# PENGARUH KONFIGURASI 2 SWIRL BAFFLE TERHADAP DISTRIBUSI BUBBLE DAN KINERJA MICROBUBBLE GENERATOR VENTURI

**Luluk Fitri Yani**

*Universitas Jember*
E-mail : lulukfy@unej.ac.id

## ABSTRAK

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh konfigurasi 2 *swirl baffle* pada *inlet microbubble* generator venturi terhadap distribusi ukuran *bubble* dan kinerja hidrolik meliputi pressure drop, hydraulic power, dan efisiensi pembangkitan *bubble*. Distribusi *bubble* diukur menggunakan kamera kecepatan tinggi Phantom Miro M310 pada 3000 fps dengan pengolahan citra MATLAB R2023a, sedangkan kinerja diuji pada variasi debit air QL = 40 dan 50 lpm serta debit udara QG = 0,1–0,7 lpm. Hasil menunjukkan distribusi *bubble* cenderung condong ke kanan dengan diameter minimum 73 µm. peningkatan QL cenderung membuat distribusi lebih seragam, sedangkan peningkatan QG membuat distribusi lebih heterogen. Dibandingkan konfigurasi 3 *baffle*, konfigurasi 2 *baffle* menunjukkan kecenderungan beban hidrolik yang lebih rendah dengan efisiensi yang kompetitif. Temuan ini menunjukkan keunggulan konfigurasi 2 *baffle* dari sisi efisiensi energi.

**Kata Kunci :** *Microbubble Generator, Venturi, Swirl Baffle, Pressure Drop, Efisiensi Pembangkitan Bubble*

## ABSTRACT

This study evaluates the effect of a 2-swirl-baffle configuration at the inlet of a venturi-type microbubble generator (MBG) on bubble size distribution and hydraulic performance, including pressure drop, hydraulic power, and bubble generation efficiency. Bubble distribution was measured using a Phantom Miro M310 high-speed camera at 3000 fps with MATLAB R2023a image processing, while performance was tested across variations of water flow rate Q_L = 40 and 50 lpm and air flow rate Q_G = 0.1–0.7 lpm. Results show that bubble distribution tends to be right-skewed with a minimum diameter of 73 µm. Increasing Q_L tends to produce a more uniform distribution, whereas increasing Q_G leads to a more heterogeneous distribution. Compared to the 3-baffle configuration, the 2-baffle configuration demonstrates a tendency toward lower hydraulic loading with competitive efficiency. These findings indicate the superiority of the 2-baffle configuration in terms of energy efficiency.

**Keywords :** *Microbubble Generator, Venturi, Swirl Baffle, Pressure Drop, Bubble Generation Efficiency*

## PENDAHULUAN

Ketersediaan oksigen terlarut merupakan faktor kunci dalam keberhasilan budidaya ikan karena memengaruhi pertumbuhan, stres fisiologis, dan kelangsungan hidup organisme budidaya. Dalam konteks tersebut, teknologi aerasi microbubble menarik untuk dikaji karena berpotensi meningkatkan transfer oksigen dengan kebutuhan energi yang relative lebih rendah (Fitriadi et al., 2024) (Budhijanto et al., 2017). Oksigen terlarut (*dissolved oxygen*/DO) merupakan parameter kualitas air yang paling kritikal dalam sistem budidaya intensif. Konsentrasi DO yang tidak optimal dapat memicu stres fisiologis, penurunan laju pertumbuhan, hingga kematian massal organisme budidaya (Heriyati et al., 2022) (Patkaew et al., 2024) . Teknologi aerasi *microbubble* telah terbukti secara ilmiah mampu meningkatkan efisiensi transfer oksigen ke dalam air secara signifikan dibandingkan sistem aerasi konvensional, karena karakteristik *microbubble* yang mencakup luas permukaan kontak yang besar, kecepatan naik rendah, dan tekanan internal yang tinggi (Xu et al., 2022) (Patkaew et al., 2024).

Di antara berbagai jenis Microbubble generator, tipe venturi menjadi salah satu yang paling banyak dikembangkan karena mekanismenya yang sederhana, tidak memerlukan kompresor eksternal, dan hemat energi. Microbubble generator tipe venturi dipilih karena konstruksinya sederhana dan mampu memanfaatkan penurunan tekanan pada *throat* untuk menghisap udara secara pasif (Majid et al., 2018). Namun, Microbubble generator venturi konvensional memiliki keterbatasan dalam menghasilkan *bubble* berukuran sangat kecil secara konsisten. Beberapa peneliti telah mengeksplorasi modifikasi desain untuk mengatasi keterbatasan ini, salah satunya dengan mengintroduksi aliran *swirl* (pusaran) pada bagian *inlet* Microbubble generator venturi (Wu et al., 2022) (Xu et al., 2025).

