



Pengaruh *Nozzle* Terhadap Aspek Hidrodinamika Kinerja Kolom Gelembung Pancaran

The Effect of Nozzle on the Performance of Jet Bubble Column Hydrodynamic

Didiek Hari Nugroho^{1*}, Adisalamun², Izarul Machdar²

¹Politeknik Aceh, Jl. Polikenik Aceh, Pango Raya, Banda Aceh, Provinsi Aceh

²Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No.7, Darussalam, Banda Aceh, Provinsi Aceh, 23111

*E-mail: nugroho@politeknikaceh.ac.id

Abstrak

Kolom gelembung pancaran merupakan salah satu alat perpindahan massa antara fasa gas dan cair. Penelitian ini bermaksud untuk mempelajari pengaruh nozzle terhadap aspek hidrodinamika antara lain: kedalaman penetrasi gelembung (Z), *holdup* gas (ε_g), dan laju alir volumetrik gas *entrainment* (Q_i) yang terjadi dalam kolom gelembung pancaran. Variabel proses yang dipelajari antara lain laju alir volumetrik cairan (10-50 L/menit), ukuran diameter nozzle (0,008-0,0127 m), dan tinggi nozzle (0,125-0,25 m). Hasil penelitian memperlihatkan bahwa ukuran diameter nozzle semakin kecil dan laju alir volumetrik cairan yang semakin besar menghasilkan laju alir volumetrik gas *entrainment*, *holdup* gas, dan kedalaman penetrasi gelembung yang semakin besar.

Kata kunci: gas *entrainment*, hidrodinamika, *holdup* gas, kedalaman penetrasi gelembung, kolom gelembung pancaran

Abstract

Jet bubble column is one of gas-liquid mass transfer means. The purpose of this research is to study the effects of nozzle on the hydrodynamic aspect; the depth of bubble penetration (Z), gas holdup (ε_g), and volumetric flow rate of gas *entrainment* (Q_i) in the jet bubble column. Process variables studied are as follows: fluid volumetric flow rate (10-50 L/min), the size of nozzle diameter (0.008 to 0.0127 m), and height of nozzle (0.125-0.25 m). The results showed that the smaller nozzle diameter and fluid volumetric flow rate generate increasingly large volumetric flow rate of gas *entrainment*, gas holdup, and the depth of bubble penetration.

Keywords: depth of bubble penetration, gas *entrainment*, gas holdup, hydrodynamic, jet bubble column

1. Pendahuluan

Proses perpindahan massa fasa gas ke dalam fasa cair banyak ditemui dalam industri, seperti pada industri kimia dan petrokimia. Dalam hal ini kolom gelembung pancaran yang berfungsi sebagai alat kontak antara fasa gas-cair secara luas ditemui di dalam proses aerasi natural dan sistem industri, termasuk pabrik kimia, pengolahan mineral, dan pengolahan air limbah pupuk (Nugroho dkk., 2014). Hal ini sangat menguntungkan karena adanya pencampuran yang kuat antara fasa gas-cair dan terbentuknya gelembung kecil dalam cairan (Ide dkk., 2001; Kundu dkk., 1997).

Prinsip kerja alat ini cukup sederhana, yaitu fasa gas akan terhisap dan turun melalui lubang cairan stagnan berbentuk seperti terompet yang diakibatkan oleh tumbukan

cairan berkecepatan pancaran. Tumbukan tersebut akan mengakibatkan pecahnya lapisan film cairan, sehingga gas-gas akan terperangkap dalam cairan yang berbentuk seperti gelembung-gelembung awan (Evans dkk., 2001). Laju gas *entrainment* ini dipengaruhi oleh kedalaman penetrasi gelembung dari pancaran jatuh cairan, diameter *nozzle*, tinggi nozzle, rasio antara panjang nozzle dengan diameter nozzle, dan sifat fisik dari cairan (Harby dkk., 2014). Faktor yang mempengaruhi harga (Q_g/Q_i) merupakan parameter dasar dari kecepatan cairan keluar dari nozzle, panjang *jet*, sudut *jet*, diameter *nozzle*, dan sifat fisik dari cairan (Baawain dkk., 2012). Kedalaman penetrasi maksimum gelembung memiliki korelasi terhadap efek geometri *nozzle* (Ito dkk., 2000; Montes dkk., 2014).

