpsi gas CO₂ dilakukan terhadap tiga konfigurasi terbaik dan terburuk berdasarkan hasil uji absorpsi CO₂ dengan peralatan yang disusun seperti skema pada gambar 4.4. CO₂ berasal dari tabung gas dengan konsentrasi CO₂ awal sebesar 96,60% dan laju alir 5 L/min. Kemudian gas CO₂ dialirkan melewati kolom adsorpsi yang berisi karbon aktif sebelum masuk ke kolom *flat* berisi NaOH 1% untuk proses absorpsi.



Gambar 4.4 Skema Rangkaian Peralatan Untuk Uji Kemampuan Adsorpsi dan Absorpsi Gas CO₂

Pada skema rangkaian peralatan ini, proses adsorpsi diposisikan sebelum proses absorpsi dengan tujuan untuk menghindari masuknya cairan (air atau adsorben) ke dalam kolom adsorpsi sehingga karbon aktif tidak akan basah atau terkontaminasi. Jika basah, karbon aktif tidak akan dapat mengadsorpsi CO₂. Hal ini disebabkan gas tidak dapat mengalir melewati unggun karbon aktif yang sangat rapat. Solusinya adalah dengan menggunakan kompresor bertekanan tinggi. Namun, hal tersebut tidak diperlukan lagi karena tumbukan *liquid jet* yang terjadi dapat menyebabkan gas terhisap masuk dengan sendirinya ke dalam kolom absorpsi melewati kolom adsorpsi tanpa mengalami hambatan dalam hal penurunan tekanan. Oleh karena itu, kompresor tidak diperlukan dan rangkaian peralatan ini dapat dioperasikan pada tekanan atmosferik. Posisi ini juga ditujukan

untuk lebih mengoptimalkan kemampuan proses adsorpsi dalam menurunkan konsentrasi CO₂ karena konsentrasi CO₂ yang keluar dari tabung gas dan masuk ke dalam kolom adsorpsi masih besar.

Tabel 4.3 Kemampuan Adsorpsi dan Absorpsi CO₂ Sesuai Konfigurasi *Liquid Jet Flow*

Konfigurasi ke-	% CO ₂ Awal	Menit ke-	% CO ₂ Output		% Adsorpsi	% Absorpsi	% Penurunan CO ₂
			Adsorpsi	Absorpsi			
71	96,60	4	74,73	0,04	22,64	77,32	99,96
61			73,09	0,07	24,34	75,59	99,93
76			70,60	0,06	26,95	72,99	99,94
32			71,55	0,02	25,93	74,05	99,98
53			76,05	0,01	21,27	78,72	99,99
52			73,54	0,05	23,87	76,08	99,95

$$\% \text{ Adsorpsi} = \left[\frac{\% \text{ CO}_2 \text{ Awal} - \% \text{ CO}_2 \text{ Output Adsorpsi}}{\% \text{ CO}_2 \text{ Awal}} \right] \times 100\% \quad (4.1)$$

$$\% \text{ Absorpsi} = \left[\frac{\% \text{ CO}_2 \text{ Output Adsorpsi} - \% \text{ CO}_2 \text{ Output Absorpsi}}{\% \text{ CO}_2 \text{ Awal}} \right] \times 100\% \quad (4.2)$$

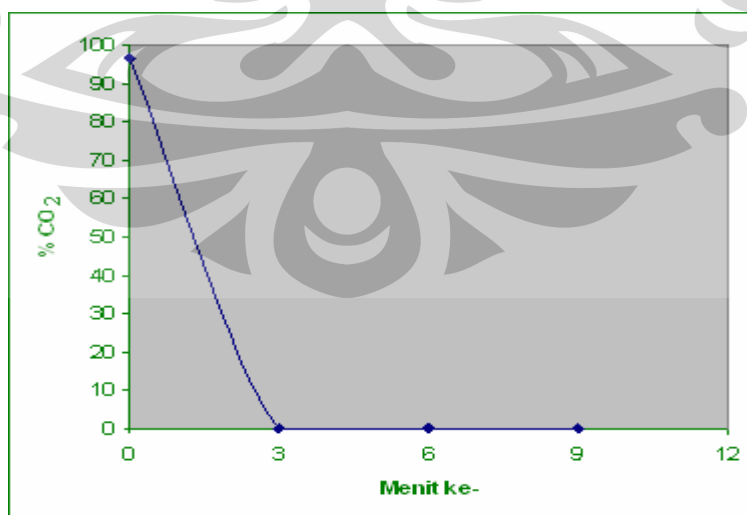
$$\% \text{ Penurunan CO}_2 = \% \text{ Adsorpsi} + \% \text{ Absorpsi} \quad (4.3)$$

