

# Karakterisasi *Bubble* yang Dihasilkan *Microbubble Generator* Tipe Aliran *Swirl* dengan Metode *Image Processing*

Yongki Batubara<sup>1</sup>, Drajat Indah Mawarni<sup>1,3</sup>, Indarto<sup>1,2</sup>, Deendarlianto<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika 2, Yogyakarta 55281

<sup>2</sup>Pusat Studi Energi, Universitas Gadjah Mada, Sekip – K1A Kampus UGM, Yogyakarta 55281

<sup>3</sup>Departemen Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Ronggolawe Cepu, Jl. Kampus Ronggolawe Blok B, No.1 Mentul, Cepu 58315

E-mail: yongkiatubara@mail.ugm.ac.id

## ABSTRAK

*Microbubble Generator* (MBG) merupakan sebuah alat yang mampu menghasilkan gelembung-gelembung berukuran mikro telah menjadi terobosan terkini dalam bidang aerasi karena memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan alat aerasi konvensional. Pada penelitian ini dikembangkan *microbubble generator* tipe aliran *swirl* dengan diameter *outlet* 30 mm, diameter *nozzle* gas 1,2 mm, dan jarak *nozzle* gas ke *outlet* sebesar 5 mm. Penelitian dilakukan untuk mengetahui karakteristik distribusi *bubble* dan performa *microbubble generator* dengan memvariasikan debit udara ( $Q_G$ ) dan debit air ( $Q_L$ ). Untuk mengetahui distribusi *bubble* digunakan *high-speed camera* melalui pengambilan gambar *bubble* yang diolah menggunakan teknik *image processing*. Digunakan *pressure transducer* untuk merekam tekanan yang terjadi pada *inlet* dan *outlet* MBG untuk mengetahui performa MBG melalui parameter *hydraulic power* ( $L_w$ ) dan efisiensi hidrolis ( $\eta_h$ ). Hasil penelitian menunjukkan dari analisis *probability density function* (PDF), ukuran *bubble* yang diperoleh berada pada rentang 100-200  $\mu\text{m}$ . Nilai *hydraulic power* dan efisiensi hidrolis secara signifikan dipengaruhi oleh variasi debit air ( $Q_L$ ) dibandingkan dengan variasi debit udara ( $Q_G$ ). Dari hasil analisis *wavelet* teridentifikasi bahwa terjadi *breakup* dan *coalescence bubble* di setiap aliran air dan udara. Hasil dari penelitian diharapkan menjadi bahan pertimbangan dalam memilih dan merancang *microbubble generator* tipe aliran *swirl*.

## Kata Kunci

*Microbubble, Swirl Flow, Hydraulic Power, Efisiensi Hidrolis, Wavelet*

## 1. PENDAHULUAN

*Microbubble generator* memiliki banyak manfaat yang dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang seperti pada sektor pengolahan air limbah, budidaya perairan, dan industri pemurnian air [1]. Menurut Parmar [2] *microbubble* memiliki sifat fisik yang unik seperti kecepatan naik gelembung yang lambat, tekanan internal gelembung yang besar, gaya hambat gesek yang rendah, dan laju perpindahan massa yang tinggi bila dibandingkan dengan gelembung biasa. *Microbubble* didefinisikan sebagai gelembung yang memiliki diameter berukuran mikro dengan diameter 0-200  $\mu\text{m}$  [3].

