PENGARUH KONFIGURASI LIQUID JET FLOW KOLOM GELEMBUNG TERHADAP KEMAMPUAN ABSORPSI GAS KARBONDIOKSIDA

Setiadi*, Dijan Supramono, Sukirno, dan Nur Istiqomah
Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Kampus Baru UI Depok 16434
Email: setiadi@che.ui.ac.id

Abstrak

Upaya meningkatkan kinerja absorpsi gas CO₂ yang memanfaatkan kolom gelembung dan *liquid jet flow* telah banyak dilakukan. Keunggulan kolom gelembung dalam riset ini adalah kolom menyebabkan *gas entrainment* (pengisapan gas) dan dispersi gas ke dalam cairan yang membentuk awan gelembung. Pemilihan konfigurasi *liquid jet flow* terbaik berdasarkan posisi nosel dan arah sudut tembakannya dan dengan mengukur rasio laju volumetrik aliran *gas entrainment* terhadap laju volumetrik aliran cairan (Q_G/Q_L) serta *gas hold-up* untuk setiap konfigurasi. Konfigurasi terbaik digunakan untuk menentukan kinerja kolom gelembung untuk mendapatkan kinerja kemampuan absorpsi yang setinggi-tingginya. Uji absorpsi dilakukan terhadap konfigurasi terbaik dengan menggunakan absorben larutan NaOH dengan laju alir 5 L/min pada tekanan atmosferik dan umpan gas CO₂ dengan kadar 96,6%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi memberikan pengaruh cukup signifikan dan bahwa konfigurasi terbaik memberikan *gas hold-up* kisaran 0,55-0,65 dan rasio Q_G/Q_L bernilai 1,3-1,8. Uji absorpsi menunjukkan berkurangnya kadar CO₂ menjadi 0,01% hingga 0,07% setelah absorpsi kurang dari 5 menit dan tetap tidak berubah sampai 10 menit. Hal ini menandakan bahwa absorpsi terjadi secara kimiawi antara gas CO₂ dan NaOH and tidak terjadi desorpsi walaupun kolom gelembung tetap resirkulasi. Populasi gelembung menunjukkan distribusi ukuran gelembung lebih dominan pada rentang diameter antara 0,00097-0,00184 mm.

Kata Kunci: Konfigurasi *liquid jet*, kolom gelembung, *gas entrainment*, absorpsi gas CO₂

Abstract

Efforts to improve the performance of CO₂ absorption using bubbling columns and liquid jet flow have consistently been developed. The advantage of the present column is the presence of gas entrainment by suction of nozzle and the gas dispersed throughout the bulk of liquid by the formation of bubble clouds. The selection of liquid jet flow configuration used parameters of nozzle position and liquid jet inclination. The configurations have been examined by hydrodynamic test by measuring the ratio of volumetric rate of gas to that of liquid exiting nozzle (Q_G/Q_L) and gas holdup. Absorption test to the best configuration used NaOH solution with flowrate of 5 litres/min at atmospheric pressure and CO₂ gas feed of 96.6%. The results showed that the configurations of liquid jet flow gave significant effect on hydrodynamics and that the best configurations had gas hold-up in the range of 0.55-0.6 and Q_G/Q_L 1.3-1.8. Absorption tests showed that CO₂ concentration can be reduced into 0.01%-0.07% in less than five minutes and the absorption should proceed with the chemical reaction up to 10 minutes with no indication of CO₂ desorption. The bubbles were generated in the column predominantly in the diameter range of 0.00097-0.00184 mm.

Keywords: Configurations of liquid jet, bubble column, gas entrainment, CO₂ gas absorption

*korespondensi

1. Pendahuluan

Gas CO₂ merupakan salah satu gas penyebab efek rumah kaca pada lapisan atmosfer bumi, yang diduga kuat bisa menimbulkan efek *global warming*. Untuk mencegah semakin meluasnya efek tersebut, emisi gas CO₂ harus dikurangi. Salah satu cara untuk mengurangi emisi gas CO₂ 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 secara luas 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).

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 dkk., 2001). Selain itu, pencampuran yang terjadi antara fasa gas-cair diperoleh sendiri dari gerakan tumbukan cairan yang mengenai cairan stagnan dalam kolom, gas akan terhisap dan terdispersi ke dalam cairan lebih sempurna. 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*.