Hasil yang diperoleh dari uji kemampuan adsorpsi dan absorpsi disajikan pada tabel 4.3. Sedangkan hasil analisa GC dapat dilihat pada lampiran 4. Perhitungan presentase adsorpsi, absorpsi dan penurunan CO₂ dapat dilihat pada persamaan 4.1 - 4.3. Walaupun proses adsorpsi diposisikan sebelum proses absorpsi, namun ternyata proses absorpsi masih lebih dominan dalam hal penurunan konsentrasi CO₂. Pada menit keempat, konsentrasi CO₂ berkurang dari 96,60% menjadi 70%-76% setelah melewati proses adsorpsi atau dengan kata lain presentase adsorpsi sekitar 21%-26%. Sedangkan proses absorpsi dapat menurunkan konsentrasi CO₂ keluaran kolom adsorpsi dari 70%-76% menjadi 0,01%-0,07% atau di bawah 700 ppm. Presentase penurunan konsentrasi CO₂ dengan proses absorpsi sebesar 72%-78% sehingga menghasilkan presentase

penurunan konsentrasi CO₂ total (dari proses adsorpsi dan absorpsi) di atas 99% atau ~100%.

Kemampuan penyerapan CO₂ dari konfigurasi terbaik maupun terburuk tidak jauh berbeda karena laju alir CO₂ dari tabung gas yang dibuat sama yaitu sebesar 5 L/min. Laju alir sebesar itu mendorong sistem kontak fasa gas-cair untuk seluruh konfigurasi pada kemampuan absorpsi yang sama baik dari aspek *gas entrainment* maupun *hold-up* fasa gas. Sehingga kemampuan dalam menurunkan konsentrasi CO₂ untuk seluruh konfigurasi tidak jauh berbeda yaitu di atas 99%.

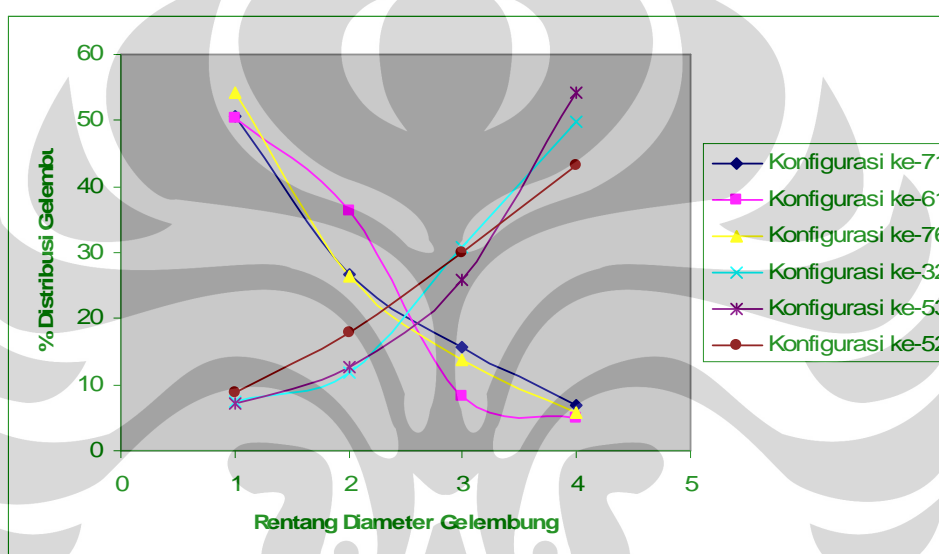
Sebagai ilustrasi hasil dari uji kemampuan adsorpsi dan absorpsi gas CO₂ ditampilkan pada gambar 4.5. Konsentrasi awal CO₂ sebesar 96,60% telah dapat diturunkan menjadi ~0% pada 3 menit pertama. Pada menit-menit berikutnya yaitu menit ke-6 dan menit ke-9 tidak menunjukkan kenaikan konsentrasi CO₂ dalam gas atau dengan kata lain konsentrasi CO₂ dalam gas tetap ~0%. Hal ini menandakan tidak terjadinya proses desorpsi atau absorpsi balik CO₂ menuju fasa gas. Ikatan yang terjadi antara absorben NaOH dengan gas CO₂ dapat dipastikan berupa ikatan kimiawi yang kuat. CO₂ tidak terlepas kembali ke fasa gas walaupun terkena putaran *propeller* pompa yang memberikan energi kinetik pada absorben NaOH untuk dapat melepaskan CO₂ yang telah diikatnya.