Fenomena jatuhnya cairan secara vertikal menuju ke permukaan cairan akan menarik udara sekelilingnya masuk ke dalam kolom dan mengakibatkan gelembung udara kecil di sepanjang alirannya. Jika kecepatan cairan cukup tinggi, gelembung-gelembung udara akan tertarik ke bawah, yaitu mengikuti gerakan cairan dan kemudian akan naik ke permukaan cairan tersebut.

Aliran cairan yang pelan tidak akan membentuk jumlah gelembung udara yang signifikan, tetapi aliran yang lebih cepat akan membentuk gelembung-gelembung yang dapat menimbulkan awan gelembung (Setiadi dkk., 2008). Pada fenomena tersebut akan terjadi suatu proses perpindahan massa udara ke dalam cairan. Kecepatan aliran cairan ini juga sangat bergantung kepada bentuk nozzle, diameter nozzle, dan jarak nozzle dengan permukaan air (Ide dkk., 2001; Ito dkk., 2000; Yamagiwa dkk., 1989).

Karena kecepatan aliran cairan bergantung pada nozzle maka penelitian ini bermaksud untuk mempelajari pengaruh nozzle terhadap aspek hidrodinamika antara lain: kedalaman penetrasi gelembung, holdup gas, dan gas *entrainment* yang terjadi dalam kolom gelembung pancaran.

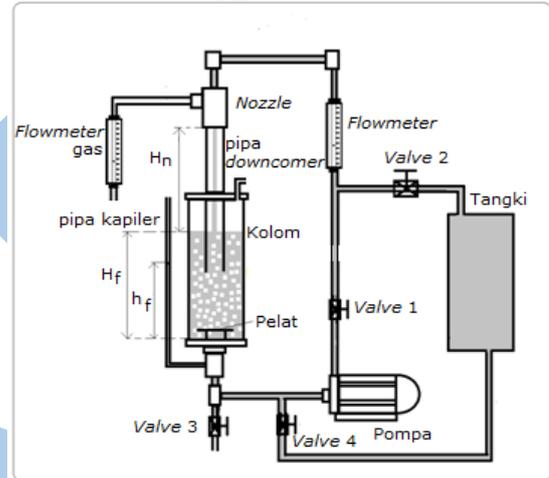
2. Metodologi

2.1. Metode Penelitian

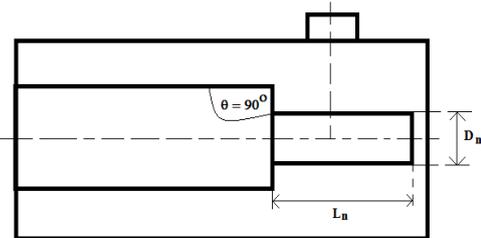
Bahan yang digunakan dalam kolom adalah air. Skema rangkaian peralatan ditunjukkan pada Gambar 1. Kolom gelembung pancaran terdiri atas kolom (tabung luar) dan pipa *downcomer* (tabung dalam) terbuat dari silinder *acrylic* yang memiliki diameter masing-masing 0,1 m dan 0,036 m dengan ketebalan 0,002 m, dan tinggi 0,8 m. Mula-mula air dialirkan dengan menggunakan pompa ke dalam kolom dengan volume 10 L. Laju alir volumetrik cairan diatur dengan pengaturan *valve* 1. Proses udara masuk (gas *entrainment*) terjadi karena adanya cairan yang keluar dari *nozzle* berkecepatan pancaran (*jet*) menumbuk cairan stagnan yang ada di dalam kolom. Laju volumetrik udara yang terhisap masuk ke dalam kolom (Q_g) diukur dengan *flowmeter*. Proses kontak antara air dan udara akan mengakibatkan timbulnya gelembung-gelembung udara kecil yang akan mempengaruhi perbedaan ketinggian air limbah yang terdapat pada kolom (H_f) dan pipa kapiler tambahan (h_f). Data panjang kedalaman penetrasi maksimum gelembung

(Z) diperoleh dari alat ukur yang terdapat pada kolom.

Variabel kondisi proses untuk studi ini, dilakukan variasi diantaranya diameter *nozzle* (D_n) pada 0,008, 0,01, 0,012, dan 0,0127 m, tinggi *nozzle* (H_n) pada 0,125, 0,15, 0,2, dan 0,25 m, dan laju alir volumetrik cairan (Q_l) pada 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 L/menit. Bentuk *nozzle* ditunjukkan pada Gambar 2 dengan sudut kontraksi *nozzle* (θ) 90° .