Permasalahan yang timbul adalah apabila awan gelembung yang terbentuk di dalam cairan menjadi media stagnan yang dikenai tumbukan *liquid jet*, maka tumbukan tersebut sudah tidak efektif untuk bisa menimbulkan awan gelembung lagi karena semakin sulit terbentuknya lubang terompet yang berfungsi sebagai perangkap gas. Serta cairan arus pusaran eddy sudah menjadi aliran 2 fasa gas-cair, sehingga momentum tumbukannya juga berkurang. Arus pusaran eddy tersebut sangat berpengaruh terhadap pembentukan awan gelembung (Yamagiwa dan Kusabiraki, 1990).

Penelitian yang mengungkap secara detail tentang pengaruh konfigurasi terhadap kemampuan absorpsi masih langka. Pada tahun 2000, Akira dkk. telah mengamati korelasi antara kedalaman penetrasi gelembung terhadap efek geometri nosel. Namun, hal tersebut hanya dilakukan pada *vertical liquid jet* dengan posisi nosel dengan hanya beberapa sudut di atas permukaan cairan atau tidak tercelup.

Pada dasarnya semakin banyak awan gelembung yang dihasilkan maka semakin efektif perpindahan massa CO₂ ke dalam fasa cair, sehingga absorpsi berlangsung jauh lebih efektif. Oleh karenanya, penelitian ini bermaksud melakukan pengamatan tentang pengaruh konfigurasi *liquid jet flow* terhadap kemampuan absorpsi gas CO₂ dengan mempertinggi awan gelembung yang terbentuk di dalam cairan. Yang dimaksudkan dengan konfigurasi dalam penelitian ini adalah variasi posisi nosel, dalam hal ini berupa sudut dan kedalaman nosel tercelup yang melepaskan *liquid jet* ke dalam cairan dalam kolom gelembung pancaran.

Sedangkan kemampuan absorpsi CO₂ ditentukan oleh jumlah gas yang terhisap (*gas entrainment* = Q), *hold-up* gas (ϵ_g) dan distribusi gelembung. Penelitian ini bermaksud untuk mengukur besaran parameter-parameter tersebut dalam berbagai kondisi setiap konfigurasi *jet flow*. Berdasar parameter tersebut, penelitian ini bertujuan untuk memperoleh konfigurasi *liquid jet flow* dalam sistem kontak antara fasa gas dan cair (*hold-up* fasa gas dan *gas entrainment*) yang optimal.

Dasar Teori

Fenomena dasar dari prinsip konfigurasi untuk kontak gas-cair yang

didesain ini adalah berdasarkan terbentuknya terompet permukaan stagnan yang diakibatkan oleh tumbukan *liquid jet* berkecepatan tinggi dengan cairan yang stagnan seperti diilustrasikan pada Gambar 1). Tumbukan tersebut mengakibatkan gas akan terhisap dan terperangkap lubang terompet dan terbentuk lapisan film gas diantara cekungan terompet dan *liquid jet*. Diperkirakan terbentuknya awan gelembung gas terjadi akibat lapisan film gas mengalami pemecahan akibat tumbukan arus pusaran eddy yang timbul dari pusaran cairan yang menumbuk downcomer (Evans, 1990).

Laju gas yang terhisap dipengaruhi oleh kedalaman penetrasi gelembung dari pancaran jatuh cairan. Kedalaman penetrasi gelembung memiliki korelasi terhadap efek geometri nosel (Akira dkk., 1990).

Gambar 1. Ilustrasi fenomena tumbukan jet pada permukaan cairan yang stagnan (Evans, 1990).

Terdapat tiga daerah hidrodinamika pada *jet bubble column* seperti terlihat pada Gambar 2 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).

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.

Gambar 2. Definisi daerah hidrodinamik kolom gelembung pancaran (Evans, 1990).

2. Metodologi

Gas CO₂ dari tabung dialirkan menuju kolom flat yang berisi cairan absorbent NaOH 0,01 M dengan laju alir sebesar 5 L/menit dan kadar 96,6 %. Penempatan nosel diposisikan dengan sudut yang ditentukan dengan menggunakan foto kamera. Cairan dimasukkan ke kolom *flat* hingga mencapai nosel tercelup sampai kedalaman yang diinginkan. Pengukuran laju alir volumetrik cairan (Q_L) diketahui dari meteran air, tekanan cairan diketahui dari *pressure indicator* dan laju alir gas diketahui dari perbedaan ketinggian dalam manometer CCl₄ yang telah dikalibrasi dengan menggunakan *bubble soap flowmeter*. Cairan dipancarkan oleh kepala nosel ke dalam kolom *flat* sehingga gas akan terhisap melalui lubang yang terdapat pada bagian samping kepala nosel. *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 CO₂ dengan menggunakan absorbent NaOH dan gas CO₂. Saat uji operasi, diambil sampel gas CO₂ sebelum dan sesudah masuk ke kolom *flat*.

