

Analisis Performa Microbubble Generator Terhadap Koefisien Transfer Oksigen (K_{La}) Pada Variasi Debit Gas (Q_G)

Louise Tuahta Perangin angin^{1*}, Sri Puji Saraswati², Johan Syafri Mahathir Ahmad²

¹Magister Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

²Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: louisetuahtaperangin@mail.ugm.ac.id

INTISARI

Aerasi konvensional yang digunakan pada IPAL banyak menghasilkan gelembung besar. Ukuran gelembung yang besar ini menyebabkan *rising velocity* yang tinggi dan waktu tinggal yang singkat dalam air, sehingga mengurangi waktu kontak yang dibutuhkan untuk difusi oksigen dan pada akhirnya menurunkan efektifitas transfer oksigen. Gelembung *micro* yang dihasilkan oleh Microbubble Generator (MBG) terbukti lebih efektif dalam transfer oksigen sehingga menaikkan kadar oksigen lebih baik dibanding *macrobubble*. Tetapi belum ada kajian pengaruh antara debit gas efektif untuk memaksimalkan transfer oksigen pada tahap aerasi. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan variasi debit gas (Q_G) dari 0,3; 0,6; 0,9; 1,2; hingga 1,5 L/mmin. Kinerja sistem diukur berdasarkan laju kenaikan oksigen terlarut (DO) terhadap waktu dan dihitung nilai koefisien transfer oksigen (K_{La})-nya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan debit gas hingga 1,2 L/menit (rasio $Q_G:Q_L = 0,0150$ L/menit) secara signifikan mempercepat laju oksigenasi dan meningkatkan nilai K_{La} hingga mencapai puncak sebesar 0,0248 1/min. Namun, peningkatan debit lebih lanjut hingga 1,5 L/menit justru menyebabkan penurunan efisiensi yang ditandai dengan turunnya K_{La} menjadi 0,0176 1/min. Fenomena ini mengindikasikan terjadinya *diminishing returns* akibat berkurangnya waktu kontak dan potensi koalesensi gelembung pada kondisi turbulensi berlebih. Simpulan dari penelitian ini adalah debit gas 1,2 L/menit merupakan kondisi operasi optimal untuk sistem ini, yang menawarkan efisiensi transfer oksigen tertinggi tanpa pemborosan energi. Temuan ini memberikan panduan operasional yang kritis untuk aplikasi sistem aerasi Porous-Venturi yang efisien.

Kata kunci: Aerasi, Porous-Venturi, Koefisien Transfer Oksigen (K_{La}), Debit Gas, Titik Optimal, *Dissolved Oxygen* (DO)

1 PENDAHULUAN

Setiap tahunnya sekitar 1,8-5,4% konsumsi listrik global dihabiskan untuk pengolahan air limbah (Magni et al., 2025). Metode pengolahan air limbah paling umum sejauh ini adalah dengan metode lumpur aktif dimana proses aerobik adalah tulang punggung dari pengolahan air limbah modern, yang mengandalkan transfer oksigen yang efisien dari udara ke air untuk menjaga metabolisme mikroba. Tahap aerasi saja dapat menyumbang 45-75% dari total konsumsi energi sebuah instalasi menjadikan optimasinya sebagai target utama untuk meningkatkan keberlanjutan dan mengurangi biaya operasional (Rosso & Knudson Stenstrom, 2007). Sistem aerasi tradisional kebanyakan menghasilkan gelembung yang besar (*coarse bubble*), meskipun secara mekanis sederhana, pada dasarnya tidak efisien karena kecepatan naik gelembung yang cepat, yang membatasi waktu kontak gas-cair. Sebagaimana penelitian yang dibuktikan Agarwal (2011) ukuran gelembung merupakan faktor penentu efisiensi transfer oksigen. Gelembung berukuran lebih kecil (*microbubble*) menghasilkan luas permukaan kontak yang lebih besar per unit volume, sehingga secara langsung meningkatkan laju transfer oksigen. Temuan Terasaka (2011) mengonfirmasi bahwa ukuran gelembung berpengaruh krusial terhadap efisiensi perpindahan oksigen antar-fasa, dimana gelembung berukuran kecil (*fine bubble*) menciptakan luas permukaan spesifik yang lebih besar sehingga mendorong peningkatan Laju Transfer Oksigen (OTR).

