

KAJI SIMULASI VARIASI KECEPATAN INLET AIR PADA MICROBUBBLE GENERATOR TIPE ALIRAN SWIRL DENGAN BAFFLE OUTLET

SIMULATION STUDY OF WATER INLET VELOCITY VARIATIONS IN A SWIRL FLOW TYPE MICROBUBBLE GENERATOR WITH OUTLET BAFFLE

Yongki Christandi Batubara^{1*}, Rijal Surya Rahmany², I Made Ivan Wiyarta Cakra Sujana³
Institut Teknologi Kalimantan, Indonesia

*Email Correspondence: yongki.batubara@lecturer.itk.ac.id

Abstract

The need to improve water quality in the aquaculture and wastewater treatment sectors has driven the development of more efficient aeration technologies. Conventional aerators generally produce large bubbles, resulting in relatively short air-water contact times and low oxygen transfer efficiency. Microbubble generators (MBG) are one solution to this problem because they can produce micro-sized bubbles with a large specific surface area and low-rise velocity. Simulations were performed using the computational fluid dynamics (CFD) method with the Eulerian approach and the $k-\epsilon$ standard turbulence model. The water inlet velocity was varied from 11 to 15 m/s, while the air inlet pressure was set at atmospheric pressure. The simulation results showed that the swirl flow pattern inside the chamber was able to significantly reduce the pressure around the gas nozzle tip. Negative pressure began to form at an inlet water velocity of 13 m/s with a minimum pressure value of -14.05 kPa and decreased further to -50.9 kPa at a velocity of 15 m/s. These results indicate that an increase in swirl flow velocity directly affects the MBG's ability to generate negative pressure and automatically suck in air. The findings of this study can be used as a basis for the design and selection of suitable pumps for swirl-type microbubble generator applications.

Keywords: Microbubble generator, Swirl Flow, CFD, Negative Pressure, Turbulence $k-\epsilon$.

Abstrak

Kebutuhan akan peningkatan kualitas air pada sektor akuakultur dan pengolahan air limbah mendorong pengembangan teknologi aerasi yang lebih efisien. Aerator konvensional umumnya menghasilkan gelembung berukuran besar sehingga waktu kontak udara-air relatif singkat dan efisiensi transfer oksigen menjadi rendah. Microbubble generator (MBG) merupakan salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut karena mampu menghasilkan gelembung berukuran mikro dengan luas permukaan spesifik yang besar dan kecepatan naik yang rendah. Simulasi dilakukan menggunakan metode computational fluid dynamics (CFD) menggunakan pendekatan Eulerian dengan model turbulensi standar $k-\epsilon$. Kecepatan inlet air divariasikan dari 11 hingga 15 m/s, sedangkan tekanan inlet udara ditetapkan pada tekanan atmosfer. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pola aliran swirl di dalam chamber mampu menurunkan tekanan secara signifikan di sekitar ujung nosel gas. Tekanan negatif mulai terbentuk pada kecepatan inlet air sebesar 13 m/s dengan nilai tekanan minimum mencapai $-14,05$ kPa dan semakin menurun hingga $-50,9$ kPa pada kecepatan 15 m/s. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan aliran swirl berpengaruh langsung terhadap kemampuan MBG dalam menghasilkan tekanan negatif dan menghisap udara secara otomatis. Temuan penelitian ini dapat menjadi dasar dalam perancangan dan pemilihan pompa yang sesuai untuk aplikasi microbubble generator tipe aliran swirl.

Kata kunci: Microbubble generator, aliran swirl, CFD, tekanan negatif, $k-\epsilon$ turbulen.

PENDAHULUAN

Pertumbuhan sektor industri, perikanan, dan akuakultur di Indonesia mengalami peningkatan yang signifikan seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan air bersih dan

pangan. Namun demikian, peningkatan aktivitas tersebut sering kali diikuti oleh penurunan kualitas air, khususnya menurunnya kadar oksigen terlarut (*dissolved oxygen*/DO). Kondisi DO yang rendah dapat berdampak negatif terhadap organisme akuatik serta menurunkan efisiensi proses biologis pada instalasi pengolahan air limbah (Fitriadi, 2025).

