

Penguraian Limbah Organik secara Aerobik dengan Aerasi Menggunakan *Microbubble Generator* dalam Kolam dengan Imobilisasi Bakteri

Riysan Octy Shalindry^a, Rochmadi^a, Wiratni Budhijanto^{a*}

^aDepartemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika 2 Kampus UGM, Yogyakarta 55281

*Alamat korespondensi: wiratni@ugm.ac.id

ABSTRACT

The abundance utilization of the water in life can lead to decrease water quality in the earth. To resolve these problems an efficient alternative waste treatment is needed. This research studied the aerobic wastewater treatment using the microbubble generator (MBG) type of porous pipe and orifice as an oxygen supply (aerator) to treat artificial waste in pond of 3m x 3m x 1m dimension. Attached culture growth using pumice as biofilm media was applied. The main focus of this research was the influence of the aeration intensity variation of MBG as the result of liquid flow rate (Q_L) and air flow rate (Q_G) combination upon the decrease of organic content measured as sCOD (soluble Chemical Oxygen Demand). The value of Q_G was varied at 0.0150; 0.0300; and 0.0450 m³/h while Q_L value was varied at 12, 14, and 16 m³/h. The data obtained were evaluated based on oxygen mass transfer performance represented by the value of k_L . The value of k_L was used as a reference in determining the best combination of Q_G and Q_L for reducing sCOD in aerobic wastewater treatment. From the results of the research, the best combination of Q_G and Q_L for aerobic waste treatment was at Q_G 0.0300 m³/h and Q_L 14 m³/h (at 0.0450 Q_G m³/h). Although the research was still exploratory, the obtained trends and numbers were very useful for optimizing the MBG performance.

Keywords: aerobic waste treatment, microbubble, microbubble aeration, microbubble generator, biofilm, attached growth

ABSTRAK

Penelitian ini mempelajari pengolahan air limbah secara aerobik menggunakan *Microbubble Generator* (MBG) tipe *porous pipe* dan *orifice* sebagai alat suplai oksigen (aerator) untuk mengolah limbah artifisial pada kolam berukuran 3m x 3m x 1m. Aerasi diuji coba dengan bakteri pengurai berupa biakan melekat (*attached culture*) pada batu apung berukuran diameter 2-4 cm. Fokus utama dari penelitian ini adalah pengaruh variasi kombinasi kecepatan aliran cairan (Q_L) dan kecepatan aliran udara (Q_G) pada MBG terhadap penurunan kadar bahan organik yang dinyatakan sebagai nilai sCOD (*soluble Chemical Oxygen Demand*). Nilai Q_G divariasikan pada 0.0150; 0.0300 dan 0.0450 m³/jam sedangkan untuk nilai Q_L pada 12, 14 dan 16 m³/jam. Data yang diperoleh pada penelitian dievaluasi menggunakan konstanta transfer massa (k_L). Nilai k_L digunakan sebagai acuan dalam menentukan kombinasi Q_G dan Q_L terbaik dalam penurunan konsentrasi sCOD pada limbah aerobik. Dari hasil penelitian ini nilai k_L yang relatif baik dan stabil diperoleh pada kombinasi Q_G 0.030 m³/jam (untuk

Q_L 16 m³/jam) dan Q_L 16 (pada Q_G 0.045 m³/jam). Walaupun penelitian ini masih bersifat eksploratif, *trend* dan konstanta yang diperoleh sangat berharga untuk mengoptimasi kinerja MBG.

Kata kunci: Pengolahan limbah aerobik, *microbubble*, aerasi *microbubble*, *microbubble generator* (MBG), *biofilm*, pertumbuhan melekat

1. Pendahuluan

Intensitas penggunaan air yang terus meningkat dalam kehidupan dapat mempercepat proses penurunan kualitas air secara keseluruhan di muka bumi (Terasaka dkk., 2011). Melihat kondisi ini maka perlu dilakukan tindakan untuk menjaga kelestarian ketersediaan air bersih. Salah satu cara adalah melakukan pengolahan air limbah supaya tidak mengotori air baku yang jumlahnya semakin terbatas dan harus mencukupi kebutuhan populasi manusia yang jumlahnya makin meningkat.

