



Analisis Pengaruh Variasi Debit Air (Q_L) dan Debit Gas (Q_G) terhadap Koefisien Transfer Oksigen (K_{La}) pada Performa Microbubble Generator

Niesa Hanum Mistoro^{1*}, Sri Puji Saraswati², Johan Syafri Mahathir Ahmad², dan Wiratni³

¹Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

²Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

³Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

*E-mail: niesa.hanum.m@mail.ugm.ac.id

Abstract

The domestic wastewater treatment plant is usually installed using anaerobic system which has the disadvantage for low conversion process and large volume required. While the effectiveness of aerobic system can be increased by high consumption of energy to supply the oxygen. This study investigates the performance of Microbubble Generator (MBG) for wastewater treatment. The MBG utilizes the hydrodynamics of wastewater flow in the nozzle to provide energy-saving aeration. In this study, the clean water non-steady state test method was selected to find the overall oxygen transfer coefficient (K_{La}). The experiment was conducted by increasing the concentration of Dissolved Oxygen (DO) using MBG installed with submersible pump (water discharge, $Q_L=80$ l/min) and variations of gas discharge (Q_G) (0.15 l/min and 0.30 l/min). The K_{La} average results on Q_L 80 l/min at Q_G 0.15 l/min showed 0.01996/min and at Q_G 0.30 l/min showed 0.02564/min. These results indicate that the greater gas discharge (Q_G) can produce a greater K_{La} value. This happens because the more air is injected into the water and forms into micro-sized bubbles, the greater the rate of transfer oxygen to the liquid phase.

Keywords: oxygen transfer coefficient; microbubble generator; aeration; Dissolved Oxygen.

Pendahuluan

Pengolahan air limbah domestik pada umumnya dilakukan dengan proses anaerobik. Pada pengolahan skala besar, proses anaerobik memiliki kelemahan yaitu pada konversi pengolahan yang rendah, kebutuhan volume yang besar, dan biasanya memerlukan proses pengolahan lebih lanjut dengan proses aerobik untuk memenuhi baku mutu sebelum dibuang ke badan air. Pada proses aerobik dibutuhkan suplai oksigen untuk bakteri aerobik dalam melakukan degradasi bahan organik. Penyuplaian oksigen dilakukan dengan proses aerasi yang ditujukan untuk menambah jumlah kadar oksigen terlarut dalam air yang biasanya menggunakan teknologi aerasi (aerator). Proses aerasi merupakan proses transfer oksigen dengan cara menambahkan jumlah udara ke dalam air sehingga antara air dan udara dapat saling berkontak satu sama lain. Sedangkan menurut Metcalf dan Eddy (2003) transfer oksigen didefinisikan sebagai proses dimana oksigen ditransfer dari fase gas ke fase cair.

Proses aerasi pada pengolahan air limbah umumnya membutuhkan energi terbesar yang berarti sejalan dengan biaya operasionalnya yang besar pula (Newbry, 1998). Menurut U.S. Environmental Protection Agency-EPA (1999) dibutuhkan sekitar 50 sampai 65 % dari total bersih kebutuhan daya listrik pada instalasi pengolahan air limbah yang hanya digunakan untuk reaktor aerobik dalam proses lumpur aktif pengolahan sekunder. Oleh karena itu, pemahaman tentang karakteristik proses aerasi yang terjadi dalam air sangat penting untuk diketahui agar selanjutnya dapat membantu mengoptimalkan desain dan operasional yang dapat menghemat biaya. Terdapat banyak pengembangan teknologi aerator dengan motivasi untuk penghematan energi dan peningkatan efisiensi pelarutan oksigen ke dalam pengolahan air limbah. Studi saat ini seperti yang dilaporkan oleh Terasaka et al. (2011) dan Liu et al. (2012) membuktikan bahwa ukuran gelembung secara signifikan mempengaruhi efisiensi perpindahan massa oksigen dari fase gas ke fase cair, ukuran gelembung yang semakin kecil (*fine-bubble*) menghasilkan luas permukaan gelembung yang lebih besar per satuan volume sehingga nilai Laju Transfer Oksigen (OTR) juga akan meningkat.