Sampel tersebut kemudian dianalisa dengan alat *Gas Chromatography*. Prosedur di atas pun diulangi kembali.

Gambar 3. Skema rangkaian peralatan

Gambar 4. Berbagai sketsa posisi nosel terhadap permukaan cairan.

Macam-macam sudut *jet* untuk posisi *nozzle* di atas permukaan cairan
(a)

Macam-macam sudut *jet* untuk posisi *nozzle* di bawah permukaan cairan
(b)

Gambar 5. Berbagai sketsa sudut nosel

Konfigurasi *liquid jet flow* didefinisikan sebagai sudut dan posisi nosel dari permukaan cairan di kolom *flat*. Sketsa konfigurasi *liquid jet flow* seperti terlihat pada Gambar 4. Penempatan nosel bisa dalam posisi tercelup maupun tidak tercelup tercelup. Nosel yang tidak tercelup berada di atas permukaan cairan (Gambar 4a), sedangkan nosel yang tercelup berada di

dalam cairan pada kolom *flat* dengan kedalaman yang divariasikan antara 0 - 60 cm (Gambar 4 b-d). Untuk nosel yang tidak tercelup, hanya beberapa sudut yang dapat dilakukan yakni 0-90° sudut tembakan (Gambar 5 a). Sedangkan untuk nosel yang tercelup (Gambar 5 b), lebih banyak variasi sudut yang dapat dilakukan walaupun untuk kedalaman nosel tercelup yang cukup dalam (~60 cm). Dari variasi posisi nosel tersebut didapatkan ada 82 jenis variasi konfigurasi *jet flow*.

Pengukuran sudut dan kedalaman untuk masing-masing konfigurasi diilustrasikan pada Gambar 6. Pengukuran sudut tumbukan *liquid jet* berdasarkan arah horizontal berlawanan dengan arah jarum jam. Pengukuran tersebut dilakukan dengan pengambilan data foto seluruh konfigurasi sebelum eksperimen dioperasikan. Posisi sudut tembakan *jet* bernilai positif antara 0-90 derajat (di atas garis horizontal) dan bernilai negatif bila sudut tembakkannya dengan arah dibawah horizontal. Sedangkan posisi kedalaman nosel diukur dari permukaan cairan sampai dengan posisi nosel.

Gambar 6. Prosedur pengukuran sudut dan kedalaman nosel tercelup

Untuk pengujian kemampuan absorpsi CO₂ terhadap 82 jenis konfigurasi, dilakukan seleksi dengan uji hidrodinamika berdasarkan parameter *gas entrainment* dan *hold-up* fasa gas untuk menentukan konfigurasi terpilih. *Gas entrainment* diukur dengan mengambil data sampel gas yang terhisap masuk ke dalam cairan kolom. Sedangkan *hold-up* fasa gas adalah fraksi fasa gas dalam kolom, diukur berdasarkan laju alir *gas entrainment* serta laju cairan.

Uji absorpsi CO₂ dilakukan dengan menggunakan konsentrasi gas CO₂ awal

sebesar 96,60% dan laju alir CO_2 sebesar 5 L/min. Parameter absorpsi yang diukur adalah waktu absorpsi, diukur berdasarkan perubahan warna absorben NaOH 0,01 M dari ungu menjadi bening dengan menggunakan indikator phenolptalein. Perubahan warna absorben tersebut menandakan absorben NaOH habis bereaksi dengan gas CO_2 dan sebagai patokan waktu absorpsi.

Untuk mengukur populasi gelembung, dilakukan pengambilan foto gelembung dalam kolom *flat*. Berdasarkan data foto tersebut, diukur diameter berbagai gelembung melalui layar komputer dengan menggunakan standar diameter pipa tercelup yang telah diketahui ukurannya. Dilakukan perhitungan persentase distribusi jumlah gelembung berdasarkan jumlah gelembung pada rentang diameter tertentu terhadap populasi diameter gelembung keseluruhan yang terukur.