Dalam proses pengolahan limbah, setelah pengolahan primer secara fisis dan kimiawi, masih diperlukan pengolahan sekunder secara biologis untuk menyempurnakan kualitas air olahan tersebut sesuai baku mutu yang diatur oleh Pemerintah. Salah satu teknologi pengolahan air limbah secara sekunder adalah pengolahan secara aerobik menggunakan metode biakan melekat (*attached culture*). Proses biologis dengan *attached culture* merupakan metode pengolahan limbah dengan bakteri yang dibiakkan pada suatu media padat, sehingga bakteri tersebut melekat pada permukaan media. Teknik ini bertujuan agar bakteri lebih tahan terhadap fluktuasi kondisi limbah dan tidak mudah terbawa keluar dari kolam aerobik.

Pada proses aerobik, suplai oksigen memiliki peranan yang penting karena oksigen yang terlarut tersebut akan digunakan oleh bakteri untuk melakukan aktivitasnya dalam proses degradasi bahan organik. Penggunaan aerator untuk pengolahan limbah pada umumnya masih memerlukan energi yang relatif besar dalam mempertahankan suplai oksigen bagi bakteri (Liu dkk., 2012). Oleh karena itu, mulai dikembangkan teknologi baru untuk aerasi dengan motivasi penghematan energi dan peningkatan efisiensi pelarutan oksigen ke dalam limbah cair.

Alat yang dipelajari dalam studi ini adalah aerator yang disebut *microbubble generator* (MBG). Alat MBG adalah alat aerasi yang dapat menghasilkan gelembung mikro dengan ukuran diameter 10 μ m (Ohnari, 2003). Ukuran gelembung yang sangat kecil menyebabkan luas transfer oksigen yang sangat besar dan kecepatan naiknya gelembung ke permukaan kolam yang jauh lebih rendah daripada aerator gelembung makro. Dengan demikian, diharapkan aplikasi MBG ini mampu menyuplai oksigen dengan efisiensi tinggi.

Penelitian ini bertujuan mempelajari pengaruh variasi intensitas aerasi pada MBG, dengan pengaturan kondisi operasional MBG, yaitu kombinasi kecepatan aliran cairan (Q_L) dan kecepatan aliran udara (Q_G), terhadap penurunan kadar bahan organik yang dinyatakan sebagai nilai sCOD (*soluble Chemical Oxygen Demand*). Studi dilakukan pada kolam aerob yang merupakan bagian dari kolam Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) laboratorium Departemen Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada. Air limbah yang digunakan untuk studi ini adalah limbah artifisial yang merupakan larutan pati dengan tambahan gula dan urea.

Penelitian dijalankan pada sebuah kolam yang dioperasikan sebagai reaktor *batch* dengan aerasi terus menerus menggunakan MBG. Perubahan kadar organik ini dinyatakan dalam konsentrasi sCOD (*soluble Chemical Oxygen Demand*). Neraca massa substrat dalam cairan dengan volume V yang dinyatakan dalam Persamaan 1.

$$0 - V \frac{\mu_g (X_f)_{ss}}{(Y_{xs})_{ss}} - V \frac{qp (X_f)_{ss}}{(Y_{ps})_{ss}} = V \frac{ds}{dt} \quad (1)$$

Untuk meningkatkan fleksibilitas dari model, Persamaan Blackman untuk kecepatan pertumbuhan bakteri dimodifikasi menggunakan sebuah konstanta sebagai pangkat pada konsentrasi substrat (n) seperti yang digunakan oleh Persamaan Moser, yang juga cocok untuk

sistem bioproses non-ideal. Model kinetika yang dihasilkan disajikan pada Persamaan 2.

$$\mu_g = \frac{\mu_m}{2K_S} S^n \quad (2)$$

Persamaan 1 dapat disederhanakan sebagai Persamaan 3.