Banyak peneliti yang telah berupaya dalam meningkatkan performa *microbubble*

*generator* dengan berbagai jenis rancangan seperti Juwana [4] menggunakan MBG tipe *orifice* dimana tekanan vakum dihasilkan dari sebuah *orifice* dan pipa berpori yang diletakkan diantara saluran masuk dan keluar. Sakamatapan [5] menggunakan MBG tipe venturi dimana aliran air melewati sebuah penampang venturi dengan sudut masuk dan keluar sebesar 30° untuk menghasilkan tekanan vakum di dalam *chamber*. Sadatomi [6] menggunakan tipe *spherical body* di dalam sebuah tabung pipa yang menghasilkan aliran air turbulen masuk ke dalam pipa dan memecah udara yang masuk menjadi gelembung-gelembung berukuran kecil. Sadatomi [7] lebih lanjut melakukan penelitiannya dengan tipe *multi-fluid mixer* dimana *spherical body* dan lubang di dinding

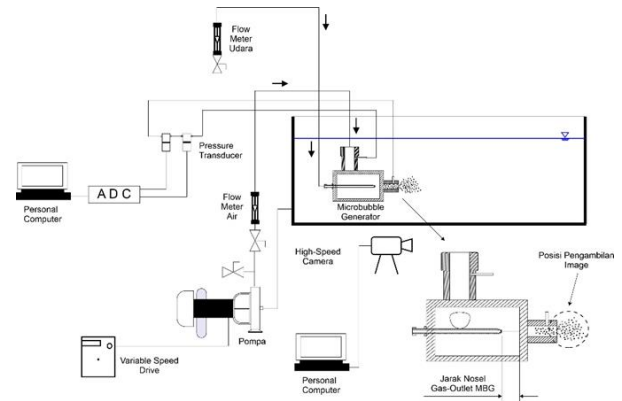
saluran digantikan oleh sebuah pipa berpori dan sebuah *orifice*.

Dari berbagai rancangan tipe *swirl flow* merupakan *microbubble generator* yang efisien dan efektif dalam menghasilkan gelembung berukuran kecil [8] dan berpotensi untuk diaplikasikan dalam skala industri yang besar [9]. Para peneliti sebelumnya telah banyak melakukan penelitian dalam merancang *microbubble generator* tipe aliran *swirl* yang terbaik. Ohnari [10] meneliti ukuran diameter *bubble* menggunakan MBG tipe *swirl* dengan *chamber* berbentuk kerucut. Tabei [8] mengamati karakteristik diameter rata-rata dan distribusi *bubble* pada MBG tipe *swirl* menggunakan *chamber* dan nosel *outlet* berbentuk silinder. Xiao Xu [11] melakukan penelitian dengan berbagai variasi diameter *vortex chamber* dan diameter *outlet gas*.

Dari penelitian sebelumnya masih sedikit informasi yang mempertimbangkan pengaruh jarak *nozzle gas* ke *outlet* MBG. Oleh karena itu, penelitian ini digunakan *microbubble generator* tipe aliran *swirl* dengan *chamber* berbentuk silinder dan jarak *nozzle gas* ke *outlet* MBG sebesar 5 mm. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik distribusi *bubble* dan performa *microbubble generator* tipe aliran *swirl* dengan parameter *hydraulic power* ( $L_w$ ) dan efisiensi hidrolis ( $\eta_h$ ). Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan gelembung yang berukuran kecil dan performa MBG yang lebih baik. Selain itu, fluktuasi sinyal tekanan akan dianalisis dengan *Discrete Wavelet Transform* (DWT) untuk mengidentifikasi *breakup* dan *coalesce bubble* di setiap debit aliran. DWT merupakan teknik dekomposisi untuk mengetahui domain frekuensi dan waktu pada lokasi sinyal tertentu secara bersamaan. Daubechies 4 wavelet digunakan untuk mendekomposisi sinyal menjadi 8 level.

## 2. METODE PENELITIAN

Skema peralatan penelitian untuk menganalisa karakteristik *microbubble generator* dengan gas nosel 1,2 milimeter, diameter *outlet* MBG sebesar 30 mm dan jarak nosel gas ke *outlet* MBG sejauh 5 mm ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Peralatan Penelitian *Microbubble Generator*