Microbubble Generator (MBG) muncul sebagai alternatif yang menjanjikan untuk mengatasi keterbatasan ini. Sebuah teknologi yang memanfaatkan prinsip hidrodinamika pada *nozzle* untuk menghasilkan gelembung mikro guna keperluan aerasi yang efisien energi. Seperti dilaporkan Temesgen (2017), gelembung dengan rentang diameter 30-100 μm ini menghasilkan luas area permukaan yang lebih besar dan memiliki kecepatan pengangkatan (*rise velocity*) yang jauh lebih lambat apabila dibandingkan dengan aerator biasa, sehingga secara drastis meningkatkan kinerja transfer oksigen. Pada penelitian yang dilakukan oleh Mistoro (2023) menunjukkan kenaikan koefisien transfer oksigen (K_{La}) dibarengi dengan kenaikan debit gas (Q_G) ini menunjukkan adanya hubungan antara debit gas (Q_G) dengan koefisien transfer oksigen (K_{La}). Tetapi belum ada batas atas kenaikan debit gas (Q_G) efektif untuk kenaikan koefisien transfer oksigen (K_{La}) untuk mengetahui performa pada MBG. Performa komparatif antara perbedaan debit udara (Q_G) dimana batas efektif pada debit gas untuk transfer oksigen. Dimana kemampuan produksi *microbubble* dan

macrobubble oleh MBG dapat mempengaruhi koefisien transfer oksigen (K_La). Untuk mendapatkan informasi tentang interaksi antara MBG dan debit gas (Q_G) terhadap transfer oksigen maka penelitian ini diharapkan nantinya dapat memberikan kontribusi dalam penyediaan informasi terkait transfer oksigen dari MBG untuk aplikasi pengolahan air limbah yang hemat energi dan dengan kinerja pengolahan yang baik.

2 TINJAUAN PUSTAKA

Aerasi merupakan istilah khusus untuk transfer gas, terutama yang berfokus pada proses penambahan kadar oksigen terlarut didalam air (Popel, 1976). Teori yang paling umum digunakan adalah Teori dua selaput (*Two-film Theory*) yang dikemukakan oleh Lewis dan Whitman (1924) menyatakan bahwa laju transfer gas bergantung pada koefisien transfer massa keseluruhan dan resistansi dari dua lapisan film pada antarmuka gas-cair. Untuk gas yang kelarutannya rendah seperti oksigen, resistansi dominan terdapat pada lapisan film cair, sehingga resistansi di lapisan film gas dapat diabaikan. Dengan penyederhanaan ini, laju transfer oksigen dapat dimodelkan dengan persamaan berikut:

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

Dalam persamaan ini, K_La merupakan koefisien transfer oksigen ($1/t$), C_s menunjukkan konsentrasi oksigen jenuh (mg/L), dan C adalah konsentrasi oksigen aktual dalam air pada waktu t (mg/L). Persamaan integralnya dapat ditulis sebagai:

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

atau dalam bentuk eksponensial:

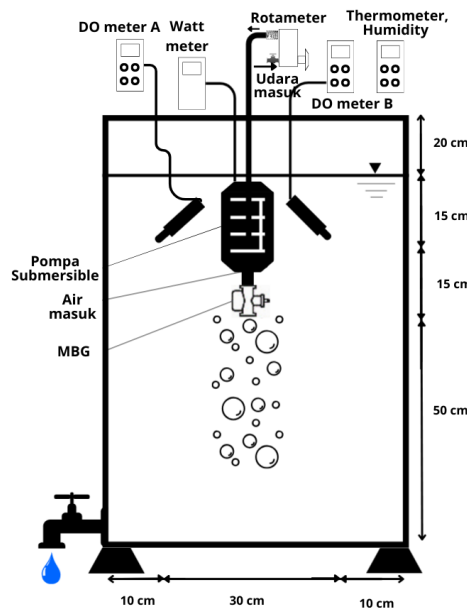
$$C = C_s - (C_s - C_0) \cdot \exp[K_L a \cdot (t - t_0)] \quad (3)$$

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*).