Studi terbaru menunjukkan bahwa swirl baffle, dan modifikasi geometri venturi berpengaruh langsung pada ukuran bubble, distribusi bubble, serta efisiensi transfer massa (Wu et al., 2022) (Xu et al., 2025) (Wang et al., 2020). Wang dkk. (2020) microbubble generator tipe swirl-venturi dan venturi konvensional menunjukkan bahwa konfigurasi swirl menghasilkan *bubble* yang lebih kecil dengan distribusi lebih seragam (Wang et al., 2020). Wu dkk. (2022) mendemonstrasikan bahwa *swirl flow* yang dihasilkan oleh *baffle* berbentuk kipas (*fan-shaped baffle*) pada inlet venturi mampu menghasilkan *micro-nano bubble* dengan diameter rata-rata hingga 1,74 µm, dua orde besaran lebih kecil dari MBG venturi konvensional (Wu et al., 2022). Xu dkk. (2025) melaporkan bahwa konfigurasi *dual-phase* venturi *sparger* dengan analisis distribusi ukuran *bubble* yang canggih dapat mengoptimalkan proses pembangkitan *microbubble* untuk aplikasi skala pilot (Xu et al., 2025). Pei dkk. (2025) menunjukkan bahwa penambahan *twisted fin baffle* pada *inlet* venturi menghasilkan distribusi ukuran *bubble* yang lebih seragam dan koefisien transfer massa oksigen volumetrik (KLa) yang lebih tinggi dibandingkan tanpa *baffle* (Pei et al., 2025). Meskipun demikian, studi yang secara eksplisit membandingkan pengaruh variasi jumlah *baffle* khususnya 2 *baffle* dengan 3 *baffle* terhadap distribusi *bubble* dan kinerja microbubble generator venturi masih sangat terbatas.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini membandingkan konfigurasi 2 *swirl baffle* pada *inlet microbubble* generator venturi terhadap distribusi *bubble* dan parameter kinerja hidrolik, serta membandingkannya secara ringkas dengan hasil konfigurasi 3 *baffle* yang telah dipublikasikan. Studi sebelumnya dari kelompok peneliti yang sama Yani et al., 2023). telah melaporkan karakteristik distribusi *bubble* dan kinerja MBG venturi dengan konfigurasi 3 *swirl baffle*. Penelitian ini merupakan kelanjutan yang bertujuan untuk: (1) mengkarakterisasi distribusi ukuran

*bubble* pada konfigurasi 2 *swirl baffle*, (2) menganalisis kinerja ΔP, Lw, dan η pada konfigurasi 2 *baffle*, serta (3) membandingkan kinerja kedua konfigurasi untuk memberikan rekomendasi desain optimal berdasarkan pertimbangan efisiensi energi.

## METODE

### Desain Microbubble Generator Venturi

Penelitian ini menggunakan MBG venturi tipe *swirl baffle* yang difabrikasi menggunakan teknologi 3D *printing* dengan bahan PLA pada bagian *inlet*, sedangkan pada bagian *outlet* terbuat dari bahan akrilik seperti pada Gambar 1. Konstruksi utama MBG terdiri dari bagian konvergen, *throat* berdiameter 9 mm, dan divergen. Pada bagian *throat* terdapat lubang berdiameter 3 mm sebagai saluran masuk udara pasif dari atmosfer, memanfaatkan fenomena tekanan rendah (vakum parsial) yang terbentuk akibat efek Bernoulli. *Pressure tabs* berukuran 1 mm dipasang pada bagian *inlet* dan *outlet* untuk pengukuran tekanan. *Swirl baffle* dipasang pada sisi *inlet* MBG dengan tebal 2,5 mm, panjang 6 mm, dan sudut 60°. Penelitian ini berfokus pada konfigurasi 2 *swirl baffle*, dengan konfigurasi 3 *baffle* (Yani et al., 2023). digunakan sebagai pembanding. Data yang diperoleh dianalisis untuk menentukan distribusi *bubble*, *pressure drop*, *hydraulic power*, dan efisiensi pembangkitan *bubble* pada konfigurasi 2 *swirl baffle*.

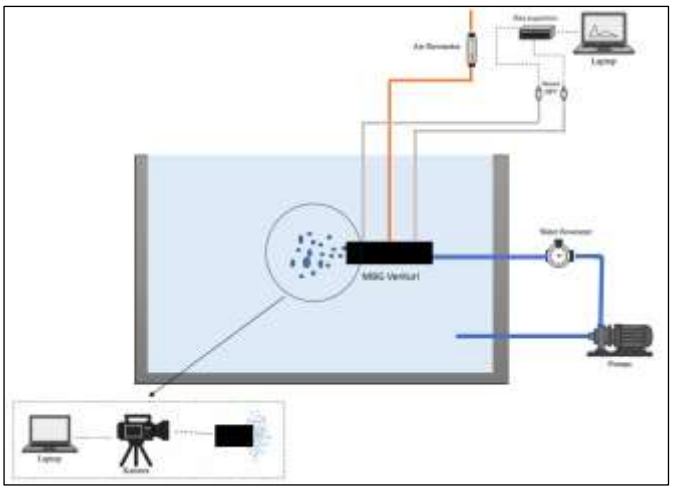


a. b.