$$-\frac{ds}{dt} = \frac{\mu_m (X_f)_{SS}}{2K_S (Y_{XS})_{SS}} S^n \quad (3)$$

Selanjutnya Persamaan 3 disederhanakan menjadi Persamaan 4, dengan menggabungkan semua konstanta dalam satu nilai konstanta yaitu k_L .

$$-\frac{ds}{dt} = k_L S^n \quad (4)$$

Untuk memperoleh nilai dari hasil penelitian sebelumnya pada skala laboratorium, perhitungan nilai k_L pada Persamaan 4, digunakan nilai orde reaksi $(n)=2$ (Satriawan., 2015). Integrasi Persamaan 4 menghasilkan Persamaan 5.

$$\frac{1}{s} = k_L t + \frac{1}{s_0} \quad (5)$$

Penyelesaian Persamaan 5 untuk menentukan nilai-nilai konstanta dilakukan dengan cara grafis. Nilai k_L ditentukan dari grafik hubungan $1/s$ terhadap waktu (t), di mana k_L merupakan gradient pada grafik $1/s$ vs. t .

2. Metode Penelitian

2.1 Bahan Penelitian

Limbah yang digunakan dalam penelitian ini merupakan limbah artifisial yang terbuat dari campuran tepung tapioka dan gula dalam air dengan penambahan nutrisi yang berasal dari urea. Komposisi substrat terdiri atas tepung tapioka sebanyak 500 gram, gula 50 gram, dan urea 5 gram yang semuanya dilarutkan dengan air kran sebanyak 20 L sehingga diperoleh hasil akhir limbah artifisial berupa larutan yang encer. Kadar senyawa organik total diukur sebagai sCOD menggunakan metode pengukuran standar (APHA, 2005).

Bakteri aerob yang digunakan untuk mendegradasi limbah organik pada penelitian ini berasal dari PT. Aozora Agung Perkasa. Bakteri ini merupakan bakteri non patogen dengan jenis

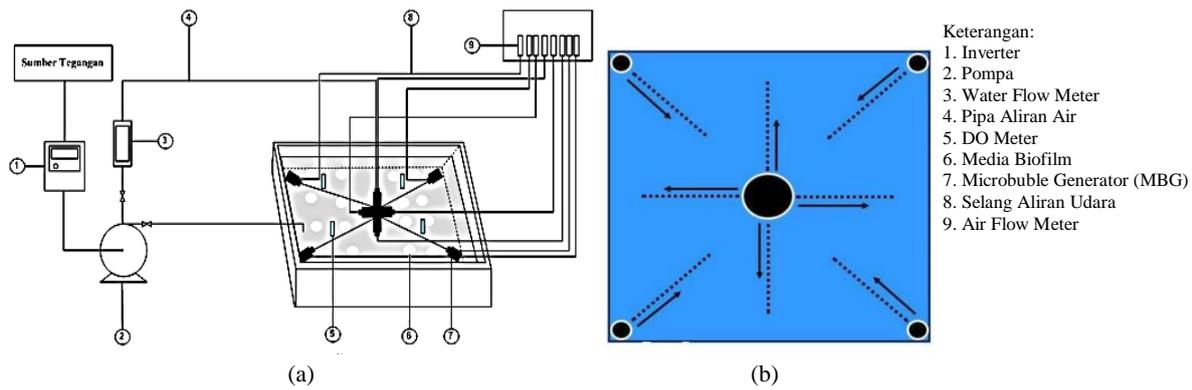
mix culture yang tidak teridentifikasi masing-masing spesiesnya. Sebelum memasuki tahap operasional reaktor, bakteri tersebut terlebih dahulu dibiakkan dalam media dengan volum kurang-lebih 100 L sebagai proses pembibitan untuk memperbanyak jumlah bakteri dan aklimatisasi yang bertujuan agar bakteri dapat beradaptasi dengan kondisi penelitian.