Gambar 1. Skema rangkaian peralatan kolom gelembung pancaran



Gambar 2. Bentuk *nozzle*

2.2. Perhitungan Korelasi Kedalaman Penetrasi Maksimum Gelembung Udara

Kedalaman penetrasi didefinisikan sebagai titik terendah dimana kecepatan gelembung menjadi nol dan kekuatan daya apung akan lebih dominan (Q_u dkk., 2013). Dalam hubungan laju udara yang terhisap masuk ke dalam kolom terhadap jatuhnya cairan pancaran, efek sudut kontraksi *nozzle* dan panjang *nozzle* merupakan korelasi persamaan yang sebelumnya dilakukan oleh para peneliti (Ito dkk., 2000).

$$\frac{Z}{D_n} = 0,76 \left(\frac{L_n}{D_n} \right)^A \left(\frac{H_n}{D_n} \right)^B 10^{f(Fr)} (\sin \theta)^{0,28} \quad (1)$$

$$f(Fr) = C + D(\log Fr) + E(\log Fr)^2 \quad (2)$$

$$Fr = \frac{V_n}{\sqrt{gD_n}} \quad (3)$$

Apabila Pers. (3) disubstitusikan ke Pers. (2), dan hasilnya disubstitusikan ke Pers. (1) akan diperoleh:

$$\frac{Z}{D_n} = 0,76 \left(\frac{L_n}{D_n} \right)^A \left(\frac{H_n}{D_n} \right)^B 10^{C+D \left[\log \left(\frac{V_n}{\sqrt{gD_n}} \right) + E \left(\log \left(\frac{V_n}{\sqrt{gD_n}} \right) \right)^2 \right] (\sin \theta)^{0,28}} \quad (4)$$

Dimana:

- A,B,C,D,E = Konstanta empirik, (-)
- D_n = Dimeter *Nozzle*, (m)
- F_r = *Jet Froude number*, (-)
- g = Gravitasi (m/s^2)
- H_n = Tinggi *Nozzle*, (m)
- L_n = Panjang *Nozzle*, (m)
- V_n = Kecepatan pancaran cairan keluar dari *nozzle*, (m/s)
- Z = Kedalaman penetrasi maksimum gelembung (m)
- θ = Sudut kontraksi *nozzle* (derajat)
- $f(F_r)$ = Fungsi jet Froude number, (-)

2.3. Perhitungan Holdup Fasa Gas

Persamaan yang digunakan untuk menghitung *holdup* fasa gas didasarkan pada prinsip-prinsip dasar tekanan pada suatu bejana (Setiadi dkk., 2008):

$$\epsilon_g = 1 - \frac{h_f}{H_f} \quad (5)$$

Dimana:

- h_f = Tinggi cairan pada pipa kapiler tambahan, (m)

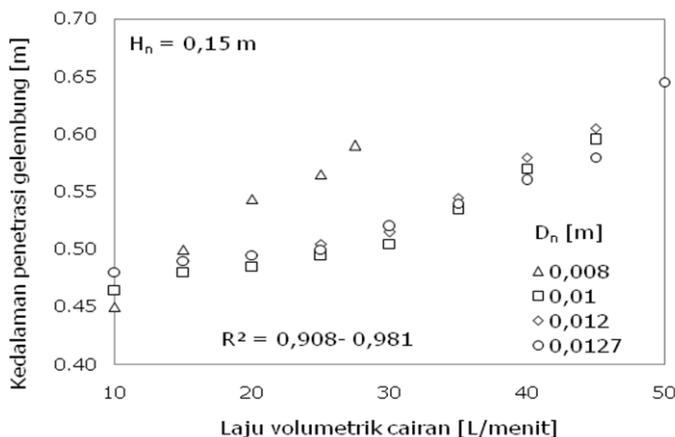
H_f = Tinggi cairan pada kolom, (m)