**Gambar 1. Konfigurasi *Microbubble* Generator Venturi : (a) *Inlet* Dan *Outlet* Terpisah (b) *Inlet* Dan *Outlet* Terpasang**

### Skema Peralatan dan Variasi Pengujian

Pengujian dilakukan di Laboratorium Mekanika Fluida, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada. Seksi uji berupa kolam akuarium kaca berukuran 280 cm × 60 cm × 60 cm yang diisi air hingga ketinggian 40 cm. MBG dipasang pada kedalaman 20 cm dari dasar kolam seperti pada Gambar 2. Air bersih disirkulasikan secara tertutup menggunakan pompa 1 fasa; debit air diatur dengan *valve* dan diukur menggunakan *water flowmeter*. Debit udara diatur menggunakan *air flowmeter*. Variasi yang digunakan yaitu: debit air QL = 40 dan 50 lpm; debit udara QG = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; dan 0,7 lpm.



**Gambar 2. Skema Peralatan Pengujian**

**Pengukuran Distribusi Bubble**

Distribusi diameter *bubble* diamati menggunakan kamera kecepatan tinggi Phantom Miro M310 pada kecepatan perekaman 3000 fps (resolusi 768 × 768 piksel). Kamera difokuskan pada *outlet* MBG yang berjarak 2-3 cm dari dinding kolam. Lampu LED dan kertas putih diletakkan di belakang akuarium untuk keseragaman pencahayaan. Data rekaman diolah menggunakan metode *image processing* pada MATLAB R2023a, mencakup *background subtraction*, konversi ke citra biner, dan pendeteksian diameter *bubble* dalam mikrometer (µm). Pendekatan *image processing* serupa untuk karakterisasi bubble pada MBG tipe swirl juga telah digunakan dalam studi sebelumnya (Batubara et al., 2022).

**Pengukuran Kinerja MBG**

Kinerja MBG dievaluasi berdasarkan tiga parameter: *pressure drop* (ΔP), *hydraulic power* (Lw), dan efisiensi pembangkitan *bubble* (η). Pengukuran tekanan menggunakan sensor *Difference Pressure Transducer* (DPT) yang terpasang pada *pressure tabs inlet* dan *outlet*. Persamaan yang digunakan:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (1)$$

$$Lw = \Delta P \times (QL+QG) \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\rho_L g H Q_G}{L_w} \quad (3)$$

di mana $P_1$ dan $P_2$ adalah tekanan *inlet* dan *outlet* MBG (Pa), QL debit air (lpm), $\rho_L$ massa jenis air (kg/m$^3$), H kedalaman microbubble generator (m), dan QG debit udara (lpm).

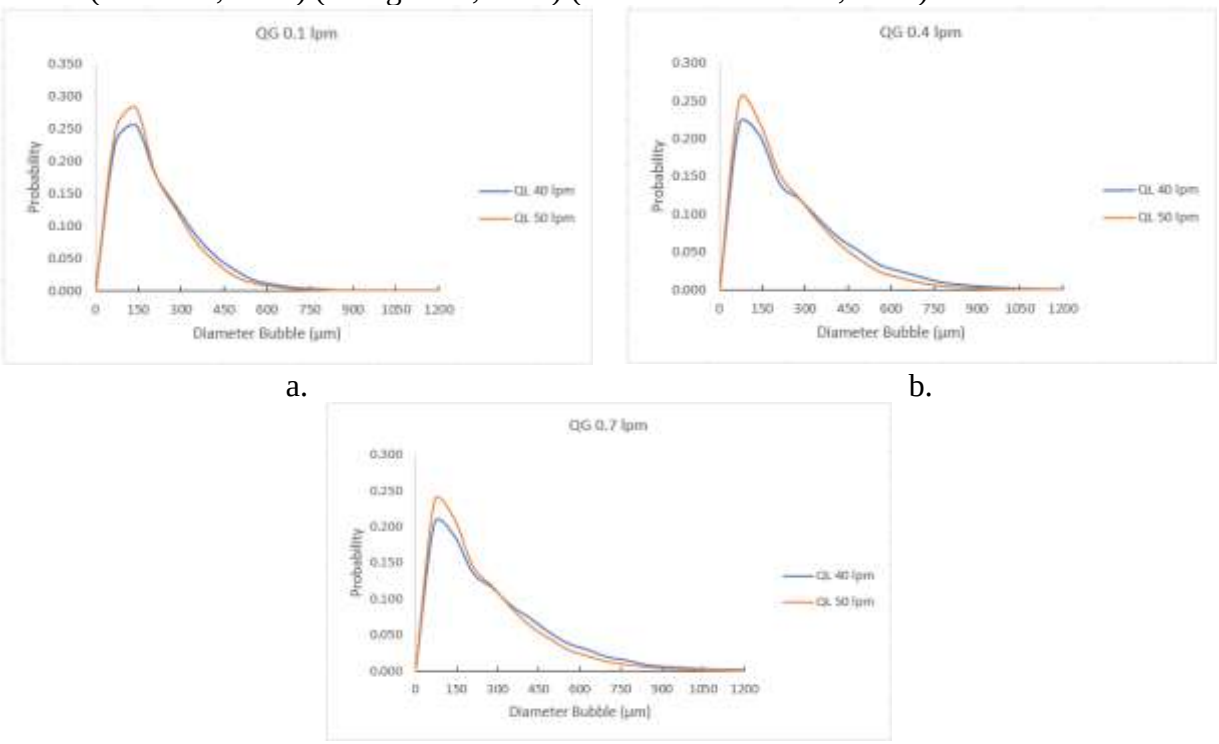
## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### Distribusi Diameter Bubble pada Konfigurasi 2 Baffle