Salah satu teknologi aerasi yang dapat menghasilkan gelembung-gelembung kecil (*fine-bubble*) yaitu Microbubble Generator (MBG). Teknologi MBG dapat menghasilkan gelembung-gelembung mikro (*microbubble*) untuk proses aerasi hemat energi dengan memanfaatkan hidrodinamika aliran air limbah di dalam *nozzle*. Ukuran gelembung mikro yang sangat kecil dengan diameter kurang dari 200 μm menyebabkan luasan permukaan yang lebih besar sehingga



transfer oksigen dapat meningkat serta mempunyai kecepatan naik gelembung ke permukaan air yang jauh lebih rendah daripada aerator pada umumnya (Budhijanto et al., 2015).

Penerapan MBG dalam pengolahan air limbah sudah banyak diteliti, salah satunya oleh Indriaswari (2019) pada sebuah IPAL yang dirancang menggunakan sistem lumpur aktif dengan komponen aerator berupa pompa celup dan MBG tipe *porous pipe* dan *orifice* sebagai *nozzle*-nya. Operasi dilakukan secara *intermittent* dengan debit rencana 0,8 m³/hari dan penggunaan MBG sebagai aerator terbukti dapat meningkatkan oksigen terlarut sebesar 3,2 mg/L. Selain itu penelitian juga dilakukan oleh Kurniawan (2019) di Embung Lembah UGM. Penelitian ini menggunakan *subsurface aerator* yang menggunakan 2 *nozzle* MBG sebagai injektornya. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan konsentrasi oksigen terlarut sebesar rata-rata 1,605 mg/L dengan efektivitas peningkatannya sebesar 47,697%. Aerator juga dapat membantu mencapai nilai jenuhnya dalam waktu 10 menit dengan koefisien transfer oksigen (K_{La}) sebesar 0,202/menit dan akan kembali lagi pada keadaan semula setelah dimatikan dalam waktu 18 menit dengan maximum *oxygen uptake rate* sebesar 0,0986 (mg/L)/menit.

Walaupun penelitian mengenai proses aerasi oleh MBG dan aplikasinya dalam pengolahan air limbah telah banyak dilakukan akan tetapi penelitian terkait data dasar performa Microbubble Generator masih sedikit dilakukan. Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mencari data dasar performa MBG yang diharapkan nantinya dapat memberikan kontribusi dalam penyediaan informasi terkait data desain dan desain kriteria dari MBG untuk aplikasi pengolahan air limbah yang hemat energi dan dengan kinerja pengolahan yang baik.

Metode Penelitian

Dari sejumlah teori transfer masa yang umum digunakan untuk menjelaskan mekanisme transfer gas adalah 'Two Film Theory' dari Lewis dan Whitman (1924). Teori ini menyatakan bahwa laju transfer gas dapat dinyatakan dalam koefisien transfer keseluruhan dan resistansi kedua selaput (*film*) permukaan yang terletak pada antarmuka gas-cairan. Dengan gas yang sedikit larut seperti oksigen, resistansi lebih besar terdapat pada selaput cair dan pada selaput gas dapat diabaikan. Hal ini memungkinkan untuk transfer oksigen dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C) \quad (1)$$

Dimana K_{La} adalah koefisien transfer gas/oksigen (1/t), C_s adalah konsentrasi jenuh oksigen (mg/L), dan C adalah konsentrasi oksigen dalam air pada waktu t (mg/L). Bentuk integralnya menjadi:

$$\ln \frac{C_s - C_0}{C_s - C} = K_L a (t - t_0) \quad (2)$$

$$C = C_s - (C_s - C_0) \cdot \exp [K_L a \cdot (t - t_0)] \quad (3)$$

Dimana C_0 adalah konsentrasi awal DO pada $t = t_0$. Selisih antara konsentrasi jenuh oksigen dengan konsentrasi oksigen sebenarnya dalam air ($C_s - C$) disebut dengan defisit oksigen (*oxygen deficit*). Laju Transfer Oksigen (*Oxygen Transfer Rate*, OTR) ditentukan dengan integrasi persamaan ini. Dari persamaan (1) laju pengambilan oksigen awal (*oxygen uptake rate*) pada $C = 0$, maka didapatkan:

$$\frac{dC}{dt} = OC = K_L a (C_s) \quad (4)$$

Dimana OC adalah kapasitas transfer oksigen pada sistem (grO₂/m³.jam). Dalam proses aerasi terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi transfer oksigen diantaranya suhu, konsentrasi jenuh oksigen (C_s), karakteristik air, dan turbulensi air (Benefield, 1980).