3. Hasil dan Pembahasan

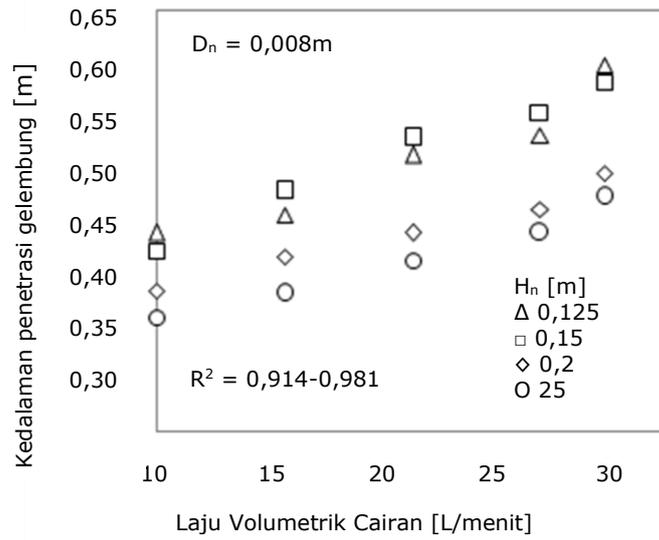
3.1. Korelasi Kedalaman Penetrasi Gelembung

Kedalaman penetrasi maksimum gelembung udara terjadi akibat adanya energi momentum yang berasal dari kecepatan pancaran cairan yang terjadi dalam kolom. Data kedalaman penetrasi maksimum gelembung diperoleh dari alat ukur meteran (satuan panjang) yang terdapat pada kolom. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan diperoleh profil kedalaman penetrasi maksimum gelembung udara terhadap laju volumetrik cairan yang berbeda pada ukuran diameter *nozzle* yang berbeda (Gambar 3) dan profil pada tinggi *nozzle* terhadap permukaan cairan (H_n) berbeda (Gambar 4)

Berdasarkan Gambar 3 terlihat nilai rata-rata koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,908–0,981 (hampir mendekati 1) untuk ukuran diameter *nozzle* (D_n) yang berbeda dan tinggi *nozzle* terhadap permukaan cairan (H_n) 0,15 m. Untuk semua profil tersebut, kedalaman penetrasi maksimum gelembung (Z) semakin besar dengan meningkatnya laju volumetrik cairan. Ini berbanding terbalik dengan ukuran diameter *nozzle* dimana kedalaman penetrasi maksimum gelembung akan semakin besar apabila diameter *nozzle* semakin kecil. Hal ini terjadi karena kecepatan pancaran yang keluar dari *nozzle* (V_n) dan energi tumbukan cairan yang masuk semakin besar. Perhitungan kedalaman penetrasi maksimum gelembung model dilakukan secara simultan menggunakan Pers. (4) dan pada beberapa diameter *nozzle* hasilnya ditampilkan dalam Tabel 1.



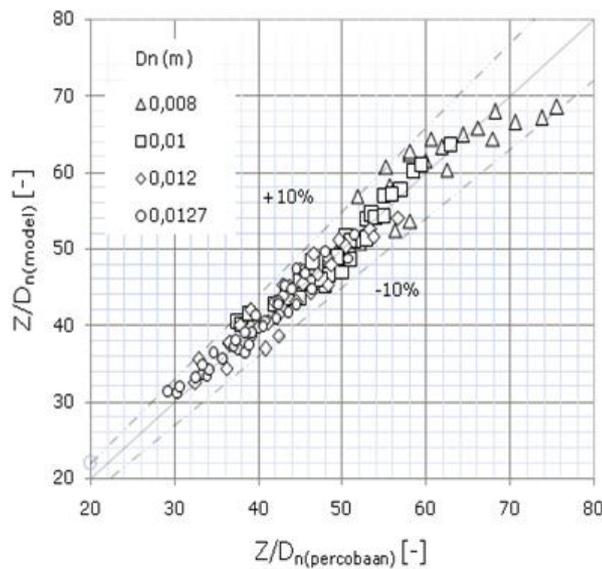
Gambar 3. Pengaruh diameter *nozzle* terhadap kedalaman penetrasi gelembung pada berbagai laju volumetrik cairan (Q_l) dan tinggi *nozzle* ($H_n = 0,15$ m) konstan



Gambar 4. Pengaruh tinggi *nozzle* terhadap kedalaman penetrasi gelembung pada berbagai laju volumetrik cairan (Q_l) dan diameter *nozzle* ($D_n = 0,008$ m) konstan

Tabel 1. Perhitungan konstanta empirik korelasi penetrasi gelembung (pada $\theta = 90^\circ$)