Gambar 3 menampilkan grafik *Probability Density Function* (PDF) distribusi diameter *bubble* konfigurasi 2 *baffle* pada tiga kondisi debit udara representatif (QG = 0,1; 0,4; dan 0,7 lpm) dengan variasi QL = 40 dan 50 lpm. Pemilihan tiga kondisi QG ini merepresentasikan karakteristik distribusi pada debit udara rendah, sedang, dan tinggi, sehingga tren yang dihasilkan dapat mewakili keseluruhan rentang pengujian.

Distribusi *bubble* pada konfigurasi 2 *baffle* menunjukkan pola *skewed right* (condong kanan), mengindikasikan dominasi *bubble* berukuran kecil dengan ekor distribusi yang memanjang ke arah diameter lebih besar. Pola distribusi ini konsisten dengan hasil yang dilaporkan pada MBG venturi *swirl* oleh (Wu et.al 2022) (Pei et al., 2025). Puncak probabilitas berada pada rentang diameter 100–150 µm, dengan diameter *bubble* terkecil yang terdeteksi 73 µm.

Pengaruh debit air sangat signifikan terhadap bentuk kurva distribusi. Peningkatan QL cenderung menggeser distribusi ke diameter yang lebih kecil. Pada QG = 0,1 lpm, probabilitas puncak meningkat dari QL = 40 lpm ke QL = 50 lpm. Fenomena ini disebabkan oleh peningkatan kecepatan aliran di *throat* venturi seiring naiknya QL, yang memperbesar gaya geser (*shear force*) dan intensitas turbulensi, sehingga proses pemecahan *bubble* (*bubble breakup*) berlangsung lebih intensif (Wu et al., 2022) (Wang et al., 2021) (Catrawedarma et al., 2021).

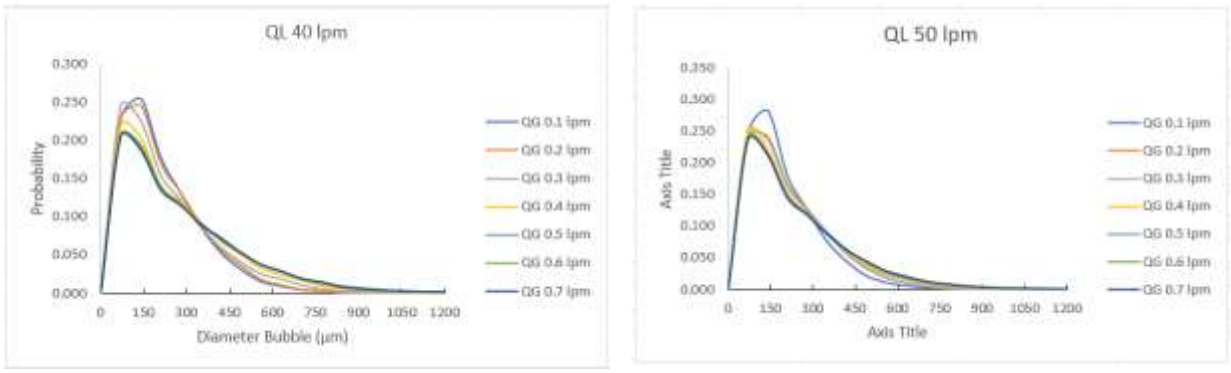



a. b.

c.

**Gambar 3. PDF distribusi diameter bubble konfigurasi 2 baffle: (a) QG=0,1 lpm, (b) QG=0,4 lpm, (c) QG=0,7 lpm**

Gambar 4 menunjukkan distribusi *bubble* pada QL konstan dengan variasi seluruh QG. Peningkatan debit udara menyebabkan penurunan nilai probabilitas puncak dan pelebaran kurva distribusi. Pada QL = 40 lpm, probabilitas puncak menurun dari ~0,253 (QG = 0,1 lpm) menjadi ~0,201 (QG = 0,7 lpm). Hal ini terjadi karena pada QG tinggi, laju masukan udara melebihi kapasitas pemecahan *bubble* oleh gaya turbulensi, sehingga lebih banyak *bubble* berukuran lebih besar yang lolos tanpa terpecah, menghasilkan distribusi yang lebih heterogen. Tren serupa dilaporkan oleh Catrawedarma dkk. (2021) pada sistem *airlift pump–bubble* generator, di mana laju gas yang lebih tinggi cenderung menghasilkan pola aliran yang lebih tidak teratur (Catrawedarma et al., 2021).




a. b.