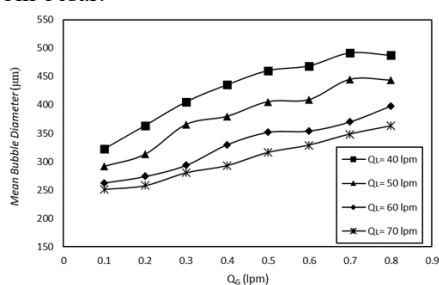
Penelitian dilakukan di Laboratorium Mekanika Fluida, Departemen Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada. *Microbubble generator* terbuat dari bahan *acrylic*. Air bersih digunakan sebagai fluida cair dan udara pada tekanan 1 atm sebagai fluida gas. Seksi uji berada di dalam sebuah kolam air berbahan kaca dengan panjang 280 cm, lebar 60 cm, ketebalan 13 mm dan tinggi 60 cm dan terisi dengan air hingga ketinggian 40 cm. *Microbubble generator* diletakkan pada kedalaman 20 cm diatas permukaan air. Air disirkulasikan tertutup dengan menggunakan pompa. Sirkulasi debit air ditentukan variasi alirannya dengan cara mengatur pompa menggunakan *variable speed drive*. Debit sirkulasi air diatur menggunakan *flowmeter* air berjenis rotameter. Udara mengalir secara alami dari atmosfer masuk ke dalam *microbubble generator* karena tekanan di dalamnya lebih rendah dari tekanan atmosfer. Debit sirkulasi udara diatur dengan sebuah katup dan diukur dengan rotameter. Perbedaan tekanan di *inlet* dan *outlet microbubble generator* diukur dengan *Validyne® pressure transducer* dalam bentuk sinyal tekanan yang terhubung dengan *analog to digital converter* (ADC). Pengukuran data yang telah dikonversi ke data digital dengan ADC kemudian direkam dengan sebuah personal komputer. Gambar 2. menunjukkan detail sketsa dari *microbubble generator* tipe *swirl* dalam penelitian ini.



power ( $L_w$ ) dan efisiensi hidrolis ( $\eta_h$ ) dihitung dari tekanan masuk dan tekanan keluar MBG. Parameter tersebut penting karena kebutuhan energi dalam proses pembentukan *bubble* dipengaruhi oleh tekanan di dalam *microbubble generator*. Selain itu, fluktuasi sinyal tekanan akan dianalisis dengan transformasi wavelet untuk mengidentifikasi *breakup* dan *coalesce bubble* di setiap debit aliran.

### 3.1 Distribusi ukuran *bubble*

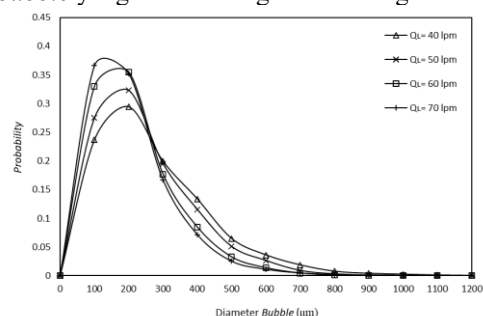
Untuk memperoleh *bubble* berukuran kecil dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya adalah dengan bervariasi debit aliran air dan udara yang tepat ke dalam *microbubble generator*. Variasi debit aliran air dan udara ini dapat mempengaruhi distribusi ukuran *bubble* yang dihasilkan oleh MBG. Oleh karena itu, variasi debit aliran air dan udara menjadi parameter yang penting untuk diteliti. Pengaruh debit aliran air dan udara terhadap diameter rata-rata *bubble* ditunjukkan pada Gambar 4. Dari gambar terlihat bahwa peningkatan debit aliran air menunjukkan penurunan diameter rata-rata *bubble*. Hal ini dikarenakan saat debit air tinggi aliran menjadi lebih turbulen menyebabkan *bubble* mudah terpecah sehingga dihasilkan *bubble* yang berukuran kecil. Sebaliknya, meningkatnya debit aliran udara menghasilkan diameter *bubble* yang lebih besar.