2.2 Peralatan Penelitian

Alat utama penelitian ini berupa kolam aerobik pada instalasi pengolahan limbah Departemen Teknik Kimia FT UGM yang berukuran 3m x 3m x 1m. Bagian dalam kolam tersebut dilengkapi dengan MBG tipe *orifice* dan *porous pipe* sebanyak 8 buah dengan konfigurasi seperti ditampilkan pada Gambar 1. Media biofilm yang digunakan pada penelitian ini berupa batu apung berukuran diameter 2-4 cm. Setiap 1000 gram media dibungkus dengan kasa paranet dan diikat dengan pemberat agar posisi media tidak berubah-ubah di dasar kolam. Kolam eksperimen dilengkapi dengan sebanyak 16 buah paranet berisi batu apung dan seluruhnya dicelupkan ke dalam kolam aerobik dengan kedalaman 10 cm dari permukaan cairan. Rangkaian alat penelitian dan konfigurasi MBG pada kolam aerobik lengkap dengan alat-alat bantuannya disajikan pada Gambar 1.

2.3 Metode Penelitian

Pengoperasian MBG diawali dengan mengatur kecepatan aliran cairan (Q_L) dan kecepatan aliran udara (Q_G). Pada penelitian ini divariasikan nilai Q_G 0.0150; 0.0300; dan 0.0450 m³/jam, sedangkan untuk Q_L divariasikan dengan nilai 12; 14; dan 16 m³/jam. Tahap selanjutnya larutan substrat berupa tepung tapioka, gula dan urea dimasukkan ke dalam kolam aerobik sebagai senyawa organik yang akan dikonsumsi oleh bakteri. Proses dalam kolam ini berlangsung secara *batch* dan dilakukan pada kondisi pH 6.5-8.5. Pengambilan sampel dilakukan selama 2 jam sekali dengan diikuti pengecekan nilai DO untuk mengetahui kadar oksigen dalam kolam aerobik. Untuk



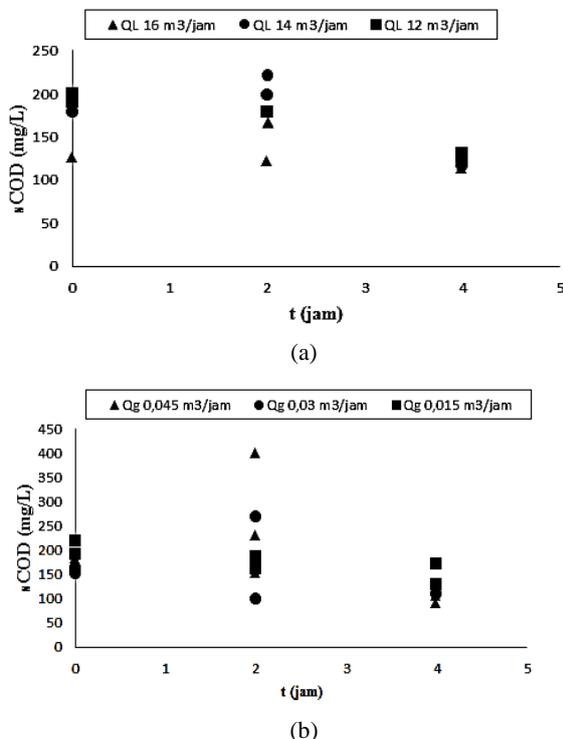
Gambar 1. (a) Rangkaian alat penelitian (b) Konfigurasi MBG pada kolam aerobik

semua sampel yang diambil, dilakukan analisis kandungan bahan organik dengan menggunakan *soluble Chemical Oxygen Demand* (sCOD) dengan metode refluks tertutup (APHA, 2005).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengaruh kombinasi kecepatan aliran cairan (QL) dan kecepatan aliran udara (QG) MBG terhadap penurunan kadar bahan organik

Gambar 2 menunjukkan bahwa tiap variasi kecepatan aliran cairan (QL) dan kecepatan aliran udara (QG) selama 120 menit pertama kadar sCOD justru mengalami kenaikan.