No	D_n (m)	L_N (m)	A (-)	B (-)	C (-)	D (-)	E (-)
1.	0,008	0,024	-5,6401	-0,1154	3,7933	1,2347	-0,3834
2.	0,01	0,024	1,2494	-0,2293	1,9741	-0,8631	0,4565
3.	0,012	0,025	0,3474	-0,2505	1,5466	0,4353	-0,0737
4.	0,0127	0,027	0,0345	-0,3137	2,1801	-0,5149	0,3760



Gambar 5. Korelasi dimensi kedalaman penetrasi maksimum gelembung pada ($\theta = 90^\circ$)

Dari Gambar 4 menunjukkan kedalaman penetrasi maksimum gelembung semakin

antara *nozzle* dengan permukaan cairan (H_n). Hal ini dikarenakan tumbukan (momentum) cairan keluar dari *nozzle*

menumbuk cairan stagnan yang berada dalam kolom semakin besar.

Persamaan kedalaman penetrasi gelembung untuk diameter (D_n) 0,008 m dan (L_n) 0,024 m adalah:

$$\left(\frac{Z}{D_n}\right)_{\text{model}} = 0,76(L_n/D_n)^{-5,6401}(H_n/D_n)^{-0,1154} \cdot 10^{3,7933+1,2347(\log Fr)+0,3834(\log Fr)^2}$$

Perbandingan kedalaman penetrasi gelembung (Z/D_n) model dengan percobaan dapat dilihat pada Gambar 4.

Berdasarkan Gambar 5 terlihat tingkat kesalahan relatif penetrasi maksimum gelembung udara hasil eksperimen terhadap model adalah $\pm 10\%$, hal ini berarti korelasi kedalaman penetrasi maksimum gelembung udara pada model hampir sama dengan hasil percobaan.

3.2. Holdup Gas dan Gas Entrainment

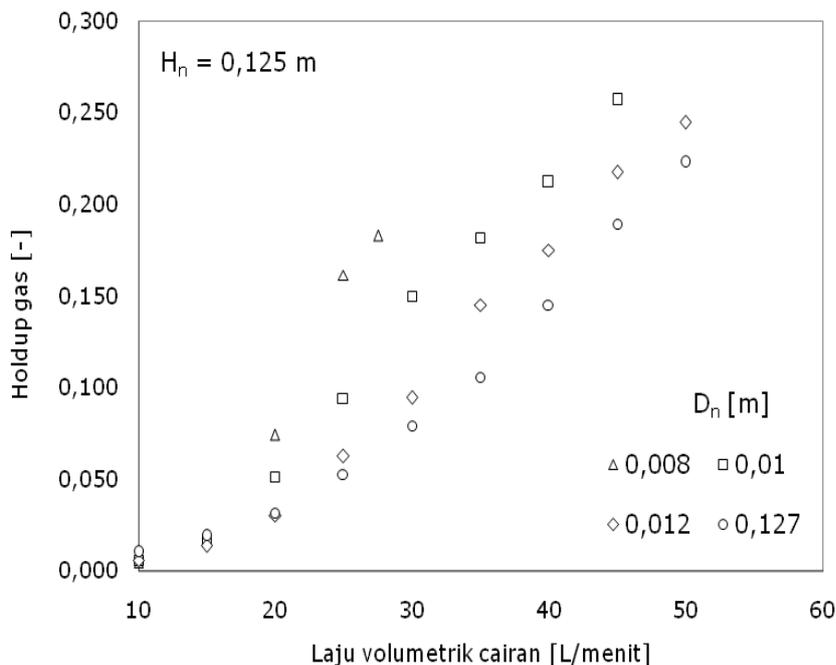
3.2.1. Holdup Gas

Holdup gas dihitung dari data tekanan statik yang berupa tinggi cairan aerasi pada kolom (H_r) dan tinggi cairan pada pipa kapiler tambahan (h_r). Tinggi cairan diperoleh dari pembacaan pada kolom kapiler tambahan (dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7). Berdasarkan data percobaan yang diperoleh dari perhitungan, dapat dibuat