Gambar 4. Pengaruh debit air ( $Q_L$ ) dan debit udara ( $Q_G$ ) terhadap diameter *bubble* rata-rata

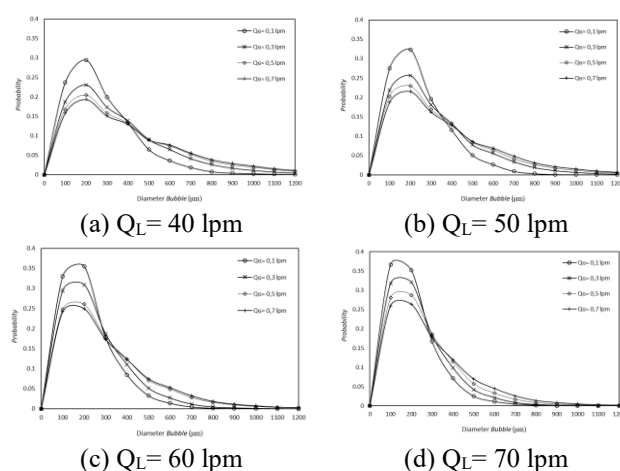
Selanjutnya dilakukan penelitian distribusi ukuran *bubble* ke dalam bentuk *Probability Density Function* (PDF). Pengaruh debit air ( $Q_L$ ) terhadap distribusi diameter *bubble* ditunjukkan pada Gambar 5 dengan debit udara konstan pada 0,1 lpm. Dari gambar terlihat bahwa semakin besar debit air ( $Q_L$ ) maka nilai puncak PDF juga akan meningkat. Nilai puncak PDF terbesar dihasilkan pada debit 70 lpm sebesar 36%

dengan diameter *bubble* sekitar 100-200  $\mu\text{m}$ . Hal ini juga menunjukkan bahwa peningkatan debit air mempengaruhi distribusi ukuran *bubble* yang lebih homogen atau seragam.



Gambar 5. Pengaruh debit aliran air ( $Q_L$ ) terhadap distribusi diameter *bubble*

Selanjutnya dilakukan penelitian distribusi ukuran *bubble* ke dalam bentuk *Probability Density Function* (PDF). Pengaruh debit air ( $Q_L$ ) terhadap distribusi diameter *bubble* ditunjukkan pada Gambar 5 dengan debit udara konstan pada 0,1 lpm. Dari gambar terlihat bahwa semakin besar debit air ( $Q_L$ ) maka nilai puncak PDF juga akan meningkat. Nilai puncak PDF terbesar dihasilkan pada debit 70 lpm sebesar 36% dengan diameter *bubble* sekitar 100-200  $\mu\text{m}$ . Hal ini juga menunjukkan bahwa peningkatan debit air mempengaruhi distribusi ukuran *bubble* yang lebih homogen atau seragam.



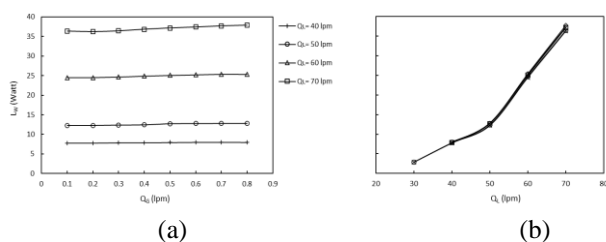
Gambar 6. Pengaruh debit aliran udara ( $Q_G$ ) terhadap distribusi diameter *bubble*

Gambar 6. (a) hingga (d) menunjukkan probabilitas distribusi diameter *bubble* dengan variasi debit udara ( $Q_G$ ) dengan debit air konstan. Dari gambar terlihat bahwa ketiga grafik memiliki *trend* yang serupa yaitu nilai puncak PDF *bubble* semakin menurun seiring meningkatnya debit aliran udara dengan diameter *bubble* dari ketiga grafik berada pada rentang 100-200  $\mu\text{m}$ . Peningkatan debit udara cenderung menghasilkan distribusi ukuran *bubble* yang lebih heterogen atau tidak seragam. Hal ini disebabkan karena semakin besar jumlah udara yang masuk ke dalam MBG menyebabkan kemungkinan terjadinya fenomena *bubble* bergabung (*coalescence*) dan terpecah (*breakup*) terjadi semakin besar menghasilkan *bubble* yang tidak merata.