Gambar 2. Nilai sCOD sebagai fungsi waktu pada (a) variasi Q_G dengan Q_L konstan 16 m³/jam. (b) variasi Q_L dengan Q_G konstan 0.0450 m³/jam

Hal ini dikarenakan komposisi substrat berupa gula dan tepung tapioka yang merupakan molekul kompleks. Fraksi substrat yang mudah larut dalam air akan terbaca sebagai sCOD awal dan dapat masuk ke sel bakteri melalui membran yang akan dikonsumsi dengan bantuan *endoenzymes*. Sedangkan fraksi yang tidak larut dalam air akan melalui proses hidrolisis terlebih dahulu menjadi senyawa yang lebih sederhana agar dapat dikonsumsi oleh bakteri (IAWPRC, 1987). Fraksi yang tidak terlarut tersebut terutama berupa pati yang berasal dari tepung tapioka. Pati merupakan suatu polisakarida yang tersusun dari monomer gula yang memiliki sifat tidak larut dalam air. Bakteri melakukan proses hidrolisis dengan bantuan *exoenzymes* yang berupa enzim amilase untuk memotong rantai polisakarida menjadi monomer gula yang dapat larut dalam air. Gula yang terbentuk pada proses hidrolisis tersebut terlarut dan terbaca sebagai konsentrasi sCOD. Kondisi ini yang menyebabkan konsentrasi sCOD pada 120 menit pertama mengalami peningkatan. Produk gula yang dihasilkan akan digunakan oleh bakteri untuk berkembang biak serta menghasilkan zat metabolik dan *Extracellular Polymeric Substance* (EPS). *Extracellular Polymeric Substance* merupakan senyawa yang komponen utamanya berupa polisakarida dan protein. Fungsinya adalah untuk melekatkan bakteri pada media biofilm.

3.2 Pengaruh variasi QG pada nilai kL

Pada Q_G yang berbeda maka akan dihasilkan ukuran gelembung yang berbeda. Ukuran gelembung *microbubble* yang terbentuk akan

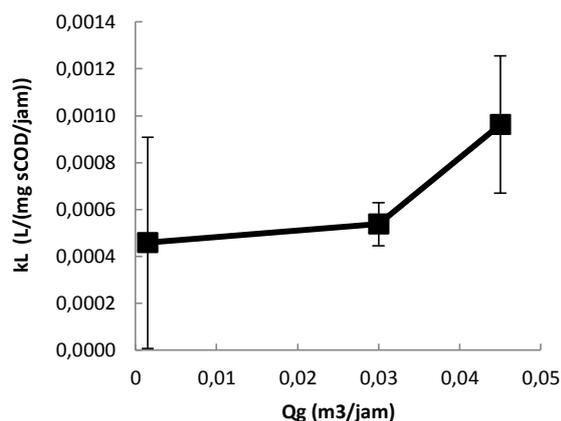
mempengaruhi luas transfer massa oksigen ke dalam cairan dan berpengaruh pada kemampuan bakteri untuk mendegradasi senyawa organik dalam kolam aerobik yang tercermin pada nilai k_L . Nilai k_L pada variasi Q_G dengan Q_L 16 m³/jam disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai k_L pada variasi Q_G dengan Q_L 16 m³/jam

Q_L (m ³ /jam)	Q_G (m ³ /jam)	Pengamatan per 4 jam (jam)	$k_L \times 10^4$ (L/(mg sCOD/hari))
16	0.0150	1	6.17
		2	2.99
16	0.0300	1	4.47
		2	5.01
		3	6.65
16	0.0450	1	5.86
		2	10.00
		3	13.00

Grafik simpangan deviasi pada nilai k_L dengan variasi Q_G dan Q_L 16 m³/jam disajikan pada Gambar 3.

Gambar 3 menunjukkan bahwa untuk nilai Q_L yang sama, pada Q_G lebih kecil diperoleh nilai k_L yang lebih rendah. Berdasarkan penelitian Satriawan (2015) yang memvariasi nilai Q_G sebesar 0.0060; 0.0120; 0.0180; 0.0024; 0.0300; 0.0360; 0.0420; dan 0.0480 m³/jam pada sistem aerobik skala laboratorium diperoleh hasil bahwa untuk nilai Q_G yang lebih rendah dari 0.0300 m³/jam terjadi penurunan nilai k_L .