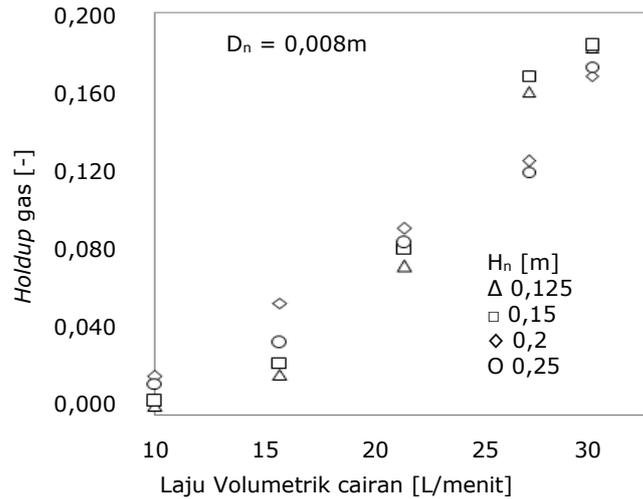
profil *holdup* gas untuk kecepatan pancaran cairan pada ukuran diameter *nozzle* yang berbeda dan pada tinggi *nozzle* terhadap cairan (H_n) 0,125 m.

Gambar 6 diperoleh profil *holdup* fasa gas akan semakin besar untuk kecepatan pancaran cairan yang semakin tinggi pada ukuran *nozzle* yang tetap. Begitu juga dengan ukuran diameter *nozzle* yang semakin kecil akan menghasilkan *holdup* fasa gas semakin besar. Hal ini disebabkan oleh energi yang menumbuk cairan dalam kolom *downcomer* semakin besar, sehingga mengakibatkan tekanan statik pada kedalaman cairan semakin besar (tumbukan semakin dalam). Begitu juga dengan semakin kecilnya ukuran diameter *nozzle* akan berpengaruh terhadap ukuran pancaran cairan. Dengan semakin kecilnya ukuran pancaran cairan maka kedalaman tumbukan semakin besar dan arus pusaran semakin intensif.

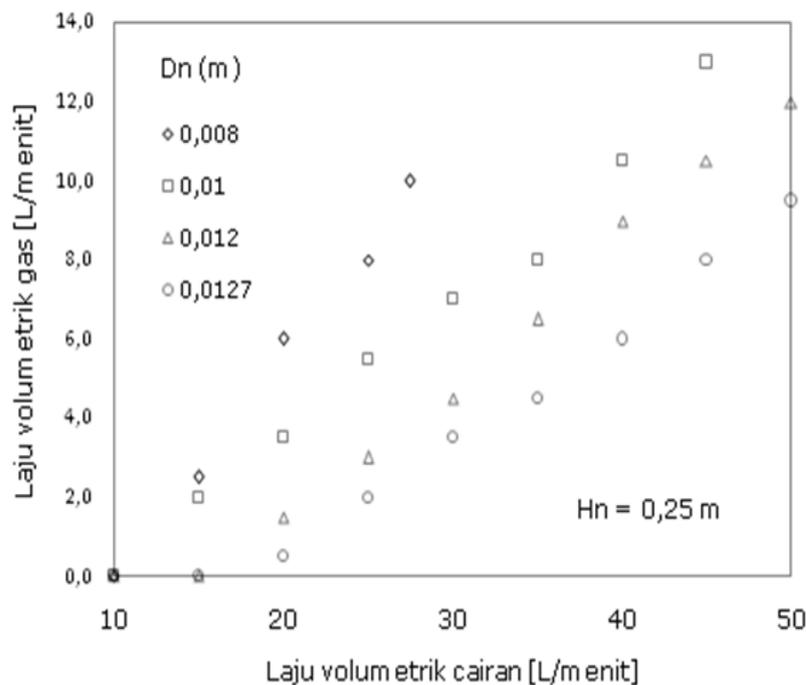
Gambar 7 diperoleh tinggi *nozzle* tidak memiliki efek yang sangat signifikan terhadap *holdup* gas pada laju volumetrik cairan yang semakin besar dan diameter *nozzle* konstan. Hal ini disebabkan rasio antara laju alir volumetrik gas terhadap laju alir volumetrik cairan yang terbentuk memiliki kesamaan terhadap kecepatan cairan yang keluar dari *nozzle* (Q_g/Q_l) (Gambar 10).