### 3.2 Hydraulic power ( $L_w$ ) dan efisiensi hidrolis ( $\eta_h$ )

Daya hidrolis dinyatakan sebagai energi yang tersimpan di dalam fluida untuk mengenerasi *bubble*. Semakin kecil *hydraulic power* maka MBG akan semakin baik. Sedangkan, efisiensi merupakan rasio tekanan aliran keluar (*outlet*) terhadap tekanan aliran masuk (*inlet*) yang berkebalikan dengan *hydraulic power* dimana efisiensi yang tinggi menandakan performa MBG yang lebih baik.

Gambar 7 (a) menunjukkan pengaruh  $Q_G$  terhadap daya hidrolis yang dihasilkan *microbubble generator*. Dari gambar terlihat bahwa kenaikan debit udara mempengaruhi peningkatan nilai *hydraulic power* namun tidak signifikan. Kenaikan *hydraulic power* hanya berkisar 1-2 Watt. Sedangkan, pada Gambar 7 (b) menunjukkan bahwa debit aliran air yang besar dapat meningkatkan nilai *hydraulic power* secara signifikan dengan rentang nilai 5-12 Watt. Oleh karena itu, variasi debit aliran air ( $Q_L$ ) merupakan parameter yang lebih berpengaruh terhadap nilai *hydraulic power* dibandingkan dengan variasi debit aliran udara ( $Q_G$ ). Semakin kecil nilai *hydraulic power*, *microbubble* yang dihasilkan oleh MBG juga semakin optimal.

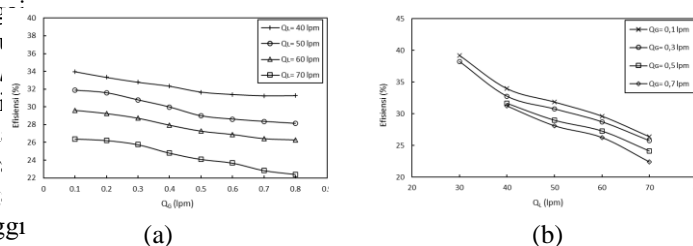


(a)

(b)

Gambar 7. (a) Pengaruh  $Q_G$  terhadap *hydraulic power*, (b) Pengaruh  $Q_L$  terhadap *hydraulic power*

Hubungan antara variasi debit air dan gas terhadap efisiensi ditunjukkan pada Gambar 8 (a) dan (b). Hasil menunjukkan bahwa setiap kenaikan debit udara dapat menurunkan efisiensi hidrolis namun dengan nilai yang tidak terlalu signifikan hanya sebesar 1 %. Sedangkan, pada setiap kenaikan debit air efisiensi mengalami penurunan yang cukup signifikan sebesar 4 - 9 %. Penurunan efisiensi yang besar pada debit air dikarenakan terjadi *pressure drop* disepanjang *tangential inlet*, *swirling chamber* dan *outlet* MBG sementara pengaruh debit udara *pressure drop* hanya pada *outlet* nosel gas dan *outlet* MBG. Dari penelitian ini efisiensi hidrolis maksimum yang dapat dicapai oleh MBG adalah sebesar 40 %.



(a)

(b)

Gambar 8. (a) Pengaruh  $Q_G$  terhadap efisiensi hidrolis, (b) Pengaruh  $Q_L$  terhadap efisiensi hidrolis