3. Hasil dan Pembahasan

Pemilihan konfigurasi

Pemilihan konfigurasi terbaik berdasarkan *gas entrainment rate* dan *hold-up* fasa gas yang setinggi-tingginya. Gambar 7 memperlihatkan hasil pengujian hidrodinamika dari 82 jenis konfigurasi dimana hasil pengukuran *hold-up* fasa gas (ϵ_g) meningkat secara parabolik terhadap kenaikan rasio laju alir gas terhadap laju alir cairan (Q_g/Q_L). Dari gambar terlihat bahwa dari konfigurasi yang diujikan setidaknya ada 5 konfigurasi terbaik dengan nilai ϵ_g antara 0,6-0,7 dan rasio Q_g/Q_L berkisar di atas 2. Ternyata ada harga ϵ_g dan Q_g/Q_L dibawah 0,3 dan 0,4. Ini menandakan bahwa desain konfigurasi *liquid jet* dari hasil penempatan nosel memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sistem kontak gas-cair. Berdasarkan data hasil uji hidrodinamika diperoleh 5 jenis konfigurasi terbaik (Tabel 1) dari 82 jenis konfigurasi. Posisi nosel kelima jenis konfigurasi tersebut ternyata berada di sekitar permukaan air dengan kedalaman maksimal sekitar 2,3 cm serta sudut tembakan dengan kemiringan arah kebawah 40-70°. Dan ternyata *hold-up* gas dan rasio gas di bawah 0,3 dan 0,4 dihasilkan dari konfigurasi dengan posisi nosel dibawah permukaan air. Hasil ini memperlihatkan bahwa konfigurasi kolom gelembung dengan menggunakan *jet flow* dengan posisi nosel dibawah permukaan cairan mempunyai kemampuan kinerja yang lebih baik dalam kontak gas dan cair dibandingkan dengan penempatan nosel di atas permukaan air.

Gambar 7. Pemilihan konfigurasi berdasarkan *gas entrainment* & *hold-up* gas.

Tabel 1. Konfigurasi Terpilih Hasil Uji Hidrodinamika dan Absorpsi

Sudut (der)	Posisi Nosel (cm)	Q_g/Q_L	ϵ_g	Waktu absorpsi (detik)
-60	-2,3	2,47	0,71	15,84
-40	-2,2	2,00	0,67	17,03
-70	-2,6	2,02	0,67	18,62
-55	-1,6	2,22	0,69	20,87
-80	0,7	1,94	0,66	21,62
25	48,6	0,40	0,29	25,88
35	46,2	0,40	0,29	28,66
30	58,1	0,14	0,12	35,03
20	49,6	0,39	0,28	24,34
60	41,3	0,26	0,21	29,82

Uji absorpsi CO_2

Uji absorpsi terhadap konfigurasi terpilih dari hasil uji hidrodinamika hasilnya dapat dilihat Tabel 1 (kolom 5). Uji absorpsi digunakan konsentrasi CO_2 awal sebesar 96,60% dan laju alir CO_2 sebesar 5 L/min. Pengukuran waktu absorpsi ditandai dengan perubahan warna dari ungu menjadi bening akibat dengan menggunakan indikator phenolptalein (pp). Perubahan warna absorben tersebut menandakan waktu absorpsi saat absorben NaOH telah habis bereaksi. Seperti nampak pada tabel bahwa hasil uji hidrodinamika sejalan dengan hasil uji absorpsi CO_2 . Konfigurasi dengan nilai ϵ_g di atas 0,6 dan rasio Q_g/Q_L di atas 2 menghasilkan absorpsi CO_2 dengan waktu yang lebih cepat (dibawah 20 detik) dibandingkan dengan konfigurasi rentang ϵ_g dan Q_g/Q_L yang rendah (dibawah 0,3 dan 0,4). Oleh karenanya dapat disimpulkan bahwa adanya pengaruh yang signifikan konfigurasi *jet flow* kolom gelembung terhadap parameter hidrodinamika (ϵ_g , Q_g/Q_L) dan laju absorpsi.

Absorpsi kimiawi

Uji kemampuan absorpsi gas CO_2 menggunakan NaOH 1% disajikan pada Gambar 8. Konsentrasi awal CO_2 sebesar 96,60% dapat diturunkan menjadi $\sim 0\%$ dalam waktu 3 menit pertama. Pada rentang waktu berikutnya (menit ke-6 dan ke-9) ternyata tidak menunjukkan kenaikan konsentrasi CO_2 dan konsentrasi CO_2 dalam gas tetap $\sim 0\%$. Hal ini menandakan tidak terjadinya proses desorpsi atau absorpsi balik CO_2 menuju fasa gas. Ikatan yang terjadi antara absorben NaOH dengan gas CO_2 dapat dipastikan berupa ikatan kimiawi yang kuat. Komponen gas CO_2 tidak terlepas kembali ke fasa gas walaupun cairan absorben terkena putaran *propeller* pompa yang memberikan energi kinetik pada cairan absorben NaOH untuk dapat melepaskan kembali CO_2 yang telah diikatnya.