Gambar 6. Pengaruh diameter *nozzle* terhadap *holdup* gas; pada berbagai laju volumetrik cairan dan tinggi *nozzle* ($H_n = 0,125\text{m}$) konstan



Gambar 7. Pengaruh tinggi *nozzle* terhadap *holdup* gas; pada berbagai laju volumetrik cairan dan diameter *nozzle* ($D_n = 0,008$ m) konstan



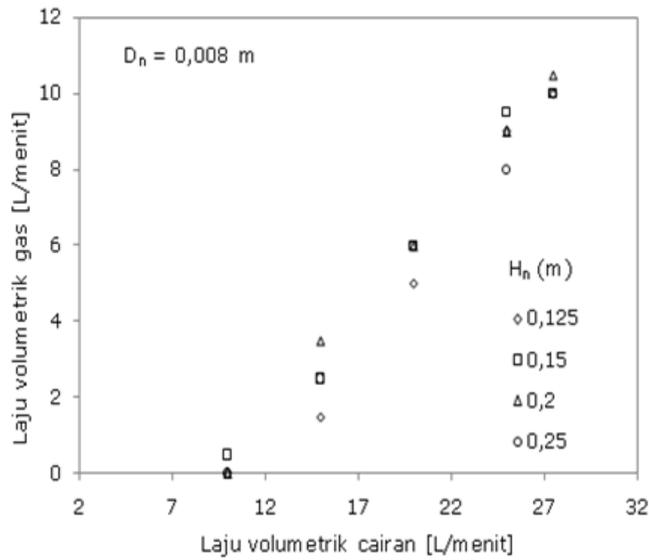
Gambar 8. Pengaruh diameter *nozzle* terhadap laju volumetrik gas pada berbagai laju volumetrik cairan dan tinggi *nozzle* ($H_n=0,25$ m) konstan

3.2.2. Gas Entrainment

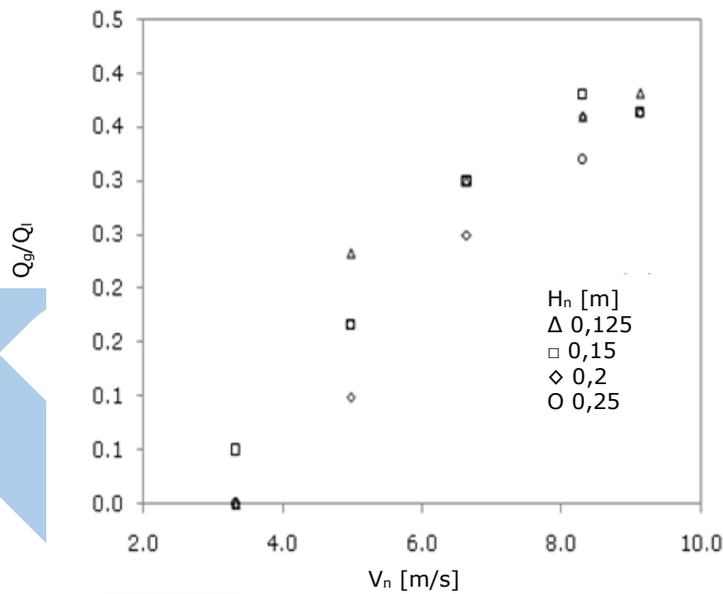
Gas *entrainment* merupakan gas yang terhisap akibat adanya energi momentum yang berasal dari kecepatan pancaran cairan. Data laju gas yang terhisap diperoleh dari alat ukur *flowmeter*. Berdasarkan Gambar 8 diperoleh laju volumetrik gas yang terhisap semakin besar untuk laju volumetrik cairan yang semakin tinggi pada tinggi *nozzle* konstan (Harby dkk., 2014). Begitu juga dengan semakin kecil ukuran

diameter *nozzle* akan mengakibatkan semakin besar laju volumetrik gas *entrainment*.

Hal ini diakibatkan energi momentum yang masuk semakin besar dengan adanya penambahan laju alir volumetrik cairan dan ukuran diameter *nozzle* tersebut. Hal ini memperbesar kedalaman penetrasi di dalam kolom *downcomer*. Selain itu, arus pusaran juga ditingkatkan secara intensif sehingga menyebabkan gas yang terhisap



Gambar 9. Pengaruh tinggi *nozzle* terhadap laju volumetrik gas pada berbagai laju volumetrik cairan dan diameter *nozzle* ($D_n=0,008$ m) konstan



Gambar 10. Pengaruh tinggi *nozzle* terhadap rasio laju alir volumetrik gas terhadap laju alir volumetrik cairan (Q_g/Q_t) pada berbagai kecepatan cairan yang keluar dari *nozzle* (V_n) dan diameter *nozzle* ($D_n=0,008$ m) konstan

ke dalam kolom *downcomer* semakin besar (Setiadi dkk., 2008; Nugroho dkk., 2014).