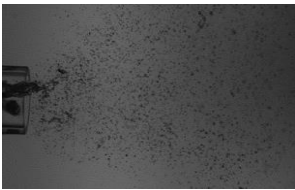
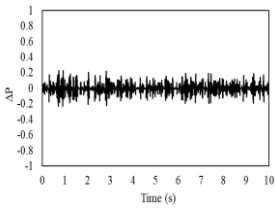
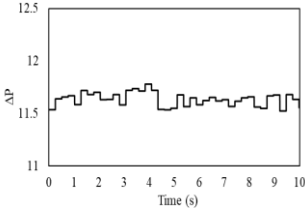
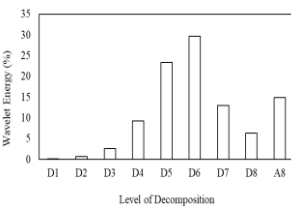
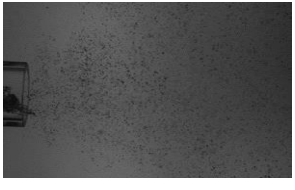
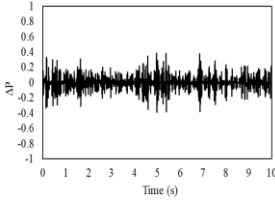
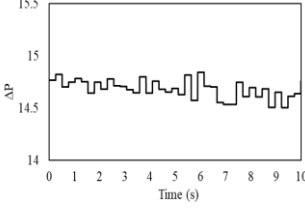
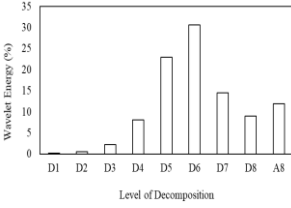

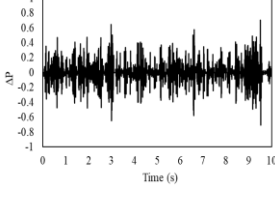
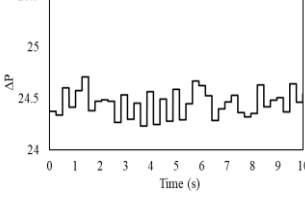
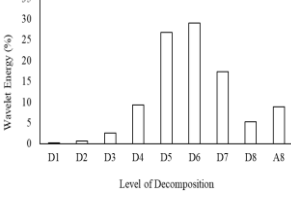
### 3.3 Analisis wavelet

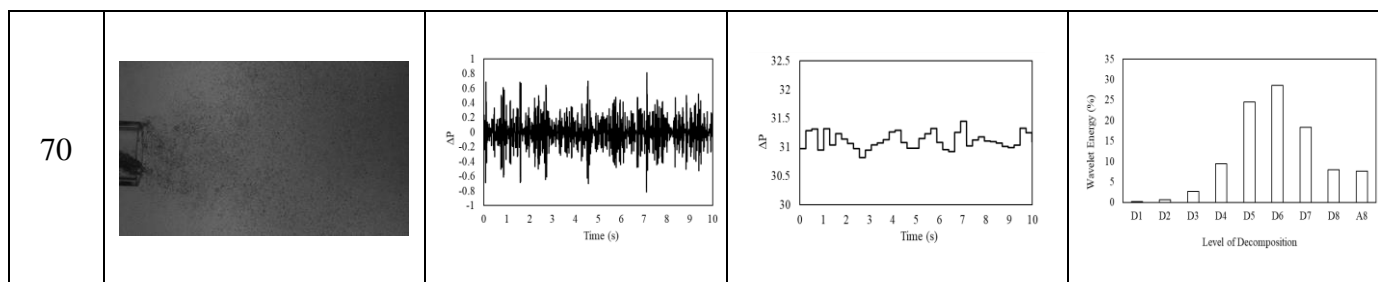
Dalam penelitian ini, analisis *wavelet* atau transformasi *wavelet* digunakan untuk mengidentifikasi fenomena *breakup* (pecahan) dan *coalescence* (penggabungan) yang dihasilkan MBG di setiap variasi debit air dan udara melalui fluktuasi sinyal. Analisis *wavelet* mendekomposisi sinyal asli ke dalam bentuk translasi dan skala. Pada analisis yang terdekomposisi, pita frekuensi berkurang dengan peningkatan skala sinyal. Pada penelitian ini, *discrete wavelet transforms* (DWT) digunakan untuk membagi