Gambar 4.5 Grafik Penurunan Konsentrasi CO₂ Pada Proses Adsorpsi dan Absorpsi Dengan Naoh 1% Pada Konfigurasi ke-71

4.4 Pengukuran Distribusi Gelembung

Selain uji kemampuan adsorpsi dan absorpsi gas CO₂, pada tiga konfigurasi terbaik dan terburuk berdasarkan uji absorpsi CO₂ juga dilakukan pengukuran distribusi gelembung yang hasilnya disajikan pada gambar 4.6. Pada prinsipnya, populasi gelembung yang ideal adalah yang mempunyai distribusi ukuran gelembung yang mengarah pada ukuran diameter gelembung yang sekecil-kecilnya dengan populasi gelembung yang setinggi-tingginya sehingga sistem kontak fasa gas-cair menjadi lebih baik.



Gambar 4.6 Hubungan Rentang Diameter Gelembung Dengan Presentase Distribusi Gelembung Pada Tiga Konfigurasi Terbaik dan Terburuk

Keterangan: Rentang diameter 1 = (0,00097 – 0,00184) mm

Rentang diameter 2 = (0,00273 – 0,00360) mm

Rentang diameter 3 = (0,00449 – 0,00536) mm

Rentang diameter 4 = (0,00625 – 0,00712) mm

Terlihat jelas bahwa pada tiga konfigurasi terbaik yaitu konfigurasi ke-71, 61 dan 76, gelembung yang lebih dominan adalah gelembung dengan rentang diameter yang lebih kecil yaitu 0,00097 - 0,00184 mm. Berlawanan dengan tiga konfigurasi terburuk yaitu konfigurasi ke-32, 53 dan 52 dimana yang lebih dominan adalah gelembung dengan rentang diameter yang lebih besar yaitu 0,00625 – 0,00712 mm. Berdasarkan hasil ini, jelaslah bahwa konfigurasi ke-71,

61 dan 76 lebih baik dibanding konfigurasi ke-32, 53 dan 52 karena distribusi gelembung yang lebih baik sehingga proses penyerapan gas CO₂ berlangsung lebih optimal. Hal ini disebabkan semakin baiknya kualitas gelembung yaitu diameter gelembung yang semakin kecil dan kuantitas gelembung yang semakin besar akan menyebabkan proses perpindahan massa antara fasa gas dan cair yang terjadi juga menjadi semakin baik