Non Steady State Method

Terdapat beberapa metode eksperimen untuk menentukan koefisien transfer massa. Salah satunya yaitu metode pengujian *non-steady state* pada air bersih yang merupakan prosedur uji yang paling banyak diterima sementara ini (Metcalf & Eddy, 2003). Prosedur uji ini dilakukan untuk menentukan dan mengevaluasi koefisien transfer oksigen (K_{La}) secara keseluruhan. Menurut Standar dari ASCE (1997), metode pengujian dilakukan dengan penghilangan oksigen terlarut atau deoksigenasi (*deoxygenation*) air bersih dengan penambahan bahan kimia berupa Natrium Sulfit (Na₂SO₃). Setelah konsentrasi oksigen terlarut mendekati 0 mg/L kemudian dilakukan reaerasi (*reaeration*) sehingga konsentrasi DO naik dan mendekati tingkat jenuh oksigen. Pengambilan data konsentrasi DO untuk analisis dilakukan saat periode reaerasi tersebut dari waktu ke waktu di beberapa titik pengamatan dalam reaktor secara bersamaan.

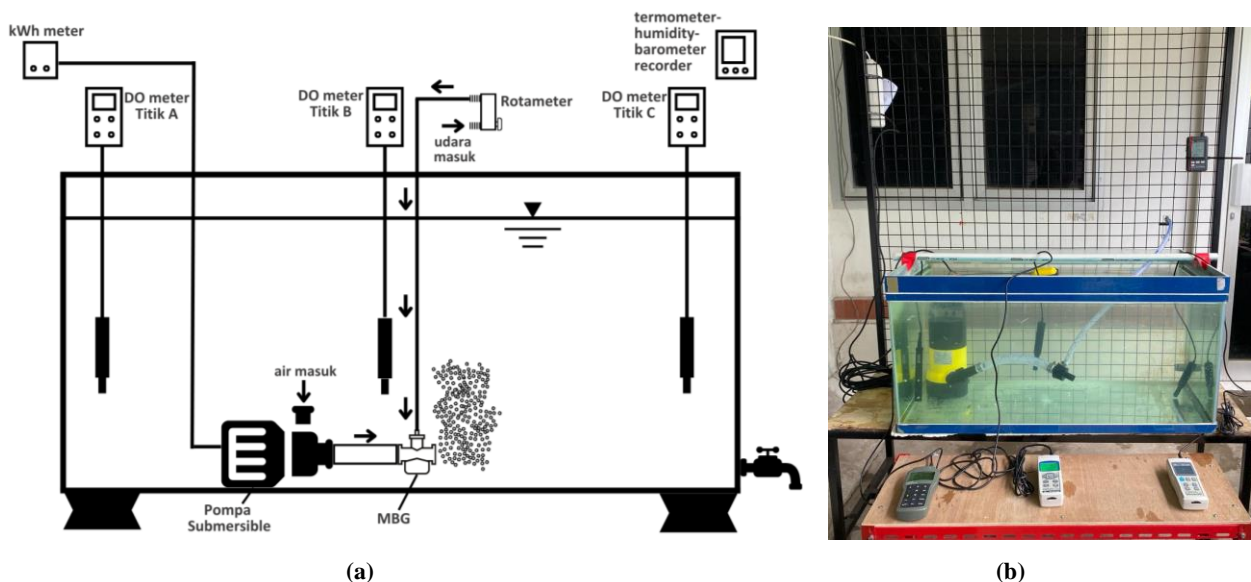
Proses deoksigenasi dilakukan dengan penambahan Natrium Sulfit (Na₂SO₃) sebagai *oxygen scavenger* yang bisa mengurangi oksigen terlarut. Biasanya untuk mengurangi 1 kg oksigen terlarut dibutuhkan sekitar 8 kg Natrium Sulfit dan dapat digunakan pula katalis Cobalt Chloride untuk menyalurkan oksigen dari reaktor (He et al., 2003). Reaksi dari bahan kimia tersebut dengan oksigen dapat ditulis sebagai berikut:



Setup alat

Dalam penelitian ini alat yang digunakan berupa reaktor berbahan kaca bening yang berisi air bersih dengan volume 200 liter, peralatan pengukuran DO (*oxygen probe* dan DO meter), kWh meter, rotameter, *temperature-humidity-barometer recorder*, pompa *submersible*, microbubble generator, *timer/stopwatch*, pipa selang, meja kerja, dan aksesoris pendukung (seperti klem, isolasi pipa, lem pipa dan lainnya). Bahan yang digunakan berupa Natrium Sulfit (Na_2SO_3) sebagai *oxygen scavenger*.

Perakitan alat disesuaikan dengan perlakuan 2 variasi debit gas (Q_G) dengan debit air (Q_L) yang sama sebesar 80 l/min. Variasi debit gas (Q_G) yaitu sebesar 0,15 l/min dan 0,30 l/min. Rangkaian tersebut dimulai dari pompa yang diletakkan di dalam reaktor dan mendapatkan listrik dari stop kontak yang sudah dipasang kWh meter. Kemudian dari pompa dipasang MBG dengan aliran gas didapatkan dari selang yang terhubung ke rotameter. Pastikan keluarnya gelembung-gelembung dari MBG berada di tengah reaktor sehingga dapat diasumsikan bahwa udara mengalir merata dalam reaktor. Alat-alat untuk pembacaan DO yang sudah dikalibrasi dan siap digunakan dipasang dengan memasukkan *oxygen probe* ke dalam reaktor dan diposisikan pada 3 titik pembacaan yaitu titik A (paling kiri), titik B (tepat di tengah) dan titik C (paling kanan). Sementara untuk DO meter diletakkan di meja kerja. *Temperature-humidity-barometer recorder* diletakkan di sebelah atas dekat dengan tangki. Diagram skema peralatan eksperimen ditunjukkan pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. (a) Diagram skema setup alat eksperimen (b) Setup alat saat penelitian berlangsung.