3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini digunakan MBG tipe Porous-Venturi, tipe tangki aerator dengan geometri vertikal, dan 5 debit udara (0,3;0,6;0,9;1,2;1,5 l/min). Tangki reaktor berbahan kaca dan diisi air bersih dengan volume 200 liter, peralatan pengukuran DO (Oxygen probe dan DO meter), watt meter, rotameter, thermometer, humidity meter, pompa submersible dengan debit air (Q_L) 80 l/min, timer, selang, meja kerja dan aksesoris pendukung (seal tip dan klem). Bahan yang digunakan berupa Natrium Sulfit (Na_2SO_3) dan Kobalt (ii) Klorida heksahidrat ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) untuk proses deoksigenisasi. Penentuan koefisien transfer massa (K_La) dapat dilakukan melalui beberapa metode eksperimen. Pada studi ini, digunakan metode *non-steady state* dengan media air bersih, yang merupakan prosedur standar untuk mengukur laju re-oksigenasi (Metcalf & Eddy, 2003). Prinsip utamanya adalah mendeoksigenasi air menggunakan natrium sulfit, kemudian memantau konsentrasi oksigen terlarut (DO) selama proses aerasi ulang hingga mencapai kondisi hampir jenuh. Pengukuran DO dilakukan pada beberapa interval waktu untuk memperoleh nilai K_La (Al-Ahmady, 2006).

Sebelum rangkaian alat di taruh dalam tangki reaktor, air uji mengalami proses deoksigenisasi hingga mendekati 0,0 mg/L menurut *ASCE standard*, (2007) dimana untuk menghilangkan setiap 1 mg/L kadar oksigen terlarut (DO) membutuhkan 7,88 mg/L Natrium Sulfit (Na_2SO_3) sedangkan dosis Kobalt (ii) Klorida Heksahidrat ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) untuk katalis sekitar 0,1-0,5 mg/L dari volume air uji. Ini juga dilakukan agar pembacaan kenaikan DO, nilai DO awal dapat seragam untuk semua variasi. Setelah DO meter dikalibrasi oxygen probe ditempatkan pada titik A dan B seperti Gambar 1. Setelah rangkaian pompa, MBG dan rotameter sudah semua terhubung, rangkaian ditempatkan pada didalam tangki dengan variasi debit gas (Q_G) yang sudah disesuaikan pada rotameter. Sesaat DO meter dinyalakan untuk *logger* data untuk memantau kenaikan DO, pompa juga dinyalakan yang telah terhubung dengan watt meter. Untuk skema peralatan eksperimen ditunjukkan pada gambar 1 berikut ini.