Teknologi *microbubble generator* (MBG) merupakan salah satu solusi untuk meningkatkan efisiensi proses aerasi pada sistem akuakultur dan pengelolaan air. Beberapa aplikasi *microbubble generator* adalah dapat meningkatkan kualitas air untuk pertumbuhan kerang dan peningkatan oksigen terlarut (*dissolved oxygen*) di kolam budidaya ikan. Penggunaan *microbubble generator* pada aerasi kultur jaringan di bioreaktor. Untuk proses pengapungan dan separasi mineral di Industri. Mengurangi biaya operasional pada proses pengolahan air limbah. Aplikasi *microbubble* dapat juga digunakan dalam sektor medis, kelautan dan industri kimia (Mawarni dkk., 2023).

Microbubble generator bekerja dengan prinsip memecah udara menjadi gelembung berukuran mikro, umumnya dengan diameter kurang dari 100 μm (Zahra dkk., 2024). Ukuran gelembung yang kecil menghasilkan luas permukaan kontak yang besar dan kecepatan naik yang rendah, sehingga waktu tinggal gelembung di dalam air menjadi lebih lama dan efisiensi transfer oksigen meningkat secara signifikan (Kizhisseri dkk., 2025). Menurut (Mahendra dkk., 2025), pembentukan gelembung sangat dipengaruhi oleh interaksi dua fasa fluida, gaya geser, serta tingkat turbulensi aliran. Semakin tinggi intensitas turbulensi, semakin besar kemungkinan terbentuknya gelembung berukuran kecil.

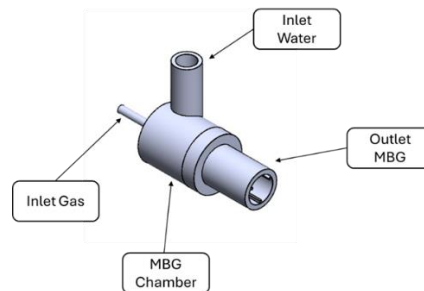
Terdapat beberapa jenis *microbubble generator* yang telah dikembangkan, diantaranya adalah tipe orifice yang memanfaatkan plat berlubang untuk memecah aliran gas akibat penurunan tekanan secara mendadak, serta tipe venturi yang bekerja dengan menyempitkan saluran untuk menciptakan tekanan vakum sehingga mampu mengisap dan memotong gas menjadi gelembung mikro (Chung dkk., 2025). Diantara beberapa jenis tersebut, MBG tipe swirl yang digunakan dalam penelitian ini, tipe swirl bekerja dengan cara memanfaatkan aliran berputar (*vortex*) untuk menciptakan zona bertekanan rendah, yang secara efektif mengisap gas dan memecahnya menjadi gelembung mikro karena adanya gaya sentrifugal dan geser yang intens (Alam dkk., 2018). Keunggulan utama dari MBG tipe swirl adalah kemampuannya untuk menghasilkan gelembung berukuran sangat kecil dan seragam, dimana kinerjanya sangat bergantung pada parameter desain geometris dan kondisi operasionalnya (Batubara dkk., 2022).

Penelitian eksperimental untuk mengamati fenomena tekanan negatif di dalam chamber MBG relatif sulit dilakukan karena keterbatasan akses pengukuran di dalam geometri yang sempit dan kompleks. Oleh karena itu, pendekatan simulasi numerik menggunakan *computational fluid dynamics* (CFD) menjadi alternatif yang efektif untuk menganalisis karakteristik aliran dan distribusi tekanan secara detail (Wu dkk., 2022) dan (Al-Azzawi dkk., 2023). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi tekanan pada MBG tipe swirl menggunakan simulasi CFD serta menentukan kecepatan inlet minimum yang mampu menghasilkan tekanan negatif disekitar ujung nosel gas.

METODE

1. Geometri dan Model Fisis

Model *microbubble generator* yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada desain MBG tipe swirl dengan modifikasi pada konfigurasi inlet fluida cair dan gas. Diameter inlet air sebesar 20 mm, diameter nosel gas sebesar 1,2 mm, serta jarak antara nosel gas dan outlet MBG sebesar 3 mm. Fluida air masuk ke dalam chamber secara tangensial sehingga membentuk aliran *swirl* di dalam ruang pembangkitan gelembung. Gambar 1. menunjukkan detail sketsa dari *microbubble generator* tipe swirl inlet dengan arah tangensial.