Gambar 9 menunjukkan bahwa pada laju volumetrik cairan yang semakin besar, tinggi *nozzle* tidak memiliki efek yang signifikan terhadap laju volumetrik gas *entrainment*. Hal ini disebabkan rasio laju alir volumetrik gas terhadap laju alir volumetrik cairan yang terbentuk memiliki kesamaan pada setiap kecepatan cairan yang keluar dari *nozzle* (Gambar 10) (Botton dkk., 2009). Faktor

yang mempengaruhi harga (Q_g/Q_t) merupakan parameter dasar dari kecepatan cairan keluar dari *nozzle*, panjang *jet*, sudut *jet*, diameter *nozzle*, dan sifat fisik dari cairan (Baawain dkk., 2012).

4. Kesimpulan

Berdasarkan serangkaian pengolahan data dan analisis yang dilakukan pada penelitian ini dapat ditarik kesimpulan bahwa ke-dalaman penetrasi maksimum gelembung

gas/udara (Z), *holdup* gas (ϵ_g), dan gas *entrainment* (Q_g) makin besar dengan makin kecilnya diameter *nozzle* (D_n). Kedalaman penetrasi maksimum gelembung gas/udara (Z), *holdup* gas (ϵ_g), dan gas *entrainment* (Q_g) makin besar dengan makin besarnya laju volumetrik cairan (Q_l). Tinggi *nozzle* tidak memiliki efek yang sangat signifikan terhadap *holdup* gas maupun laju gas *entrainment*.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat DIKTI yang telah memberikan amanah kepada Kami berupa dukungan dana melalui Hibah Penelitian anggaran 2014.

Daftar Pustaka

- Baawain, M. S., El-Din, M. G., Smith, D. W. (2012) Characterizing two inclined circular water jets plugging into an aeration tank, *International Journal of Multiphase Flow*, 40, 158-165.
- Botton, R., Cosserat, D., Poncin, S., Wild, G. (2009) A Simple Gas-Liquid Mass Transfer Jet System, *Proceeding in 8th World Congress of Chemical Engineering*, Montreal, Canada, 26 Nov 2009.
- Evans, G. M. A. K Bin, P. M. Machniewski (2001) Performance of confined plunging liquid jet bubble column as a gas-liquid reactor, *Chemical Engineering Science*, 56, 1151-1157.
- Harby, K., Chiva, S., Munoz-Cobo, J.L. (2014) An Experimental study on bubble entrainment and flow characteristics of vertical plunging water jets, *Journal Experimental Thermal and Fluid Science*, 57, 207-220.
- Ide, M., Uchiyama, H., Ishikura, T. (2001) Mass transfer characteristics in gas bubble dispersed phase generated by plunging jet containing small bubble, *Journal Chemical Engineering Science*, 55, 6225-6231.
- Ito, A., Yamagiwa, K., Tajima, K., Yoshida, M., Ohkawa, A. (2000) Maximum penetration depth of air bubble entrained by vertical liquid jet, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 33 (6), 898 - 900.
- Kundu, G., Mukherje, D., Mitra, A. K. (1997) Ejector performance in a co-current gas-liquid downflow bubble column, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 75, 956-963.
- Montes, C. G., Jimenez, R. B., Sevilla A., Bazan, C. M. (2014) Bubble formation in a planar water-air-water jet: Effect of nozzle geometry and injection conditions, *International Journal of Multiphase flow*, 65, 38-50.
- Nugroho, D. H., Adisalamun, Machdar, I. (2014) Recovery of ammonia solution from fertilizer industry wastewater by air stripping using jet bubble column, *Proceeding of the 5th Sriwijaya International Seminar on Energy and Environmental Science and Technology*, Palembang, Indonesia, 10-11, 102-108.
- Qu, X., Goharzadeh, A., Khezzar, L., Molki, A. (2013) Experimental characterization of air-entrainment in a plunging jet, *Journal Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 51-61.
- Setiadi, Nita, T.H., Hantizen, Dijan, S. (2008) Studi absorpsi CO₂ menggunakan kolom gelembung berpancaran jet (*jet bubble column*), *Makara, Teknologi*, 12(1), 31-37.
- Yamagiwa, Kazuaki, Ohkawa, A. (1989) Technique for measuring gas holdup in a downflow bubble column with gas entrainment by a liquid jet. *Journal of Fermentation and Bioengineering.*, 68(2), 160-162.