Gambar 1 Skema rangkaian alat eksperimen Tangki Vertikal

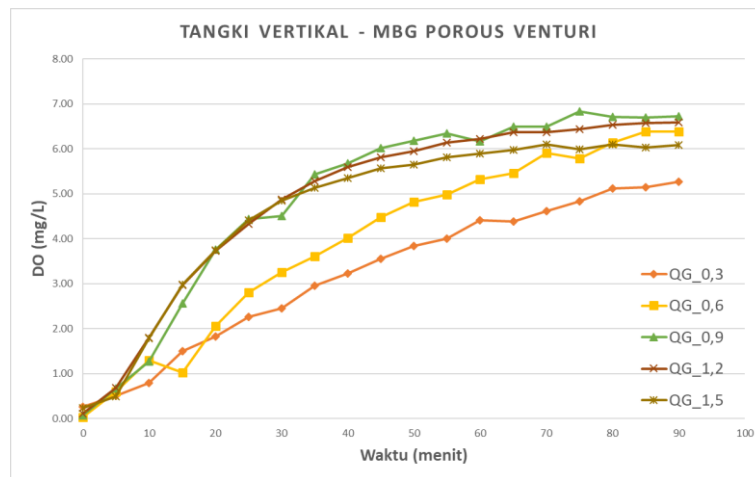
Setelah 90 menit pompa dimatikan begitu juga dengan DO meter. Pembacaan data kenaikan DO dibaca oleh DO meter setiap 1 menit. Pengambilan data dilakukan sebanyak 3 kali pengulangan, setiap pengujian air uji diganti dengan yang baru sehingga *Total Dissolved Solid* (TDS) tidak menumpuk pada air uji. Lalu data kenaikan DO yang diukur di *export* ke excel untuk dianalisis agar masing masing mendapatkan nilai K_{La} .

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Efektifitas aerator terhadap debit gas (Q_G)

Dari hasil dari menunjukkan setiap variasi debit gas (Q_G) memiliki kecepatan koefisien transfer oksigen yang berbeda beda. Secara umum, seluruh variasi debit mulai dari 0,3; 0,6; 0,9; 1,2; hingga 1,5 L/min menunjukkan pola kenaikan DO yang cepat di awal dan kemudian melambat seiring waktu hingga mendekati kondisi jenuh. Pola ini sesuai dengan prinsip transfer oksigen, di mana gradien konsentrasi antara gelembung udara dan air semakin mengecil seiring bertambahnya DO dalam air yang dikemukakan oleh Popel, 1976. Dari kelima kurva, teramati bahwa peningkatan debit gas (Q_G) secara konsisten menghasilkan kurva yang lebih curam dan waktu pencapaian DO jenuh yang lebih singkat. Debit gas (Q_G) terendah (0,3 L/min) menunjukkan kinerja yang paling landai, mengindikasikan bahwa energi yang diberikan belum cukup untuk menciptakan turbulensi dan area kontak gas-cair yang optimal. Sebaliknya, debit gas (Q_G) yang lebih tinggi, khususnya 1,2 dan 1,5 L/min, menghasilkan kenaikan DO yang sangat cepat, berkat intensitas gelembung dan pencampuran yang lebih tinggi seperti gambar 2. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Juwana dkk., (2019) juga telah membuktikan bahwa nilai K_{La} dipengaruhi oleh kenaikan debit air dan debit gas (Q_G) yang dapat menghasilkan semakin banyak gelembung berukuran kecil.

Analisis lebih mendalam menunjukkan bahwa meskipun debit gas (Q_G) 1,5 L/min mencapai kondisi jenuh paling cepat, selisih nilai DO jenuh antara debit gas (Q_G) 1,2 L/min dan 1,5 L/min relatif kecil. Hal ini mengungkap adanya titik *diminishing returns* di mana penambahan debit tidak lagi memberikan peningkatan hasil yang signifikan. Seperti pada penelitian Batara dkk., (2017) debit gas (Q_G) yang lebih besar tidak sebanding dengan kenaikan pada debit gas (Q_G) yang lebih kecil. Dengan kata lain, dari segi efisiensi energi, debit gas (Q_G) 1,2 L/min dapat dianggap mendekati kondisi optimal untuk sistem ini. Penggunaan debit gas (Q_G) 1,5 L/min memang unggul dalam kecepatan, tetapi memerlukan konsumsi energi lebih besar tanpa diimbangi peningkatan performa akhir yang proporsional. Oleh karena itu, untuk aplikasi riil, pemilihan debit gas operasi sebaiknya mempertimbangkan kecepatan transfer oksigen, di mana debit gas (Q_G) sekitar 1,2 L/min dapat menjadi pilihan yang lebih rasional.



Gambar 2. Nilai Kenaikan Konsentrasi DO berbagai kombinasi.