**Gambar 4. PDF distribusi diameter bubble konfigurasi 2 baffle pada QL konstan: (a) QL=40 lpm, (b) QL=50 lpm**

**Perbandingan Distribusi Bubble: 2 Baffle dengan 3 Baffle**

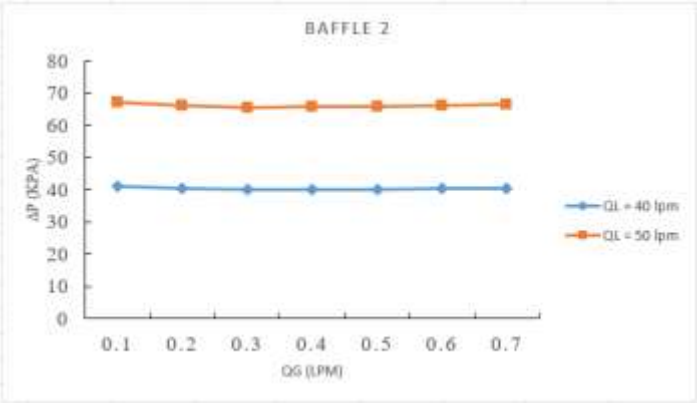
Perbandingan distribusi bubble antara konfigurasi 2 *baffle* (penelitian ini) dan 3 *baffle* [4] menunjukkan kesamaan mendasar berupa pola *skewed right* dan diameter *bubble* terkecil 73 µm pada kedua konfigurasi. Dibandingkan 3 *baffle*, konfigurasi 2 *baffle* menunjukkan kecenderungan distribusi *bubble* yang sedikit lebih lebar dan beban hidrolik yang lebih rendah. Perbedaan ini menunjukkan bahwa jumlah *baffle* memengaruhi intensitas *swirl* di *inlet*, sehingga berpengaruh pada pemecahan *bubble* dan kebutuhan energi sistem.

Perbedaan ini dapat dijelaskan melalui mekanisme pembentukan *swirl*. Konfigurasi 3 *baffle* membagi luas penampang *inlet* menjadi tiga segmen saluran yang lebih sempit, menghasilkan kecepatan masuk fluida yang lebih tinggi dan intensitas efek pusaran yang lebih kuat. Intensitas *swirl* yang lebih tinggi meningkatkan turbulensi di *throat* dan gaya sentrifugal yang bekerja pada *bubble*, sehingga proses atomisasi berlangsung lebih efektif [8,12]. Pei dkk. (2025) melaporkan bahwa penambahan jumlah *baffle* pada *inlet* MBG venturi secara proporsional meningkatkan intensitas *swirl* dan koefisien transfer massa, meskipun juga disertai peningkatan *pressure drop* [12].

**Pressure Drop (ΔP) Konfigurasi 2 Baffle**

Gambar 5 menampilkan grafik rata-rata ΔP konfigurasi 2 *baffle* terhadap variasi QG. Pada QL = 40 lpm, nilai ΔP berkisar ~41 kPa; pada QL = 50 lpm mencapai ~67 kPa. Pada kondisi QL konstan, variasi QG tidak menyebabkan perubahan ΔP yang berarti—grafik cenderung mendatar. Hal ini disebabkan oleh debit udara yang jauh lebih kecil dibandingkan debit air sehingga kontribusinya terhadap total *pressure drop* sangat kecil.

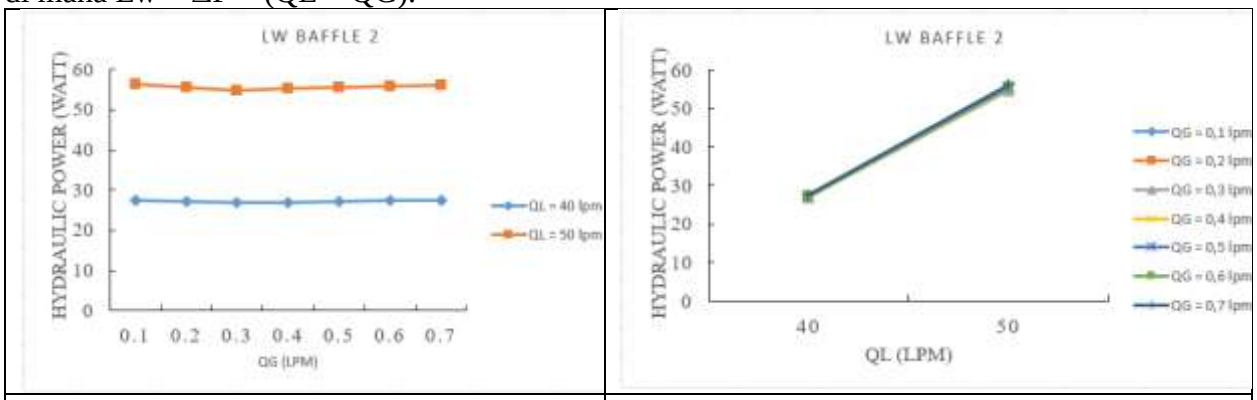
Sebaliknya, peningkatan QL dari 40 menjadi 50 lpm menyebabkan kenaikan ΔP yang signifikan. Fenomena ini terjadi karena QL memiliki lintasan dua kali lebih panjang dari lintasan QG dalam MBG, sehingga peningkatan QL menghasilkan percepatan aliran yang lebih besar akibat perubahan penampang konvergen–divergen [4]. Majid dkk. (2018) melaporkan dominasi serupa dari debit air terhadap *pressure drop* pada MBG venturi-*porous pipe* [7].