Gambar 1. Sketsa *microbubble generator* tipe swirl

2. Permodelan Aliran Dua Fasa

Simulasi dilakukan menggunakan pendekatan Eulerian untuk memodelkan aliran dua fasa air dan udara. Aliran dianggap incompressible, isothermal, dan steady state. Persamaan dasar yang digunakan meliputi persamaan kontinuitas dan momentum untuk masing-masing fasa dinyatakan sebagai berikut:

Persamaan kontinuitas:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \vec{v}_q) = 0 \quad (1)$$

Persamaan momentum:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = & -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot [\tau_q] + \\ & \alpha_q \rho_q \vec{g} + \alpha_q \rho_q (+\vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,g}) + \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) \end{aligned} \quad (2)$$

Phase stress-strain tensor:

$$[\tau_q] = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^{-T}) + \alpha_q (\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_g) \nabla \cdot \vec{v}_q [I] \quad (3)$$

Reynolds stress tensor:

$$\tau'_q = -\frac{2}{3} (\rho_q k_q + \rho_q \mu_{t,q} \nabla \cdot \vec{v}_q [I]) + \rho_q \mu_{t,q} (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^{-T}) \quad (4)$$

Di mana $\vec{g}$ adalah percepatan gravitasi dan α_q adalah fraksi volume fase ke-q. K_{pq} adalah koefisien istilah pertukaran momentum untuk aliran turbulen. λ_q dan μ_q adalah viskositas bulk dan viskositas geser. $\vec{F}_{lift,q}$, $\vec{F}_{vm,g}$, $\vec{F}_q$ masing-masing adalah gaya angkat, gaya eksternal tubuh, dan gaya virtual.

3. Model Turbulensi

Model turbulensi yang digunakan adalah model standar k- ϵ karena kestabilannya dan penggunaannya yang luas pada simulasi aliran turbulen internal. Persamaan energi kinetik turbulen (k) dan laju disipasi turbulen (ϵ) dinyatakan sebagai berikut:

Turbulent viscosity:

$$\mu_{t,q} = \rho_q C_\mu \frac{k_q^2}{\epsilon_q} \quad (5)$$

Turbulent kinetic energy k_q :

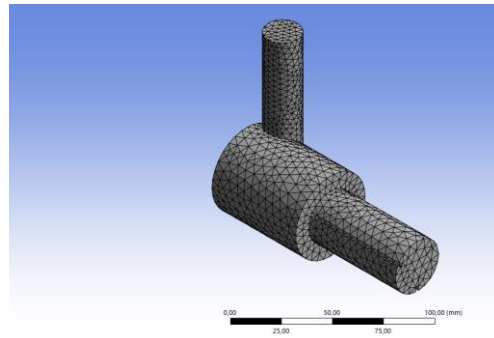
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q k_q) = \nabla \cdot \left(\alpha_q \frac{\mu_{t,q}}{\sigma_k} \nabla k_q \right) + \\ (\alpha_q G_{k,q} - \alpha_q \rho_q \epsilon_q) + \sum_{l=1}^N K_{lq} (C_{lq} k_l - C_{ql} k_q) - \\ \sum_{l=1}^N K_{lq} (\vec{v}_l - \vec{v}_q) \frac{\mu_{t,l}}{\alpha_l \sigma_l} \nabla \alpha_l + \sum_{l=1}^N K_{lq} (\vec{v}_l - \vec{v}_q) \frac{\mu_{t,q}}{\alpha_q \sigma_q} \nabla \alpha_q \end{aligned} \quad (6)$$

Turbulent dissipation ratio ϵ_q :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \epsilon_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \epsilon_q) = \nabla \cdot \left(\alpha_q \frac{\mu_{t,q}}{\sigma_k} \nabla \epsilon_q \right) + \\ \frac{\epsilon_q}{k_q} [C_{1\epsilon} \alpha_q G_{kq} - C_{2\epsilon} \alpha_q \rho_q \epsilon_q + C_{3\epsilon} (\sum_{l=1}^N K_{lq} (C_{lq} k_l - \\ C_{ql} k_q) - \sum_{l=1}^N K_{lq} (\vec{v}_l - \vec{v}_q) \frac{\mu_{t,l}}{\alpha_l \sigma_l} \nabla \alpha_l + \sum_{l=1}^N K_{lq} (\vec{v}_l - \\ \vec{v}_q) \frac{\mu_{t,q}}{\alpha_q \sigma_q} \nabla \alpha_q)] \end{aligned} \quad (7)$$