4.2 Nilai Koefisien Transfer oksigen (K_{La}) dalam berbagai debit gas.

Pada debit gas (Q_G) 0,3 L/min, nilai K_{La} rerata tercatat sebesar 0,0126 1/min. Yang mengonfirmasi analisis sebelumnya bahwa energi yang diberikan belum optimal untuk menciptakan area antarmuka yang luas. Standar deviasi yang relatif tinggi (0,0037) di antara titik sampel A dan B juga mengindikasikan ketidakstabilan performa sistem pada debit ini. Saat debit dinaikkan menjadi 0,6 L/min, terjadi lompatan signifikan pada efisiensi transfer oksigen, ditunjukkan oleh kenaikan K_{La} rerata menjadi 0,0227 1/min. Peningkatan ini selaras dengan kurva kenaikan DO yang jauh lebih curam, didukung oleh standar deviasi yang lebih kecil, yang menandakan performa sistem yang mulai stabil dan lebih efisien. (Nock dkk., 2016) mengidentifikasi bahwa kecepatan dan diameter gelembung, viskositas dinamis fluida, serta difusivitas massa merupakan faktor-faktor yang menentukan besarnya koefisien transfer oksigen.

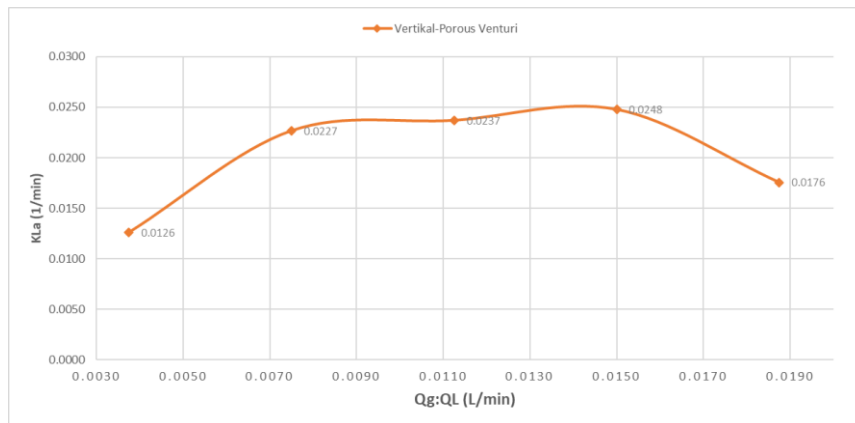
Tabel 1. Nilai K_{La} pada variasi debit gas (Q_G)

QG (L/min)	QG:QL (L/min)	Titik sample	Kla (1/min)
0.3	0.0038	A	0.0152
		B	0.0100
		Rerata	0.0126
		Standar Deviasi	0.0037
0.6	0.0075	A	0.0242
		B	0.0211
		Rerata	0.0227
		Standar Deviasi	0.0021
0.9	0.0113	A	0.0232
		B	0.0242
		Rerata	0.0237
		Standar Deviasi	0.0008
1.2	0.0150	A	0.0268
		B	0.0227
		Rerata	0.0248
		Standar Deviasi	0.0029
1.5	0.0188	A	0.0180
		B	0.0172
		Rerata	0.0176
		Standar Deviasi	0.0006

Yang menarik adalah tren K_{La} pada debit menengah hingga tinggi. Kenaikan debit gas dari 0,9 L/min ke 1,2 L/min hanya menghasilkan peningkatan K_{La} rerata yang sangat kecil, dari 0,0237 1/min menjadi 0,0248 1/min. Data kuantitatif ini secara tegas membuktikan adanya fenomena *diminishing returns* yang sebelumnya telah diidentifikasi. Sistem mulai mencapai titik di mana penambahan energi (berupa peningkatan debit gas) tidak lagi memberikan peningkatan efisiensi transfer oksigen yang signifikan. Titik optimal efisiensi ini semakin jelas terlihat pada debit gas 1,5 L/min, di mana nilai K_{La} rerata justru turun drastis menjadi 0,0176 1/min. Salah satu penjelasan yang mungkin adalah pada debit yang sangat tinggi, waktu kontak antara gelembung udara dan air menjadi terlalu singkat karena gelembung bergerak terlalu cepat ke permukaan. Akibatnya, meskipun jumlah gelembung banyak, oksigen di dalam gelembung tidak memiliki waktu yang cukup untuk berdifusi ke dalam air. Selain itu, pola aliran yang terlalu turbulen

mungkin telah menyebabkan koalesensi (penggabungan) gelembung, yang justru mengurangi luas area permukaan kontak total.