**Gambar 5. Rata-Rata ΔP Konfigurasi 2 Baffle Terhadap QG Pada QL Konstan**

**Hydraulic Power (Lw) Konfigurasi 2 Baffle**

Gambar 6(a) menunjukkan Lw pada variasi QG dan QL konstan. Nilai Lw pada QL = 40 lpm berkisar ~27–28 Watt dan meningkat menjadi ~55–57 Watt pada QL = 50 lpm. Variasi QG tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap Lw. Gambar 6(b) menampilkan Lw pada variasi QL, yang menunjukkan peningkatan linear seiring naiknya QL, konsisten dengan persamaan (2) di mana Lw = ΔP × (QL + QG).



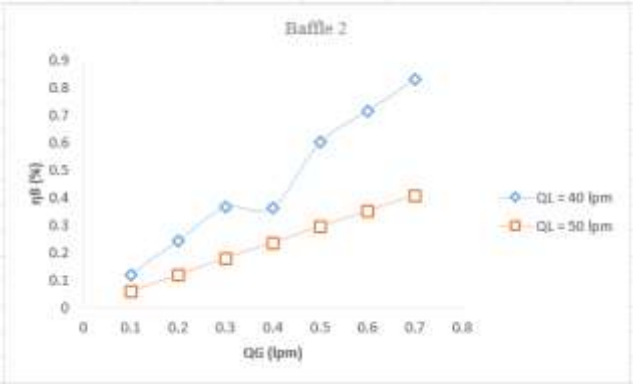

a. b.

**Gambar 6. Hydraulic power (Lw) konfigurasi 2 baffle: (a) variasi QG pada QL konstan, (b) variasi QL pada QG konstan**

**Efisiensi Pembangkitan Bubble (η) Konfigurasi 2 Baffle**

Gambar 7 menampilkan efisiensi pembangkitan bubble (η) konfigurasi 2 *baffle* terhadap variasi QG. Dua tren utama yang teridentifikasi: (1) peningkatan QG menyebabkan η meningkat secara monoton, dan (2) peningkatan QL justru menurunkan η. Nilai η tertinggi dicapai pada QL = 40 lpm, QG = 0,7 lpm, yaitu ~0,83%; nilai terendah pada QL = 50 lpm, QG = 0,1 lpm, yaitu ~0,05%.

Peningkatan η seiring naiknya QG terjadi karena pembentukan bubble meningkat lebih cepat daripada kenaikan Lw. Sebaliknya, kenaikan QL meningkatkan Lw secara lebih dominan sehingga nilai η menurun. Nilai η yang lebih tinggi pada QL lebih rendah menandakan bahwa pada kondisi Lw yang lebih kecil, energi yang digunakan untuk menghisap dan memecah udara menjadi *bubble* relatif lebih efisien [4,12].




**Gambar 7. Efisiensi pembangkitan bubble (η) konfigurasi 2 baffle terhadap QG**

**Perbandingan Kinerja 2 Baffle dengan 3 Baffle**

Tabel 1 merangkum perbandingan kuantitatif kinerja konfigurasi 2 *baffle* (penelitian ini) dan 3 *baffle* [4] berdasarkan seluruh parameter yang dikaji.

**Tabel 1. Perbandingan kinerja konfigurasi 2 baffle dan 3 baffle pada MBG venturi**

| Parameter | 2 Baffle (Penelitian ini) | 3 Baffle [4] | Keterangan |
|---|---|---|---|
| ΔP pada QL=40 lpm (kPa) | ~41 | ~46 | 3 *baffle* lebih tinggi |
| ΔP pada QL=50 lpm (kPa) | ~67 | ~75 | 3 *baffle* lebih tinggi |
| Lw pada QL=40 lpm (Watt) | ~28 | ~31 | 3 *baffle* lebih besar |
| Lw pada QL=50 lpm (Watt) | ~57 | ~62 | 3 *baffle* lebih besar |
| η maks. QL=40 lpm (%) | ~0,83 | ~0,70 | 2 *baffle* lebih efisien |
| η maks. QL=50 lpm (%) | ~0,41 | ~0,28 | 2 *baffle* lebih efisien |
| Diameter bubble terkecil (μm) | 73 | 73 | Sama |
| Probabilitas puncak maks. | ~0,295 | ~0,310 | 3 *baffle* sedikit lebih tinggi |