4.5 Penentuan Konstanta Laju Reaksi Absorpsi CO₂

Pada konfigurasi terbaik berdasarkan hasil uji absorpsi CO₂ yaitu konfigurasi ke-71 dilakukan percobaan untuk mengetahui konstanta laju reaksi absorpsi CO₂ yang ditentukan menggunakan persamaan:

$$-r_{CO_2} = k[CO_2]^m [NaOH]^n \quad (4.4)$$

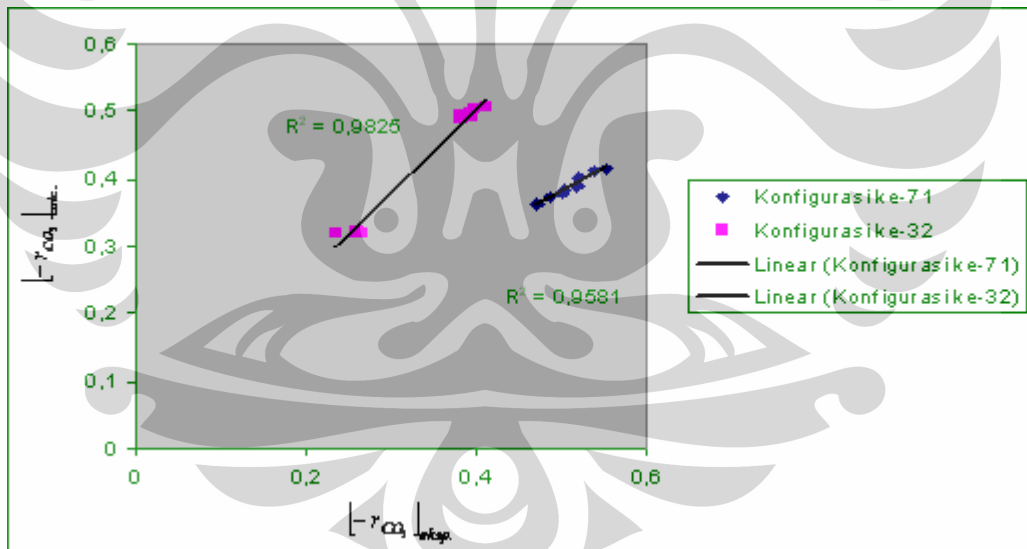
Dari persamaan 4.4 terlihat bahwa laju reaksi absorpsi dipengaruhi oleh konsentrasi CO₂ dan absorben NaOH. Konsentrasi CO₂ diketahui dari analisa sampel gas CO₂ dengan alat GC-TCD, sedangkan konsentrasi absorben NaOH diketahui dari analisa sampel absorben dengan metode titrasi. Perhitungan dilakukan dengan metode regresi linear berganda. Selain pada konfigurasi terbaik, perhitungan juga dilakukan pada konfigurasi terburuk yaitu konfigurasi ke-32 untuk perbandingan. Data-data untuk perhitungan konstanta laju reaksi absorpsi CO₂ dari kedua konfigurasi tersebut dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data-Data Untuk Perhitungan Konstanta Laju Reaksi Absorpsi

$-r_{CO_2} \downarrow_{exp.}$	CO ₂ (mol/L)	NaOH (mol/L)	$\log [-r_{CO_2}]$	$\log [CO_2]$	$\log [NaOH]$	$-r_{CO_2} \downarrow_{calc.}$
Konfigurasi ke-71						
0,5538	16,940	0,2393	-0,2566	1,2289	-0,6210	0,4156
0,5390	9,6800	0,2254	-0,2684	0,9859	-0,6470	0,4121
0,5210	2,6620	0,2150	-0,2831	0,4252	-0,6676	0,4010
0,5194	15,004	0,4975	-0,2845	1,1762	-0,3032	0,3896
0,5031	8,2280	0,4925	-0,2984	0,9153	-0,3076	0,3843
0,5013	1,4762	0,4900	-0,2999	0,1691	-0,3098	0,3687
0,5014	15,246	0,7008	-0,2998	1,1832	-0,1544	0,3786
0,4851	8,7120	0,6875	-0,3142	0,9401	-0,1627	0,3741
0,4707	2,3716	0,6600	-0,3272	0,3750	-0,1805	0,3637