Dengan demikian, analisis K_{La} ini tidak hanya menguatkan analisis grafik, tetapi juga memberikan presisi dalam menentukan titik optimal. Data menunjukkan bahwa untuk sistem MBG Porous-Venturi ini, debit gas sekitar 1,2 L/min menghasilkan efisiensi transfer oksigen (K_{La}) yang tertinggi sebelum akhirnya mengalami penurunan, menjadikannya pilihan operasi yang paling efektif dan efisien.



Gambar 3. Perbandingan Nilai K_{La} setiap Kombinasi Debit gas (Q_G)

Namun, analisis lebih lanjut mengungkap adanya titik optimal dalam operasi sistem. Ketika debit gas ditingkatkan lebih lanjut menjadi 1,5 L/min ($Q_G:Q_L = 0,0188$ L/min), nilai K_{La} rerata justru mengalami penurunan yang nyata menjadi 0,0176 1/min. Fenomena *diminishing returns* ini mengindikasikan bahwa setelah titik tertentu, penambahan energi input tidak lagi memberikan peningkatan kinerja yang proporsional. Penurunan efisiensi pada debit tinggi ini diduga kuat disebabkan oleh dua faktor utama: (1) berkurangnya waktu kontak antara gelembung udara dan air akibat kecepatan aliran yang berlebihan, sehingga proses difusi oksigen tidak dapat berlangsung secara optimal; dan (2) terjadinya koalesensi gelembung pada kondisi turbulensi tinggi, yang mengurangi luas permukaan kontak total secara keseluruhan.

Baylar dan Ozkan, (2006) menyatakan bahwa rasio antara debit air dan debit gas merupakan parameter kunci. Peningkatan debit air dan gas akan meningkatkan tegangan geser, yang kemudian mentransformasikan karakteristik aliran menjadi turbulen. Aliran turbulen ini dicirikan oleh bilangan Reynolds yang tinggi dan viskositas cairan yang rendah. Namun debit gas dan air memiliki rasio efektifitas dalam transfer oksigen seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Gillot (1999) dan Batara (2017) memiliki *diminishing returns* dimana efektifitas antara debit gas cenderung stagnan dan cenderung menurun karena ukuran gelembung makro lebih banyak populasinya dibandingkan gelembung *micro*. Sehingga terjadi koalisi menyebabkan waktu transfer oksigen yang lebih cepat dan tidak terjadinya difusi antara oksigen dan air (Chang dkk., 2024).

5 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa efisiensi transfer oksigen menunjukkan ketergantungan yang signifikan terhadap variasi debit gas operasional. Analisis komprehensif terhadap kinerja sistem mengungkap bahwa peningkatan debit gas (Q_G) dari 0,3 L/menit hingga 1,2 L/menit menghasilkan perbaikan progresif dalam laju transfer oksigen, yang tercermin dari kemiringan kurva *dissolved oxygen* yang semakin curam dan peningkatan nilai koefisien transfer oksigen (K_{La}) hingga mencapai optimum 0.0248 1/min pada rasio $Q_G:Q_L$ 0,0150 L/menit. Namun, eksperimen lebih lanjut membuktikan adanya fenomena *diminishing returns* ketika debit gas ditingkatkan menjadi 1,5 L/menit, dimana nilai K_{La} justru mengalami penurunan signifikan menjadi 0,0176 1/menit. Temuan ini mengindikasikan bahwa kondisi operasi optimal sistem terletak pada debit gas 1,2 L/menit, dimana keseimbangan antara turbulensi, luas antarmuka gas-cair, dan waktu kontak mencapai titik paling cepat pada transfer oksigen. Hasil penelitian ini merekomendasikan bahwa optimasi parameter operasional merupakan faktor kritis dalam mendesain sistem aerasi Porous-Venturi untuk mencapai efisiensi transfer massa.