sinyal asli menjadi detail, kemudian wavelet Daubechies digunakan untuk menguraikan sinyal menjadi delapan level. D1 menunjukkan detail dari skala terkecil dengan pita frekuensi tinggi, sedangkan D2, D3, dan seterusnya merupakan skala lebih besar dengan frekuensi yang lebih rendah seperti penelitian yang dilakukan oleh Catrawedarma [13]. Jana [14] mengemukakan dalam penelitiannya bahwa fluktuasi frekuensi tinggi terjadi karena besarnya *breakup* dan *coalescence bubble* di dalam aliran sementara frekuensi rendah skala besar menunjukkan aliran yang kontinu. Hasil analisis wavelet di setiap variasi debit air dan udara ditunjukkan pada Gambar 9-10. Terlihat dari kolom (d) pada Gambar 9-10. bahwa energi dominan berada pada D5-A8 sehingga D5 digunakan mewakili frekuensi tinggi skala rendah dan A8 digunakan mewakili frekuensi rendah skala tinggi.

Gambar 9 menunjukkan hasil analisis *wavelet* dari variasi debit air ( $Q_L$ ). Dari gambar terlihat bahwa fluktuasi frekuensi D5 cenderung meningkat seiring peningkatan

debit aliran air. Hal ini menunjukkan *pressure drop* akan semakin meningkat seiring bertambahnya debit aliran air. Nilai A8 juga menunjukkan peningkatan nilai tekanan seiring bertambahnya debit aliran air dengan pola grafik yang semakin fluktuatif. Sementara, pada kolom (d) distribusi energi wavelet dominan variasi  $Q_L$  berada pada D5 dan D6 yang artinya termasuk dalam pita frekuensi tinggi dan skala yang kecil. Hal ini menunjukkan bahwa di setiap variasi debit air ( $Q_L$ ) telah teridentifikasi *breakup* (pemecahan) dan *coalescence* (penggabungan) *bubble* di dalam aliran MBG. Selain itu, hasil analisis *wavelet* variasi  $Q_L$  ini dapat divalidasi melalui citra gambar pada kolom (a).

$Q_L$ (lpm)	Citra Gambar (a)	D5 (b)	A8 (c)	Wavelet Energy (d)
40				
50				
60				

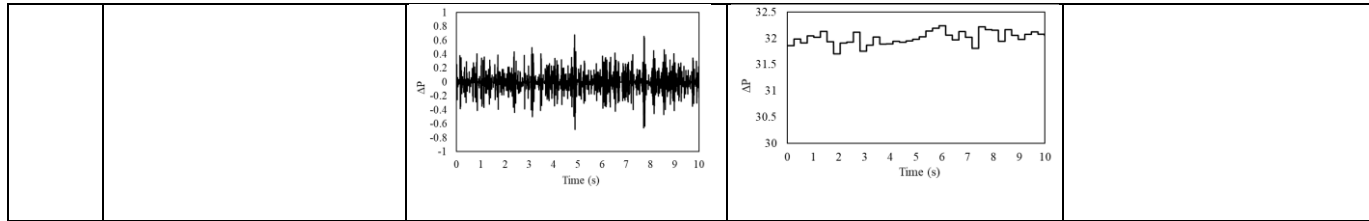


Gambar 9. Analisis *wavelet* pada variasi debit air ( $Q_L$ )