Konfigurasi ke-32						
0,41056	8,4700	0,1750	-0,3866	0,9279	-0,7570	0,5066
0,3935	3,1702	0,1500	-0,4051	0,5011	-0,8240	0,4905
0,2354	2,42e ⁻⁵	0,1375	-0,6283	-4,6162	-0,8617	0,3194
0,3962	8,6636	0,2400	-0,4021	0,9377	-0,6198	0,5031
0,3827	3,5090	0,1500	-0,4172	0,5452	-0,8239	0,4924
0,2605	2,42e ⁻⁵	0,1150	-0,5842	-4,6162	-0,9393	0,3208
0,3944	8,6878	0,3750	-0,4041	0,9389	-0,4260	0,4978
0,3809	3,5574	0,2250	-0,4192	0,5511	-0,6478	0,4878
0,2641	2,42e ⁻⁵	0,1650	-0,5782	-4,6162	-0,7826	0,3180

Pada gambar 4.7 ditampilkan plot grafik antara $(-r_{CO_2})$ yang diperoleh dari hasil eksperimen dengan $(-r_{CO_2})$ dari hasil kalkulasi menggunakan metode regresi linear berganda. Garis linier yang dihasilkan memiliki nilai R^2 lebih besar dari 0,9 atau ~ 1 sehingga harga k , m dan n yang diperoleh dari metode ini dapat digunakan.