REFERENSI

- Agarwal, A., Ng, W. J., & Liu, Y. (2011). Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere*, 84(9), 1175–1180. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.054>
- Al-Ahmady, K. K. (2006). Analysis of Oxygen Transfer Performance on Sub-surface Aeration Systems. Dalam *Int. J. Environ. Res. Public Health* (Vol. 3, Nomor 3). www.ijerph.org
- ASCE. (2007). *Measurement of oxygen transfer in clean water*. American Society of Civil Engineers.
- Batara, K., Zaman, B., & Oktiawan, W. (2017). Pengaruh debit udara dan waktu aerasi terhadap efesiensi penurunan besi dan mangan menggunakan diffuser aerator pada air tanah. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 6(1).
- Baylar, A., & Ozkan, F. (2006). Applications of venturi principle to water aeration systems. Dalam *Environmental Fluid Mechanics* (Vol. 6, Nomor 4, hlm. 341–357). <https://doi.org/10.1007/s10652-005-5664-9>
- Chang, Y., Shang, Q., Sheng, L., Deng, J., & Luo, G. (2024). Gas-liquid countercurrent flow characteristics in a microbubble column reactor. *Chemical Engineering Science*, 300. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120573>
- Gillot, S., He, A., & Duit, Â. (1999). Effect of air flow rate on oxygen transfer in an oxidation ditch equipped with fine bubble diffusers and slow speed mixers. *Cemagref (Institute of Agricultural and Environmental Engineering Research), Parc de Tourvoie, B.P. 44, 92163 Antony Cedex, France*. www.elsevier.com/locate/watres
- Juwana, W. E., Widyatama, A., Dinaryanto, O., Budhijanto, W., Indarto, & Deendarlianto. (2019). Hydrodynamic characteristics of the microbubble dissolution in liquid using orifice type microbubble generator. *Chemical Engineering Research and Design*, 141, 436–448. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.11.017>
- Lewis, W. K., & Whitman, W. G. (1924). Principles of Gas Absorption. *Industrial & Engineering Chemistry*, 16(12), 1215–1220. <https://doi.org/10.1021/ie50180a002>
- Magni, M., Jones, E. R., Bierkens, M. F. P., & van Vliet, M. T. H. (2025). Global energy consumption of water treatment technologies. *Water Research*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123245>
- Metcalf & Eddy, & Inc. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4 ed.). McGraw-Hill Companies, Inc.
- Mistoro, N., Saraswati, P., Syafri, J., Ahmad, M., & Wiratni, D. (2023). *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan” Analisis Pengaruh Variasi Debit Air (QL) dan Debit Gas (QG) terhadap Koefisien Transfer Oksigen (KLa) pada Performa Microbubble Generator*.
- Nock, W. J., Heaven, S., & Banks, C. J. (2016). Mass transfer and gas-liquid interface properties of single CO₂ bubbles rising in tap water. *Chemical Engineering Science*, 140, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.10.001>
- Popel. (1976). *Aeration and Gas Transfer*.
- Rosso, D., & Knudson Stenstrom, M. (2007). Energy-saving benefits of denitrification. *American Academy of Environmental Engineers and Scientists*. <http://www.aaees.org>
- Temesgen, T., Bui, T. T., Han, M., Kim, T. il, & Park, H. (2017). Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review. Dalam *Advances in Colloid and Interface Science* (Vol. 246, hlm. 40–51). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.06.011>
- Terasaka, K., Hirabayashi, A., Nishino, T., Fujioka, S., & Kobayashi, D. (2011). Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge. *Chemical Engineering Science*, 66(14), 3172–3179. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.02.043>