4. Lapis Batas dan Mesh

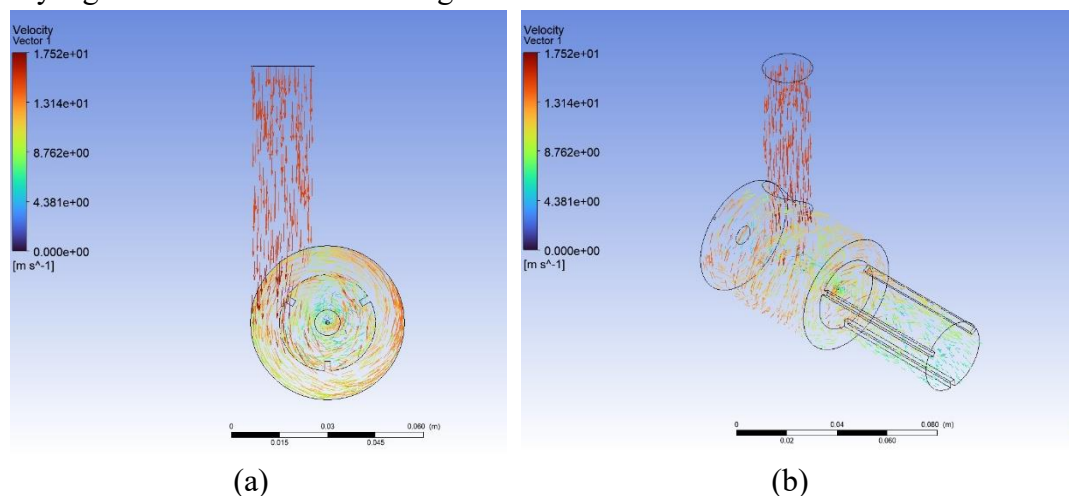
Kecepatan inlet air divariasikan dari 11 hingga 15 m/s dengan interval 1 m/s. Tekanan inlet udara ditetapkan sebesar 1 atm untuk merepresentasikan kondisi *self-suction*. Outlet ditetapkan sebagai *pressure outlet*. Domain fluida didiskretisasi menggunakan elemen tetrahedral dengan jumlah elemen sebanyak 171.873 dan node sebanyak 34.826 ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 2. Domain Fluida Mesh Tetrahedral

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa aliran air yang masuk secara tangensial ke dalam chamber menghasilkan pola aliran swirl dengan kecepatan sudut yang tinggi ditunjukkan oleh Gambar 3. Pola aliran ini menyebabkan terjadinya gradien tekanan yang signifikan antara dinding chamber dan pusat aliran. Distribusi vektor kecepatan memperlihatkan adanya inti *vortex* yang terbentuk di sekitar nosel gas.

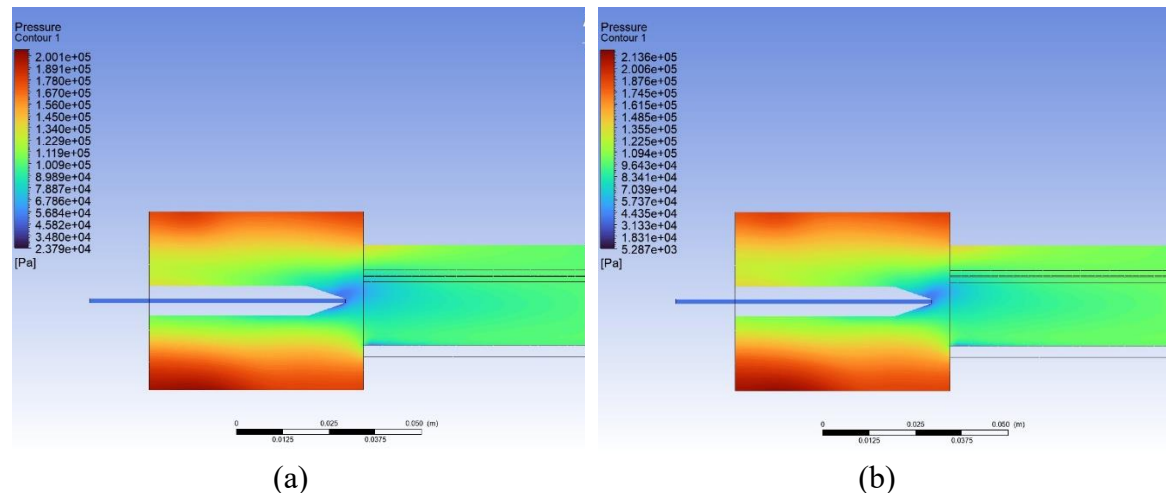


Gambar 3. Vektor Kecepatan Aliran Air pada MBG Hasil Simulasi (a) Tampak Samping, dan (b) Tampak Isometrik

Pada variasi kecepatan inlet air sebesar 11 m/s dan 12 m/s ditunjukkan oleh Gambar 4, tekanan minimum yang terjadi di ujung nosel gas masing-masing sebesar 24 kPa dan 5,3 kPa. Nilai tekanan tersebut masih berada di atas tekanan atmosfer sehingga belum mampu menghasilkan mekanisme *self-suction* udara. Hal ini menunjukkan bahwa intensitas aliran *swirl* pada kecepatan tersebut masih belum cukup untuk menurunkan tekanan hingga di bawah tekanan atmosfer.