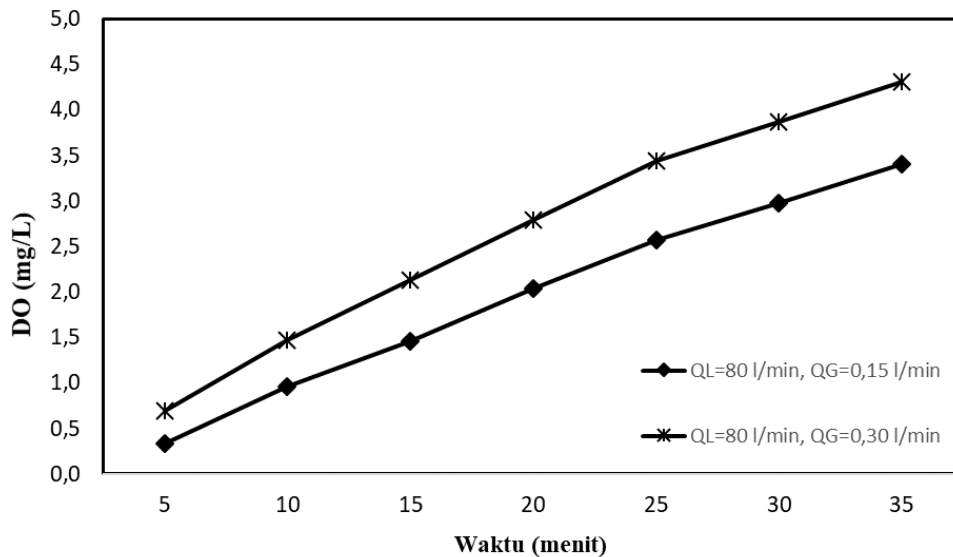
Pengambilan Data

Sebelum melakukan pengambilan data, dilakukan deoksigenasi pada reaktor dengan Natrium Sulfit (Na_2SO_3) yang ditambahkan secara bertahap untuk menurunkan konsentrasi DO hingga mendekati 0 mg/L. Sehingga pengambilan data awal dapat dimulai seragam untuk semua percobaan. Pengambilan data dilakukan dengan mengukur nilai DO dan suhunya pada DO meter, serta suhu, kelembaban, dan tekanan udara sekitar pada *temperature-humidity-barometer recorder* setiap 5 menit selama 35 menit proses aerasi. Pengambilan data dilakukan untuk semua kombinasi variasi debit air (Q_L) dan debit gas (Q_G). Pengambilan data dilakukan 3 kali untuk setiap percobaan. Semua data yang diukur kemudian dapat digunakan untuk menganalisis nilai K_{LA} dan diolah menggunakan Ms. Excel.

Hasil dan Pembahasan

Dissolved Oxygen (DO)

Berdasarkan data yang diambil membuktikan bahwa nilai oksigen terlarut atau *dissolved oxygen (DO)* mengalami peningkatan pada setiap variasi debit air (Q_L) dan debit gas (Q_G) yang disajikan pada Gambar 2. Dari grafik tersebut diketahui bahwa semakin lama proses aerasi maka konsentrasi DO dalam air akan semakin meningkat. Peningkatan nilai oksigen terlarut (DO) selama proses aerasi berlangsung menandakan terjadi proses transfer gas secara difusi selama aerasi yaitu terjadi difusi antara udara dalam gelembung-gelembung kecil (*fine bubble*) dengan air yang ada dalam reaktor.



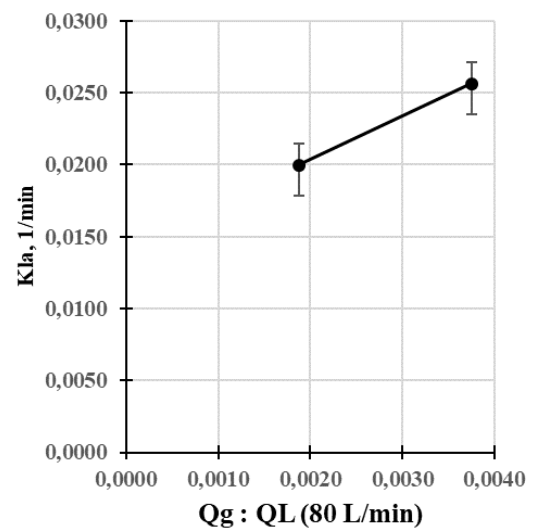
Gambar 2. Nilai Konsentrasi DO dengan berbagai variasi Q_G dan Q_L yang sama.

Pengaruh variasi Debit Gas (Q_G) dan Debit Air (Q_L) terhadap nilai Koefisien Transfer Oksigen (K_{La})

Debit gas (Q_G) yang berbeda akan menghasilkan ukuran dan jumlah konsentrasi gelembung yang berbeda pula. Ukuran gelembung yang terbentuk akan mempengaruhi luas transfer massa oksigen ke dalam cairan yang kemudian berpengaruh juga pada kemampuan bakteri untuk mendegradasi senyawa organik dalam sistem aerobik yang tercermin pada nilai K_{La} . Tabel 1. menunjukkan bahwa untuk nilai Q_L yang sama, pada Q_G yang lebih kecil diperoleh nilai K_{La} yang lebih rendah. Pada $Q_L = 80$ l/min, nilai K_{La} untuk $Q_G = 0,15$ l/min yaitu 0,01996/min nilainya lebih rendah dibanding $Q_G = 0,30$ l/min yang nilainya yaitu 0,02564/min.