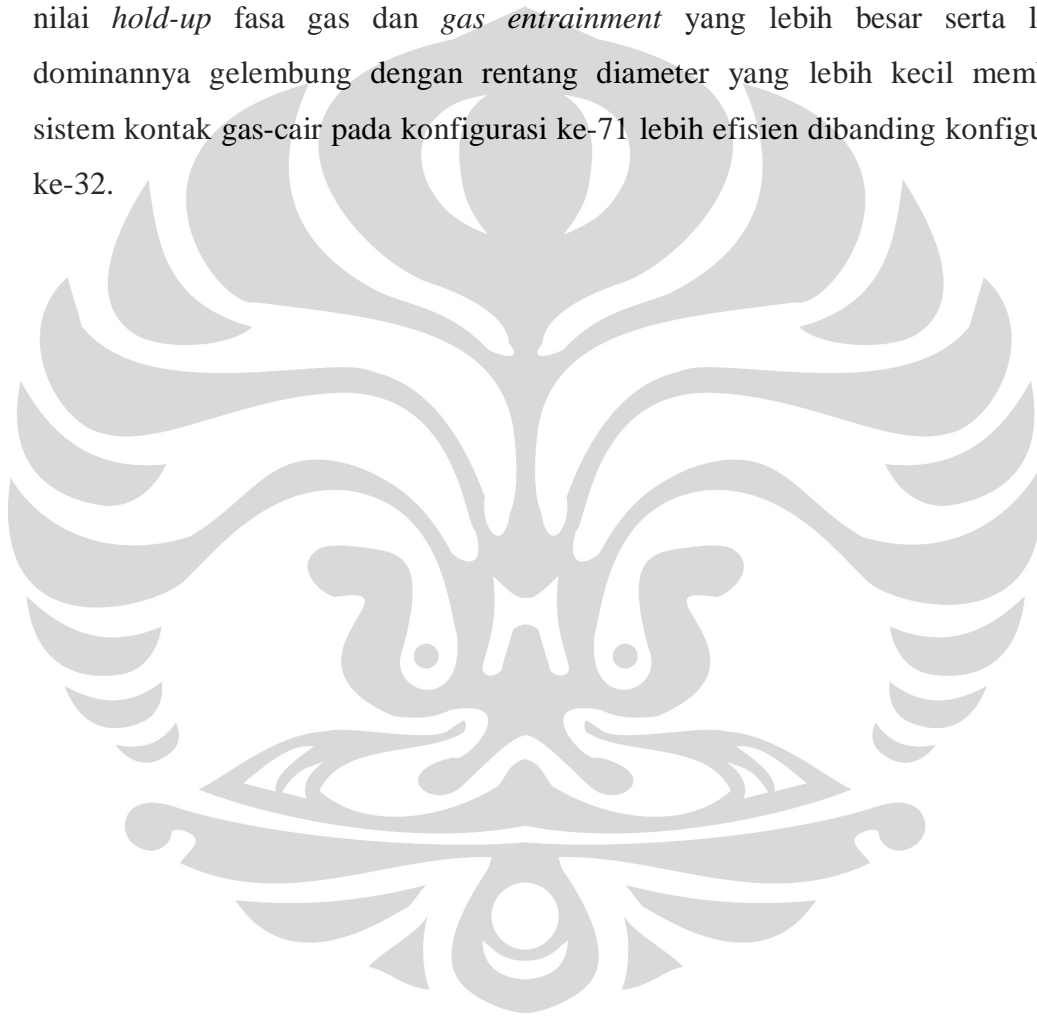


Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Laju Reaksi Absorpsi Hasil Eksperimen dan Kalkulasi

Tabel 4.5 Perbandingan Konstanta Laju Reaksi Absorpsi Pada Konfigurasi Terbaik (71) dan Terburuk (52)

Konfigurasi ke-	k	m	n
71	0,3439	0,0243	-0,0844
32	0,2491	0,0366	-0,0243

Hasil metode regresi linear berganda terlihat pada tabel 4.5. Konfigurasi ke-71 memiliki nilai konstanta laju reaksi total (k) yang lebih besar dan nilai ordo reaksi terhadap CO_2 (m) dan NaOH (n) yang lebih kecil dibanding konfigurasi ke-32. Hal ini menunjukkan bahwa pada konfigurasi ke-71, tingkat tumbukan antara molekul absorben NaOH dengan molekul gas CO_2 lebih besar sehingga lebih mudah terjadi reaksi absorpsi CO_2 oleh NaOH , walaupun jumlah pertemuan antara kedua molekul tersebut lebih rendah dibanding konfigurasi ke-32. Dengan nilai *hold-up* fasa gas dan *gas entrainment* yang lebih besar serta lebih dominannya gelembung dengan rentang diameter yang lebih kecil membuat sistem kontak gas-cair pada konfigurasi ke-71 lebih efisien dibanding konfigurasi ke-32.



BAB 5

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah:

- Konfigurasi terbaik yaitu konfigurasi ke-71 dengan sudut *nozzle* sebesar - 60 derajat dan *nozzle* berada 2,3 cm di atas permukaan cairan
- Konfigurasi *liquid jet flow* memberikan pengaruh yang cukup signifikan dalam aspek uji hidrodinamika dan didapatkan nilai ε_G pada kisaran 0,55 – 0,65 dan rasio Q_G/Q_L bernilai 1,3 – 1,8 untuk konfigurasi terbaik
- Berdasarkan uji kemampuan adsorpsi dan absorpsi gas CO₂, konsentrasi CO₂ berkurang dari 96,60% menjadi 70%-76% setelah melewati proses adsorpsi dan menjadi 0,01%-0,07% setelah melewati proses absorpsi. Penurunan konsentrasi CO₂ ini berlangsung dalam waktu yang singkat (< 5 menit) dan tidak terjadi proses desorpsi atau absorpsi balik
- Pada konfigurasi terbaik, yang lebih dominan adalah gelembung dengan rentang diameter yang lebih kecil (0,00097 - 0,00184 mm). Sedangkan pada konfigurasi terburuk yang lebih dominan adalah gelembung dengan rentang diameter yang lebih besar (0,00625 – 0,00712 mm)
- Konfigurasi terbaik memiliki konstanta laju reaksi absorpsi yang lebih besar ($k = 0,3439$, $m = 0,0243$ dan $n = -0,0844$) dibandingkan konfigurasi terburuk ($k = 0,2491$, $m = 0,0366$ dan $n = -0,0243$)