Gambar 8. Kurva penurunan konsentrasi CO_2 dalam rentang waktu panjang

Distribusi gelembung

Aspek distribusi gelembung cukup penting diukur, karena efektivitas kontak gas-cair dari proses absorpsi juga ditentukan oleh populasi gelembung yang terbentuk di dalam cairan. Pada prinsipnya, kontak fasa gas-cair yang ideal apabila diameter gelembung yang terbentuk seminimal mungkin dengan jumlah dan dispersi gelembung yang semaksimal mungkin. Gambar 9 merupakan hasil pengukuran populasi gelembung dalam rentang diameter untuk tiga konfigurasi terbaik dan terburuk berdasarkan uji absorpsi CO_2 .

Terlihat jelas bahwa pola kurva untuk tiga konfigurasi terbaik, populasi gelembung yang lebih dominan adalah gelembung dengan rentang diameter yang lebih kecil yaitu 0,00097-0,00184 mm. Berbeda dengan tiga konfigurasi kurang baik (*hold up* gas dan rasio gas rendah) pola kurva mengarah pada populasi gelembung dengan rentang diameter

yang lebih besar yaitu 0,00625-0,00712 mm. Berdasarkan hasil ini, jelaslah bahwa konfigurasi dengan *gas hold-up* dan rasio Q_G/Q_L yang tinggi menghasilkan populasi awan gelembung dengan diameter yang sekecil-kecilnya dan jumlah yang sebesar-besarnya. Sistem kontak gas-cair dengan terbentuknya awan gelembung tersebut sangat efektif untuk melangsungkan proses absorpsi CO_2 . Karena proses absorpsi melibatkan proses perpindahan massa dengan memerlukan luas kontak yang setinggi-tingginya yang diciptakan oleh gelembung yang terbentuk tersebut.

Gambar 9. Distribusi rentang diameter gelembung

4. Kesimpulan

Desain konfigurasi *jet flow* kolom gelembung memberikan pengaruh yang signifikan terhadap hasil parameter hidrodinamika (ϵ_G , Q_G/Q_L), laju absorpsi serta populasi terbentuknya gelembung di dalam cairan. Didapatkan bahwa posisi nosel untuk konfigurasi yang baik ternyata berada di sekitar permukaan air dengan kedalaman maksimal sekitar 2,3 cm serta sudut tembakan arah kebawah dengan antara $40-70^\circ$. Konfigurasi dengan didapatkan nilai ϵ_G di atas 0,6 dan rasio Q_G/Q_L di atas 2 menghasilkan absorpsi CO_2 dengan waktu yang lebih cepat (di bawah 20 detik). Ikatan yang terjadi antara absorben NaOH dengan gas CO_2 dapat dipastikan berupa ikatan kimiawi. Desain konfigurasi dengan *gas hold-up* dan rasio Q_G/Q_L yang tinggi menghasilkan populasi awan gelembung dengan diameter yang sekecil-kecilnya.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada segala pihak yang telah ikut terlaksananya kelancaran penelitian ini, terutama laboratorium Kimia Fisika, Teknik

Kimia-UI. Serta pihak DP2M-DIKTI telah memberikan dukungan dana dalam bentuk Penelitian Hibah Bersaing XVI (2008-2009)

Daftar Notasi

ε_G = Hold-up fasa gas

Q_G = Laju alir volumetrik gas (L/min)

Q_L = Laju alir volumetrik cairan (L/min)

Daftar Pustaka

Akira, I.; Yamagiwa, K.; Tajima, K.; Yoshida, M.; Ohkawa, A., *Maximum Penetration Depth of Air Bubbles Entrained by Vertical Liquid Jet*, Journal of Chemical Engineering of Japan, 2000, Vol. 33(6), 898-900.

Evans, G. M., *A Study Of A Plunging Jet Bubble Column*, Doctor Thesis, The University of Newcastle, Australia, 1990.

Ide, M.; Uchiyama, H.; Ishikura, T., *Mass transfer characteristics in gas bubble dispersed phase generated by plunging jet containing*

small solute bubbles, Chemical Engineering Science, 2001, Vol. 56(21-22), 6225-6231.

Lee, S. Y.; Tsui, P., *Succeed at Gas/Liquid Contacting*, Chemical Engineering Progress, 1998, Vol. 95(7), 23-49.

Liu, G.; Evans, G. M., *Gas Entrainment and Gas Hold up in a Confined Plunging Liquid Jet Reactor*, Proceedings of the 26th Australasian Chemical Engineering Conference 1998, E1, Port Douglas, Australia, 1998.

Rabindran, *Gas-Liquid Reactor*, <http://www.Chemsoc.org/exemplarchem/entries/2001> (akses November 2007).

Yamagiwa, K.; Kusabiraki, D.; *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, 1990, Vol. 23(3), 343-348.