Gambar 3. Simpangan deviasi nilai k_L pada variasi Q_G dengan Q_L 16 m³/jam

Hal ini dikarenakan pada Q_G yang lebih rendah akan dihasilkan ukuran gelembung yang lebih kecil namun konsentrasi *microbubble* yang dihasilkan rendah, terlihat dari nilai DO

maksimum untuk kombinasi ini sebesar 2.32 mg/L dan nilai DO minimum sebesar 1.46 mg/L dengan kondisi pH 7,2. Nilai DO pada Q_G ini lebih rendah bila dibanding dengan kombinasi MBG pada Q_G 0.0300 mg/L dan 0.0450 mg/L yang memiliki nilai DO maksimum sebesar 3.70 mg/L dan 3.89 mg/L, sedangkan nilai DO minimum sebesar 3.32 mg/L dan 3.31 mg/L dengan kondisi pH masing-masing variasi Q_G 7.4. Konsentrasi *microbubble* yang rendah akan menghasilkan nilai fraksi volum gas pada sistem aerobik yang kecil, sehingga luas transfer massa menjadi kecil dan proses perpindahan massa gas oksigen ke dalam fase cair juga menjadi kecil. Kecilnya transfer massa oksigen berpengaruh pada sedikitnya suplai oksigen yang akan digunakan oleh bakteri dalam proses degradasi senyawa organik dan berdampak pada penurunan kemampuan bakteri dalam mendegradasi senyawa organik, sehingga mengakibatkan rendahnya nilai k_L .

Pada kondisi nilai Q_G yang lebih tinggi, yaitu 0.0450 m³/jam, diperoleh nilai k_L yang tinggi namun memiliki simpangan deviasi yang sangat lebar. Hal ini dikarenakan pada nilai Q_G yang besar kemungkinan akan terbentuk *microbubble* dengan ukuran yang lebih besar dan konsentrasi *microbubble* yang tinggi meningkatkan kemungkinan tumbukan antar gelembung membentuk gelembung-gelembung yang lebih besar. Semakin besar ukuran gelembung maka akan memperbesar gaya apung (*buoyancy*). Akibatnya kecepatan naik (*rising velocity*) gelembung besar sehingga pelarutan oksigen kurang sempurna. Kemungkinan-kemungkinan ini diduga mengakibatkan fluktuasi nilai k_L , tetapi hal ini masih perlu diverifikasi dengan pengamatan visual.

Berdasarkan Gambar 3, pada nilai Q_L 16 m³/jam dan kondisi cairan dalam penelitian ini sebagaimana diuraikan pada bagian Bahan, nilai Q_G yang sesuai untuk pengolahan limbah pada kolam aerobik adalah 0.0300 m³/jam. Pemilihan ini didasari dari nilai k_L yang cukup tinggi dan simpangan deviasi yang relatif kecil sebagai indikasi kestabilan ukuran gelembung yang dihasilkan.

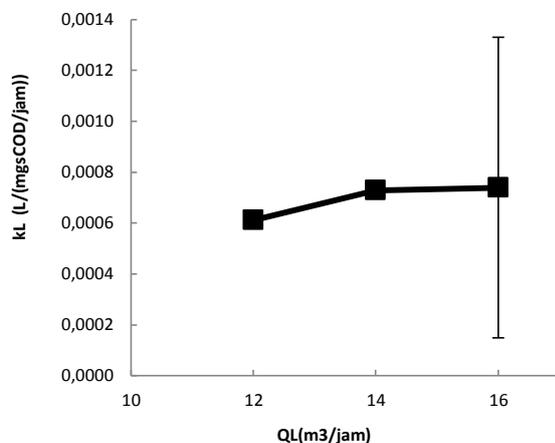
3.3 Pengaruh variasi QL pada nilai kL

Variasi Q_L berkaitan dengan penurunan tekanan yang terjadi di dalam pipa MBG yang mempengaruhi ukuran dari *microbubble* yang terbentuk. Penelitian yang dilakukan Iriawan (2014) menginformasikan bahwa seiring dengan peningkatan nilai Q_L maka penurunan tekanan dalam cairan pada pipa MBG juga mengalami peningkatan. Efek dari penurunan tekanan yang terjadi akan memicu peningkatan intensitas pembentukan *microbubble* di dalam reaktor. Nilai k_L pada variasi Q_L dan Q_G 0.0450 m^3/jam disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai k_L pada variasi Q_L dengan Q_G 0,045 m^3/jam