DAFTAR REFERENSI

- Bergeyk, K.V., & Liedekerken, A.J. (1981). *Teknologi Proses*. Jakarta: Bhrata Karya Aksara.
- Evans, G.M. (1990). A study of a plunging liquid jet bubble column. Phd thesis. Department of Chemical Engineering, University of Newcastle, Newcastle, Pp. 47–74.
- Figuredo, J.L. & Mouljin, J.A. (1986). Carbon and Coal Gasification Science Technology. Boston: *Martinus Nijhoff Publisher*.
- Hasan, A.R. (1995). Void fraction in bubbly and slug flow in downward vertical and incline systems. *SPE Production & Facilities*, 10, pp. 172–176.
- Havelka, P., *et al.* (2000). Hydrodynamic and mass transfer characteristics of ejector loop reactors. *Chemical Engineering Science*, 55, pp. 535–549.
- Ide, M., Uchiyama, H., & Ishikura, T. (2001). Mass transfer characteristics in gas bubble dispersed phase generated by plunging jet containing small solute bubbles. *Chemical Engineering Science*, 56, pp. 6225–6231.
- Ito, Akira. (2000). Maximum penetration depth of air bubbles entrained by vertical liquid jet. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 33, No. 6, pp. 898–900.
- Kundu, G., Mandal, A., & Mukherjee, D. (2003). Interfacial area and liquid-side volumetric mass transfer coefficient in a down flow bubble column. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 81, pp. 212-219.
- Lee, Sheng-Yi & Tsui, Y. Pang. (1998). Succeed at gas/liquid contacting. *Journal American Institute of Chemical Engineering*.
- Maron, S.H. & Lando, J. (1965). *Fundamental of Physical Chemistry* (3rd ed). London: Macmillan Publishing Co. Inc.
- Meikap, B.C., Kundu, G., & Biswas, M.N. (2001). Prediction of the interfacial area of contact in a variable-area multistage bubble column. *Journal of Industrial Engineering Chemical Resources*, 40, pp. 6194 - 6200.
- Othmer, K. (1994). *Encyclopedia of Chemical Technology* (vol. 25) 4th ed. Singapore: Wiley Interscience.

- Ruthven, D.M. *Principles of Adsorption and Adsorption Process*. Singapore: Wiley-Interscience Publication.
- Slamet, Bismo, S. & Arbianti, R. (2007). Modifikasi Zeolit Alam dan Karbon Aktif dengan TiO₂ serta Aplikasinya sebagai Bahan Adsorben dan Fotokatalis untuk Degraasi Polutan Organik. Laporan Hibah Bersaing.
- Sugiarso, E. (1996). Perlakuan Lanjut Karbon Aktif Dengan Impregnasi NaOH Untuk Adsorben CO₂ Serta Karakteristiknya. Bachelor thesis. Depok: Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Yamagiwa, K., & 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. *Journal of Chemical Engineering Japan*, 23(3), pp. 343-348.
- Yang, R.T. (1987). *Gas separation by adsorption processes* (2nd ed). Stoneham: Butterworth Publisher.
- Anonim. (2008). *Activated Carbon* [online]. Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/activatedcarbon> [Accessed 15:04:08].
- Harsanto, D. (2003). *Seberapa Bersih Udara Yang Kita Hirup?* [online]. Available from: <http://www.kompas.com> [Accessed 17:06:08].
- Indartono, Yuli Setyo. (2008). *Meredam Turbulensi - Membuat Air Mengalir (Jauh) Lebih Cepat* [online]. Available from: <http://www.beritaiptek.com/> [Accessed 04:06:08].
- Liu, G. & Evans, G.M. (1998). *Gas Entrainment and Gas Holdup in a Confined Plunging Liquid Jet Reactor*. [online]. Available from: <http://www.www.MultiphaseNewcastle.edu> [Accessed 04:06:08].
- Noverri, P. (2008). *Aplikasi Membran Kontaktor Untuk Pemisahan CO₂* [online]. Available from: <http://www.majarikanayakan.com> [Accessed 4:06:08].
- Rabindran. (2001). *Gas-Liquid Reactor* [online]. Available from: <http://www.Chemsoc.org/exemplarchem/entries/2001> [Accessed 27:07:08].
- Sulastri, H. (2008). *Isu Global Warming Yang Mendingin* [online]. Available from: <http://www.kompas.com> [Accessed 25:04:08].