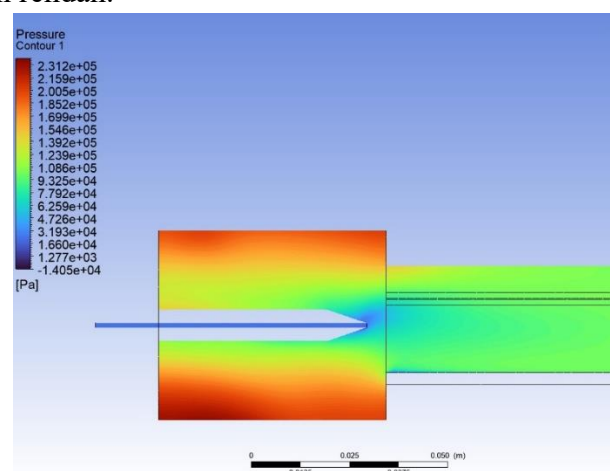
Tekanan negatif mulai terbentuk pada kecepatan inlet air sebesar 13 m/s dengan nilai tekanan minimum sebesar -14,05 kPa ditunjukkan oleh Gambar 5. Peningkatan kecepatan

inlet menjadi 14 m/s dan 15 m/s menyebabkan tekanan minimum semakin menurun hingga mencapai $-31,7$ kPa dan $-50,9$ kPa ditunjukkan oleh Gambar 6 dan Gambar 7. Penurunan tekanan ini berkaitan erat dengan peningkatan kecepatan tangensial dan intensitas turbulensi di dalam *chamber* MBG.

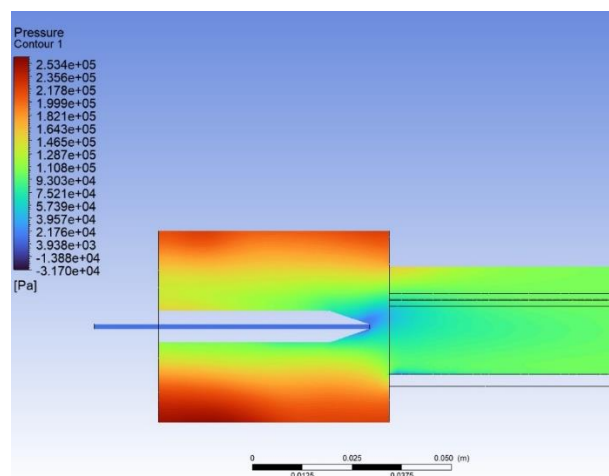


Gambar 4. (a) Kontur tekanan pada kecepatan 11 m/s, dan (b) Kontur tekanan kecepatan 12 m/s

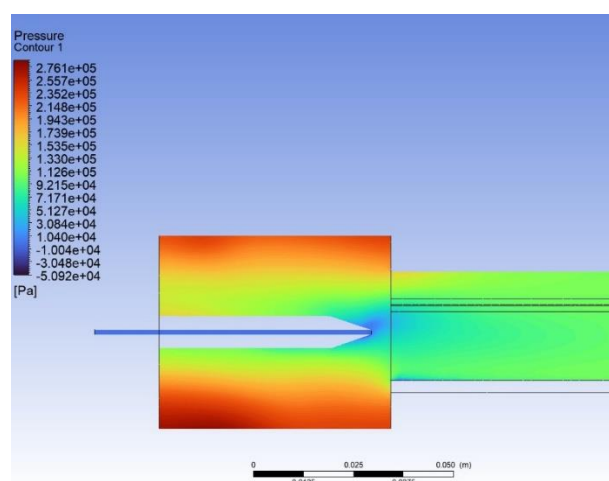
Secara fisis, peningkatan kecepatan aliran *swirl* meningkatkan gaya sentrifugal yang mendorong fluida ke arah dinding *chamber*. Kondisi ini menyebabkan penurunan tekanan statis di pusat aliran sesuai dengan prinsip keseimbangan gaya pada aliran berputar. Semakin besar kecepatan aliran, semakin besar perbedaan tekanan yang dihasilkan, sehingga kemampuan MBG untuk menghisap udara secara otomatis juga meningkat. Dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh Alam dkk., 2018 yang melakukan simulasi CFD pada *microbubble generator* tipe *swirl*. Ditemukan bahwa geometri yang digunakan dalam penelitian ini lebih baik dalam menghasilkan tekanan negatif karena kecepatan air di inlet yang dibutuhkan lebih rendah.