Dari Tabel 1 terlihat secara konsisten bahwa konfigurasi 3 *baffle* menghasilkan ΔP dan Lw yang lebih tinggi dibandingkan 2 *baffle*. Kondisi ini disebabkan oleh geometri 3 saluran *swirl* yang secara lebih signifikan mempersempit penampang *inlet*, meningkatkan hambatan aliran. Sementara itu, konfigurasi 2 *baffle* menunjukkan keunggulan nyata dari sisi η yang lebih tinggi secara konsisten. Hal ini mengindikasikan bahwa pada konsumsi daya yang lebih rendah,

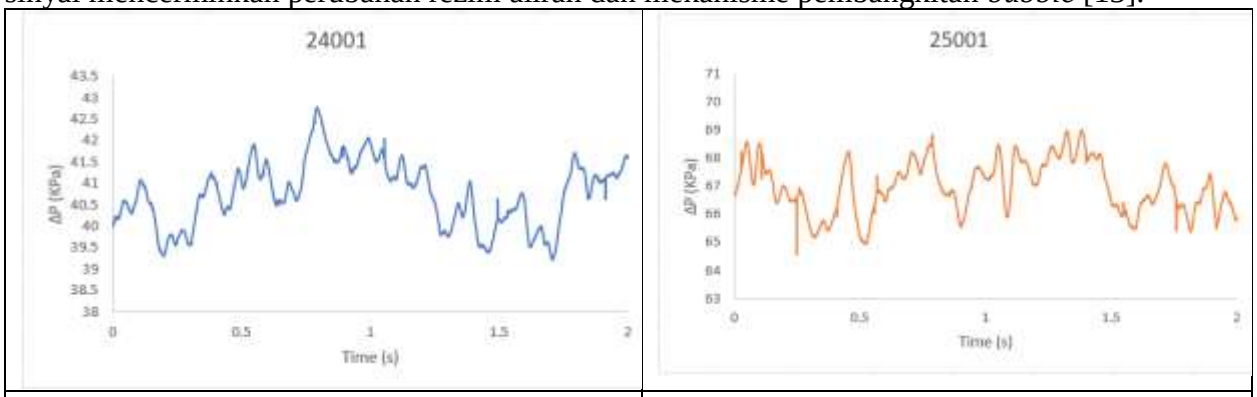
konfigurasi 2 *baffle* mampu memanfaatkan energi udara secara lebih efisien untuk menghasilkan *bubble*.

Dari perspektif aplikasi praktis di sistem budidaya ikan, kedua konfigurasi menawarkan keunggulan yang berbeda. Jika prioritas utama adalah menghasilkan *bubble* yang lebih seragam dan berukuran lebih kecil guna mempercepat peningkatan DO, konfigurasi 3 *baffle* lebih direkomendasikan. Namun, jika efisiensi energi dan biaya operasional menjadi pertimbangan utama yang sering menjadi faktor penentu dalam implementasi skala industri maka konfigurasi 2 *baffle* merupakan pilihan yang lebih optimal. Temuan ini sejalan dengan prinsip desain MBG yang dikemukakan oleh Heriyati dkk. (2022), bahwa teknologi aerasi *microbubble* yang efektif harus mempertimbangkan keseimbangan antara kualitas *bubble* yang dihasilkan dan konsumsi energi sistem [3].

**Analisis Sinyal Pressure Drop (Time-Series)**

Gambar 6 menampilkan sinyal *time-series* ΔP konfigurasi 2 *baffle* pada dua kondisi (kode 24001: QL=40 lpm; kode 25001: QL=50 lpm). Kedua sinyal menunjukkan fluktuasi stokastik yang tidak periodik, mencirikan sifat aliran dua fase gas–cair yang bersifat acak di dalam saluran MBG. Amplitudo fluktuasi pada QL = 40 lpm berada pada rentang 39–43 kPa, sedangkan pada QL = 50 lpm meningkat ke rentang 64–69 kPa.

Fluktuasi sinyal ini merupakan representasi dinamika proses pembentukan, pemecahan, dan koalesensi *bubble* yang berlangsung secara bersamaan di dalam MBG. Intensitas fluktuasi yang lebih besar pada QL = 50 lpm konsisten dengan interaksi *bubble* fluida yang lebih kuat akibat kecepatan aliran yang lebih tinggi. Catrawedarma dkk. (2021) menggunakan analisis statistik serupa pada sinyal *pressure drop* aliran dua fase dan menemukan bahwa karakteristik fluktuasi sinyal mencerminkan perubahan rezim aliran dan mekanisme pembangkitan *bubble* [13].




a. b.

**Gambar 8. Sinyal time-series ΔP konfigurasi 2 baffle: (a) kode 24001 QL=40 lpm, (b) kode 25001 QL=50 lpm**

## KESIMPULAN

Penelitian ini mengkarakterisasi distribusi *bubble* dan kinerja MBG venturi dengan konfigurasi 2 *swirl baffle*, serta membandingkannya dengan konfigurasi 3 *baffle*. Dari penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Distribusi diameter bubble pada konfigurasi 2 *baffle* mengikuti pola *skewed right* dengan diameter terkecil 73 μm. Peningkatan QL menghasilkan kurva probabilitas yang lebih

meruncing ke diameter lebih kecil (distribusi lebih seragam), sedangkan peningkatan QG menyebabkan kurva melebar (distribusi lebih heterogen).