Tabel 1. Nilai K_{La} pada variasi Q_G dengan Q_L 80 l/min

Q_G (l/min)	$Q_G:Q_L$ (80 l/min)	Titik Percobaan	K_{La}
0,15	0,0019	A	0,0178
		B	0,0206
		C	0,0214
		Rerata	0,01996
		Simpangan Deviasi	0,00190
0,30	0,0038	A	0,0231
		B	0,0265
		C	0,0273
		Rerata	0,02564
		Simpangan Deviasi	0,00226



Gambar 3. Nilai K_{La} dengan berbagai variasi Q_G dengan Q_L 80 l/min.

Hal ini dikarenakan pada Q_G yang lebih rendah akan dihasilkan ukuran gelembung yang lebih kecil namun konsentrasi gelembung yang dihasilkan juga rendah. Dapat dilihat pada grafik Gambar 2. nilai DO pada $Q_G = 0,15$ l/min untuk semua variasi Q_L masing-masing nilainya lebih rendah dibanding $Q_G = 0,30$ l/min. Konsentrasi gelembung 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 juga pada kecilnya jumlah suplai oksigen. Sedikitnya suplai oksigen yang ada akan mempengaruhi proses degradasi senyawa organik oleh bakteri aerob, sehingga efektivitas pengolahan air limbah menurun.

Peningkatan jumlah *microbubble* akan menyebabkan kontak permukaan antara gelembung dan cairan meningkat secara signifikan. Hal ini menyebabkan waktu kontak gelembung dan cairan akan lebih lama sehingga kecepatan naik (*rising velocity*) *microbubble* ke permukaan air akan lebih lambat. Waktu yang lebih lambat tersebut dapat menjadikan transfer oksigen ke dalam cairan terjadi dan mengakibatkan oksigen terlarut meningkat. Sementara itu, diameter *microbubble* yang semakin besar dapat menyebabkan waktu tinggal *microbubble* di air menjadi lebih singkat sehingga oksigen terlarut akan berkurang.

Dapat dilihat dari hasil analisis dan pembahasan di atas bahwa beberapa faktor yang termasuk dapat mempengaruhi nilai koefisien transfer oksigen (K_{La}) adalah diameter gelembung dan kecepatan naik gelembung. Kawahara et al. (2009) dan Nock et al. (2016) juga menemukan bahwa koefisien transfer oksigen tergantung pada kecepatan gelembung, diameter gelembung, viskositas dinamis fluida, dan difusivitas massa. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Juwana (2019) juga telah membuktikan bahwa nilai K_{La} dipengaruhi oleh kenaikan debit air dan debit gas yang dapat menghasilkan semakin banyak gelembung berukuran kecil. Penelitian yang dilakukan oleh Baylar et al. (2006) menjelaskan perbandingan variasi debit air dan debit gas merupakan parameter penting. Laju aliran air yang semakin meningkat menyebabkan tegangan geser meningkat sehingga aliran berubah menjadi turbulen. Aliran turbulen memiliki bilangan *Reynolds* tinggi dengan viskositas cairan yang rendah.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari analisis dan pembahasan tersebut, peneliti dapat menyimpulkan bahwa

1. Proses aerasi menggunakan teknologi MBG terbukti mampu untuk menaikkan konsentrasi DO dalam air bersih, semakin lama proses aerasi yang dilakukan konsentrasi DO akan semakin meningkat yang kemudian akan cenderung menuju keadaan jenuh. Hal ini diharapkan teknologi MBG dapat mensuplai oksigen yang diperlukan bakteri aerob pada pengolahan air limbah.
2. Variasi debit gas (Q_G) dengan debit air (Q_L) yang sama dapat berpengaruh pada nilai K_{La} . Peningkatan debit gas (Q_G) dari 0,15 l/min menjadi 0,30 l/min menunjukkan bahwa terjadi peningkatan terhadap transfer massa oksigen yang ditunjukkan pada nilai K_{La} yang meningkat. Debit gas (Q_G) yang berbeda akan menghasilkan ukuran dan jumlah konsentrasi gelembung yang berbeda pula. Ukuran gelembung yang terbentuk akan mempengaruhi luas transfer massa oksigen dan peningkatan jumlah atau konsentrasi *microbubble* akan menyebabkan kontak permukaan antara gelembung dan cairan meningkat secara signifikan sehingga dapat mempengaruhi nilai K_{La} .
3. Hasil penelitian ini masih merupakan eksplorasi tahap awal untuk mengetahui performa MBG lebih lanjut dan mendapatkan data dasar yang dapat memberikan kontribusi dalam penyediaan informasi terkait data desain dan desain kriteria dari MBG untuk aplikasi pengolahan air limbah yang hemat energi dan dengan kinerja pengolahan yang baik.
4. Perlu dilakukan percobaan tambahan untuk variasi debit gas (Q_G) maupun debit air (Q_L) yang digunakan sehingga bisa mendapatkan data yang lebih luas untuk memperhitungkan performa dari *microbubble* generator (MBG). Setidaknya minimal masing-masing sejumlah 3 jenis variasi sehingga dapat dilakukan interpretasi data yang lebih baik.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Gadjah Mada yang telah memberikan hibah penelitian ini. Selain itu penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Bapak Daniel selaku laboran Departemen Teknik Kimia UGM yang telah membantu dalam melakukan *set up* alat.