Q_L (m^3/jam)	Q_G (m^3/jam)	Pengamatan per 4 jam (jam)	$k_L \times 10^{-4}$ (L/(mg sCOD/hari))
12	0.0450	1	6.11
14	0.0450	1	7.32
		2	7.26
16	0.0450	1	7.98
		2	2.04

Grafik deviasi pada nilai k_L dengan variasi Q_L dan Q_G 0.0450 m^3/jam disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Simpangan deviasi nilai k_L pada variasi Q_L dengan Q_G 0,045 m^3/jam

Hasil percobaan dengan variasi Q_L 12; 14;16 m^3/jam dan Q_G 0.0450 m^3/jam memberikan informasi bahwa seiring dengan meningkatnya kecepatan alir cairan (Q_L) akan berdampak pada peningkatan nilai k_L . Peningkatan kecepatan alir cairan (Q_L) akan memperbesar penurunan tekanan yang terjadi pada cairan dalam pipa MBG, sehingga terjadi perbedaan tekanan yang

signifikan pada cairan dan udara luar. Efek dari proses tersebut mengakibatkan kecepatan alir udara yang terhisap (Q_G) mengalami peningkatan. Kondisi ini akan berpengaruh pada peningkatan intensitas pembentukan *microbubble* pada kolam aerobik yang terlihat dari nilai DO maksimum pada tiap kombinasi MBG dengan variasi Q_L 12; 14;16 m^3/jam adalah 2.05; 3.57; 3.95 mg/L dan DO minimum 1.56; 3.06; 3.40 mg/L yang dilakukan pada kondisi pH 7.3; 7.5; 7.6.

Peningkatan intensitas pembentukan *microbubble* akan meningkatkan konsentrasi *microbubble* dalam cairan dan memperbesar luas permukaan transfer massa sehingga massa oksigen yang ditransfer dalam fase cair juga besar. Besarnya transfer massa oksigen pada cairan akan berefek pada tingginya suplai oksigen yang akan digunakan oleh bakteri dalam melakukan proses degradasi senyawa organik. Akibat tingginya suplai oksigen pada sistem aerobik menyebabkan proses degradasi senyawa organik menjadi lebih baik yang tercermin dengan tingginya nilai k_L . Namun dari Gambar 3 simpangan deviasi yang terjadi pada saat nilai Q_L 16 m^3/jam cukup lebar. Kondisi ini dapat disebabkan pada nilai Q_L besar dapat meningkatkan aliran turbulensi. Turbulensi yang lebih tinggi pada nilai Q_L besar dapat meningkatkan kecenderungan tabrakan antara gelembung, sehingga efek dari tabrakan tersebut memungkinkan penggabungan beberapa gelembung udara yang berukuran mikro ke dalam satu gelembung udara yang besar.

Untuk kasus yang distudi pada penelitian ini, nilai Q_L yang sesuai untuk pengolahan limbah pada sistem aerobik ini adalah 14 m^3/jam karena bila ditinjau dari Gambar 3, nilai ini memberikan nilai k_L cukup tinggi dan simpangan deviasi yang kecil.