2. Konfigurasi 3 baffle menunjukkan puncak distribusi yang sedikit lebih tinggi, sehingga distribusi bubble cenderung lebih seragam akibat intensitas swirl yang lebih kuat.
3. Variasi QL merupakan faktor dominan yang mempengaruhi ΔP dan Lw pada konfigurasi 2 *baffle*. Nilai ΔP pada 2 *baffle* (~41 kPa pada QL=40 lpm; ~67 kPa pada QL=50 lpm) secara konsisten lebih rendah dibandingkan 3 *baffle*, begitu pula dengan Lw.
4. Konfigurasi 2 baffle menunjukkan efisiensi yang kompetitif pada kondisi pengujian tertentu dan lebih layakdipertimbangkan ketika efisiensi energi menjadi prioritas.

Konfigurasi 2 baffle direkomendasikan untuk aplikasi yang mengutamakan efisiensi energi, sedangkan 3 *baffle* lebih sesuai bila keseragaman distribusi *bubble* menjadi prioritas utama.

## DAFTAR PUSTAKA


R. Fitriadi, M. Palupi, S. R. Sanudra, J. J. Putra, dan M. Azril, "Application of Microbubble Technology to Increase Oxygen Content in The Aquaculture of Tambaqui (Colossoma macropomum)," Journal of Aquaculture and Fish Health, vol. 13, no. 3, pp. 328–339, 2024.

W. Budhijanto, Deendarlianto, D. Darlianto, dan Y. S. Pradana, "Application of micro bubble generator as low cost and high efficient aerator for sustainable fresh water fish farming," AIP Conference Proceedings, vol. 1840, 2017.

E. Heriyati, dkk., "Microbubble aeration in a recirculating aquaculture system (RAS) increased dissolved oxygen, fish culture performance, and stress resistance of red tilapia (Oreochromis sp.)," Trends in Sciences, vol. 19, no. 20, p. 6251, 2022.

L. F. Yani, S. D. Purnomo, Indarto, dan Deendarlianto, "Pengaruh Jumlah Baffle Terhadap Kinerja Microbubble Generator Venturi," dalam Prosiding Seminar Nasional TREnD, FTI Universitas Jayabaya, Juni 2023.

K. Xu, X. Mo, X. Xu, dan H. Wu, "Improving Productivity and Sustainability of Aquaculture and Hydroponic Systems Using Oxygen and Ozone Fine Bubble Technologies," Innovations in Applied Engineering and Technology, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, 2022.

S. Patkaew, dkk., "Effect of supersaturated dissolved oxygen on growth, survival, and immune-related gene expression of Pacific white shrimp (Litopenaeus vannamei)," Frontiers in Marine Science, vol. 11, 2024.

A. I. Majid, F. M. Nugroho, W. E. Juwana, W. Budhijanto, Deendarlianto, dan Indarto, "On the performance of venturi-porous pipe microbubble generator with inlet angle of 20° and outlet angle of 12°," AIP Conference Proceedings, vol. 2001, 050009, 2018.

Y. Wu, H. Chen, dan X. Song, "Micro-nano bubbles production using a swirling-type venturi bubble generator," Chemical Engineering and Processing–Process Intensification, vol. 170, p. 108698, 2022.

Q. Xu, P. Zhang, Y. Yang, Z. Huang, J. Wang, H. Zhang, J. Sun, dan Y. Yang, "Tunable microbubble generation via adjustable dual-phase venturi sparger: A pilot-scale study with advanced BSD analysis," Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 64, no. 28, pp. 14222–14240, 2025.

X. Wang, Y. Shuai, X. Zhou, Z. Huang, Y. Yang, J. Sun, H. Zhang, J. Wang, dan Y. Yang, "Performance comparison of swirl-venturi bubble generator and conventional venturi

bubble generator," Chemical Engineering and Processing–Process Intensification, vol. 154, p. 108022, 2020.

Wang, X., Shuai, Y., Zhang, H., Sun, J., Yang, Y., Huang, Z., Jiang, B., Liao, Z., Wang, J., Yang, Y. (2021). *Bubble breakup in a swirl-venturi microbubble generator.*

Y. Pei, dkk., "The effects of twisted fin baffles on the microbubble formation from a venturi-type microbubble generator," Experimental Thermal and Fluid Science, 2025. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2025.111578.

I. Catrawedarma, Deendarlianto, dan Indarto, "Statistical characterization of flow structure of air–water two-phase flow in airlift pump–bubble generator system," International Journal of Multiphase Flow, vol. 138, p. 103596, 2021.

Y. Batubara, D. I. Mawarni, Indarto, dan Deendarlianto, "Karakterisasi bubble yang dihasilkan microbubble generator tipe aliran swirl dengan metode image processing," dalam Prosiding The 13th Industrial Research Workshop and National Seminar, pp. 880–888, 2022.