Daftar Pustaka

- ASCE. Standard Guidelines for In-Process Oxygen Transfer Testing. 3 45 E. 47th St, New York, NY:ASCE. 1997: 18-96.
- Baylar A, Ozkan F. Applications of Venturi Principle to Water Aeration Systems. *Environmental Fluid Mechanics*. 2006; 6: 341-357.
- Budhijanto W, Deendarlianto, Kristiyani H, & Satriawan D. Enhancement of Aerobic Wastewater Treatment by The Application of Attached Growth Microorganisms and Microbubble Generator. *International Journal of Technology* 2015; 7: 1101-1109.
- Indriaswari H. Perancangan dan Evaluasi Start-Up Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Toilet/Kamar Mandi Umum Wisdom Park UGM Dilengkapi dengan Microbubble Generator Nozzle dan Aerasi Intermittent untuk Menurunkan Kadar COD dan TSS. Universitas Gadjah Mada Yogyakarta Indonesia, Skripsi, 2019.
- Juwana W E. Hydrodynamic characteristics of the microbubbledissolution in liquid using orifice type microbubblegenerator. *Chemical Engineering Research and Design*. 2019; 141: 436-448.



- Kurniawan A. Pengaruh Microbubble Generator Sebagai Aerator Terhadap Tingkat Oksigen Terlarut Pada Embung di Taman Kearifan UGM. Universitas Gadjah Mada Yogyakarta Indonesia, Skripsi, 2019.
- Kawahara A, Sadatomi M, Matsuyama F, Matsuura H, Tominaga M, Noguchi M. Prediction of microbubble dissolution characteristics in water and seawater. *Exp. Therm.Fluid Sci.* 2009; 33: 883–894.
- Lewis W K, and Whitman W G. Principles of gas absorption. *Industrial and Engineering Chemistry* 1924; 16: 1215–1220.
- Liu C, Tanaka H, Ma J, Zhang L, Zhang J, and Huang X. Effect of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge Using Shirasu Porous Glass (SPG) Membrane System. *Water Research* 2012; 46 (18): 6051–6058.
- Metcalf and Eddy Inc. "Waste water Engineering; Treatment disposal and reuse". Tata McGraw Hill. New Delhi, India. American Public Health Association. 2003.
- Newbry B W. Oxygen-transfer efficiency of fine-pore diffused aeration systems: energy intensity as a unifying evaluation parameter. *Water Environment Research* 1998; 70: 323-333.
- Nock W J, Heaven S, Banks C J. Mass transfer and gas–liquid interface properties of single CO₂ bubbles rising in tap water. *Chem. Eng. Sci.* 2016; 140: 171–178.
- Terasaka K, Hirabayashi A, Nishino T, Fujioka S, Kobayashi D. Development of Microbubble Aerator for Waste Water Treatment using Aerobic Activated Sludge. *Chemical Engineering Science* 2011; 66(14): 3172–3179.
- U.S Environmental Protection Agency-EPA. Wastewater Technology Fact Sheet Fine Bubble Aeration. 1999. Washington D.C., United States of America: Author.