4. Kesimpulan

Perubahan nilai Q_L dan Q_G mempengaruhi nilai k_L dengan pengaruh nilai Q_G lebih sensitif. Pada penelitian ini diperoleh nilai k_L terbaik pada Q_G 0.0300 m^3/jam dengan nilai rata-rata k_L sebesar 5.37×10^{-4} L/(mg sCOD/hari) yang menunjukkan suplai oksigen baik dan diameter

gelembung yang dihasilkan relatif lebih stabil. Untuk variasi Q_L diperoleh nilai k_L terbaik pada $14 \text{ m}^3/\text{jam}$ dengan nilai rata-rata k_L sebesar $7.29 \times 10^{-4} \text{ L}/(\text{mg sCOD}/\text{hari})$ menunjukkan suplai oksigen pada Q_L tersebut baik dan minimnya tabrakan antar *microbubble*. Hasil dari penelitian ini masih merupakan eksplorasi tahap awal sebagai acuan untuk penelaahan ilmiah yang lebih mendalam tentang aliran dua fase dalam MBG, tetapi angka-angka tersebut di atas dapat digunakan sebagai acuan untuk studi selanjutnya.

Daftar Notasi

$\frac{ds}{dt}$	=Perubahan sCOD per waktu (mg sCOD)(L) ⁻¹ (hari) ⁻¹
k_L	=Indikasi kecepatan peruraian polutan (L)(mg sCOD) ⁻¹ (hari) ⁻¹
K_s	=Konstanta saturation (g L ⁻¹)
n	=Orde reaksi (tidak bersatuan)
Q_G	=Kecepatan aliran udara (m ³ jam ⁻¹)
Q_L	=Kecepatan aliran cairan (m ³ jam ⁻¹)
q_p	=Kecepatan spesifik pembentukan produk (g produk)(g substrat.hari) ⁻¹
S	=Konsentrasi substrat (mg sCOD)(L) ⁻¹
V	=Volume cairan dalam kolam aerob (m ³)
$(X_f)_{ss}$	=Massa <i>biofilm</i> pada kondisi <i>steady state</i> (g sel)
$(Y_{PS})_{ss}$	=Yield produk yang dihasilkan per unit konsumsi substrat pada kondisi <i>steady state</i> (g produk)(g substrat) ⁻¹
$(Y_{XS})_{ss}$	=Yield sel yang dihasilkan per unit konsumsi substrat pada kondisi <i>steady state</i> (g sel)(g substrat) ⁻¹
μ_g	=Kecepatan pertumbuhan spesifik (hari ⁻¹)
μ_m	=Kecepatan maksimum pertumbuhan spesifik (hari ⁻¹)

Daftar Pustaka

- APHA., 2005, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Washington DC.
- Budhijanto, W., Deendarlianto, Kristiyani H., and Satriawan D., 2015, Enhancement of Aerobic Waste Water Treatment by the Application of Attached Growth Microorganisms and Micro Bubble Generator, International Journal of Technology 7, 1101-1109.
- IAWPRC., 1987, Activated Sludge Model No. 1, IAWPRC Scientific and Technical Reports No. 1.
- Iriawan, A.G.H., 2014, The Study of Microbubble Generator on Aerobic Waste Water Treatment Using Bio-ball Method, Based on the Bubbling Generating Condition and the Configuration of Microbubble Generator, Tesis Teknik Mesin FT UGM, Yogyakarta.
- Liu, C., Tanaka, H., Ma, J., Zhang, L., Zhang, J., and Huang, X., 2012, Effect of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge Using Shirasu Porous Glass (SPG) Membrane System, Water Researchs, 46 (18), pp. 6051–6058.
- Ohnari, H., 2003, Application of Microbubble Technology to Fishery, Chemical Engineering, 67, 130-14 (In Japanese).
- Satriawan, D., 2015, Analisis Kuantitatif Pengaruh Intensitas Aerasi dengan *Microbubble Generator* pada Penguraian Bahan Organik dalam Aerobik Digester dengan Immobilized Mikroorganism, Tesis Teknik Kimia FT UGM, Yogyakarta.
- Terasaka, K., Hibarayashi, A., Nishino, T., Fujioka, S., and Kobayashi, D., 2011, Development of Micro-bubble Aerator for Waste Water Treatment Using Activated Sludge, Chemical Engineering Science, 66, pp. 3172 – 317.