Gambar 5. Kontur tekanan pada kecepatan 13 m/s



Gambar 6. Kontur tekanan pada kecepatan 14 m/s



Gambar 7. Kontur tekanan pada kecepatan 15 m/s

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi CFD pada *microbubble generator* tipe aliran *swirl*, dapat disimpulkan bahwa tekanan negatif di sekitar ujung nosel gas mulai terbentuk pada kecepatan inlet air sebesar 13 m/s. Peningkatan kecepatan inlet air menyebabkan penurunan tekanan yang semakin signifikan hingga mencapai $-50,9$ kPa pada kecepatan 15 m/s. Hasil ini menunjukkan bahwa kecepatan aliran *swirl* memiliki pengaruh langsung terhadap kemampuan MBG dalam menghasilkan mekanisme *self-suction* udara. Temuan penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar dalam perancangan *microbubble generator* serta pemilihan pompa yang sesuai untuk menghasilkan gelembung mikro secara efisien.

Ucapan Terimakasih

Ucapan Terima kasih Para penulis dengan penuh rasa syukur menyampaikan penghargaan dan mengucapkan terima kasih atas dukungan finansial yang diberikan oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Institut Teknologi Kalimantan.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Azzawi, A., Al-Shimmery, A., Alshara, A., & Mohammed, M. R. 2023. Computational Fluid Dynamics Simulation Assessment of Inlet Configuration Influence on Enhancing Swirl Flow Microbubble Generator Performance. *Journal of Engineering*, 2023, 1–14.
- Batubara, Y., Mawarni, D. I., Indarto, & Deendarlianto. 2022. Karakterisasi Bubble yang Dihasilkan Microbubble Generator Tipe Aliran Swirl dengan Metode Image Processing. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 13(01), 880–888.
- Chung, M., Cho, D.-W., Tuladhar, U., Sohn, H., Kang, T. W., Kim, C. S., & Park, C. 2025. Selective laser melting-assisted venturi-type nozzle in a pressurized dissolution microbubble generator. *Materials & Design*, 258, 114705.
- Fitriadi, R., & Palupi, M. 2024. Application Of Microbubble Technology To Increase Oxygen Content In The Aquaculture Of Tambaqui (*Colossoma Macropomum*). *Journal of Aquaculture and Fish Health*, 13(3), 328–339.
- H.S Alam, 2018. Design and Performance of Swirl Flow Microbubble Generator. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4.40) (2018) 66-69.
- Kizhisseri, M. I., Sakr, M., Maraqa, M., & Mohamed, M. M. 2025. A comparative bench scale study of oxygen transfer dynamics using micro-nano bubbles and conventional aeration in water treatment systems. *Heliyon*, 11(4), e41687.
- Mahendra, I. I. B., Luthfi, A., Jati, A. C., Kurniawan, A., & Chadirin, Y. 2025. Pengaruh Durasi Penggunaan Micro Bubble Terhadap Kualitas Air Limpasan Green Roof Ekstensif Berdasarkan Variasi Vegetasi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(3), 830–844.
- Mawarni, D. I., Ristiyanto, H. G., Deendarlianto, D., Budhijanto, W., Salem, M., Niyas, H., & Indarto, I. 2023. Review on swirl-type microbubble generator: Concept, technology, and applications. *Mechanical Engineering for Society and Industry*, 3(3), 191–205.
- Wu, Y., Chen, H., & Song, X. 2022. Experimental and numerical study on the bubble dynamics and flow field of a swirl flow microbubble generator with baffle internals. *Chemical Engineering Science*, 263, 118066.
- Zahra, R., Sidhi, S., Deendarlianto. 2024. Investigation of Bubble Breakup in Venturi-Type Microbubble Generator with Twisted Baffle. *The International Conferences on Engineering Sciences*, 1 (2), 140-153.