Selanjutnya, dilakukan pengujian analisis *wavelet* pada debit udara ( $Q_G$ ) yang dijaga konstan pada 70 lpm ditunjukkan pada Gambar 10. Dari gambar terlihat bahwa fluktuasi frekuensi D5 kolom (b) pada setiap  $Q_G$  fluktuasi cenderung memiliki pola yang sama. Namun setelah didekomposisi lebih lanjut di kolom (c) A8 mulai terlihat bahwa pada setiap kenaikan  $Q_G$  mengalami sedikit peningkatan. Misalnya, dari  $Q_G=0,1$  lpm dan  $Q_G=0,3$  lpm fluktuasi tekanan cenderung bernilai  $\leq 31,5$  kPa sementara dari  $Q_G=0,5$

lpm dan  $Q_G=0,7$  lpm bernilai  $\geq 31,5$  kPa. Pada kolom (d) distribusi energi *wavelet* dominan variasi  $Q_G$  cenderung sama yaitu berada pada D5 dan D6 yang juga termasuk dalam frekuensi tinggi skala kecil. Hal ini menunjukkan bahwa di setiap variasi debit udara ( $Q_G$ ) telah teridentifikasi *breakup* dan *coalescence bubble* di dalam aliran MBG. Selain itu, hasil analisis *wavelet* variasi  $Q_G$  ini dapat divalidasi melalui citra gambar pada kolom (a).

$Q_G$ (lpm)	Citra Gambar (a)	D5 (b)	A8 (c)	Wavelet Energy (d)
0,1				
0,3				
0,5				
0,7				



Gambar 10. Analisis *wavelet* pada variasi debit udara ( $Q_G$ )

#### 4. KESIMPULAN

Studi eksperimental mengenai karakteristik *microbubble generator* tipe *swirl* dengan diameter gas nosel 1.2 milimeter, diameter nosel *outlet* 30 milimeter, dan jarak nosel gas ke *outlet* MBG sebesar 10 mm telah dilakukan. Hasil dari analisis PDF menunjukkan bahwa *microbubble generator* menghasilkan *bubble* yang berukuran 100 – 200  $\mu\text{m}$  yang mana dapat diklasifikasikan sebagai *bubble* berukuran mikro. Peningkatan debit air menghasilkan ukuran diameter *bubble* yang lebih kecil, secara signifikan mempengaruhi kenaikan nilai *hydraulic power* dan penurunan nilai efisiensi hidrolis. Sedangkan, peningkatan debit udara menghasilkan ukuran diameter *bubble* yang lebih besar, namun tidak signifikan mempengaruhi kenaikan nilai *hydraulic power* dan penurunan nilai efisiensi hidrolis. Hasil analisis *wavelet* menunjukkan di setiap variasi debit air dan udara telah teridentifikasi *breakup* dan *coalescence bubble* di dalam aliran MBG. Hasil dari penelitian dapat berkontribusi menjadi bahan pertimbangan dalam memilih dan merancang *microbubble generator* tipe aliran *swirl* dengan performa yang terbaik.

#### 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada rekan-rekan Tim Riset *Microbubble Generator* Lab. Mekanika Fluida Fakultas Teknik UGM yang telah banyak membantu penulis dalam penelitian dan penyelesaian karya tulis ilmiah ini.

#### 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. I. Majid, F.M. Nugroho, W. E. Juwana, W. Budhijanto, Deendarlianto, & Indarto. (2018). On the performance of venturi-porous pipe microbubble generator with inlet angle of  $20^\circ$  and outlet angle of  $12^\circ$ . *AIP Conference Proceedings*, 2001(August).
- [2] R. Parmar, S. K. Majumder, 2013, Microbubble Generations and Aided Transport Process Intensification-A State-of-the Art Report, *Chemical Engineering and Processing*, 64, 79-97.
- [3] Deendarlianto, Wiratni, A. E Tontowi, Indarto, & A. G. W. Iriawan, (2015). The implementation of a developed microbubble generator on the aerobic wastewater treatment. *International Journal of Technology*, 6(6), 924-930.
- [4] W. E. Juwana, A. Widyatama, O. Dinaryanto, W. Budhijanto, Indarto, & Deendarlianto. (2019). Hydrodynamic characteristics of the microbubble dissolution in liquid using orifice type microbubble generator. *Chemical Engineering Research and Design*, 141, 436-448.
- [5] K. Sakamatapan, M. Mesgarpour, O. Mahian, H. S Ahn, & S. Wongwises, (2021). Experimental investigation of the microbubble generation using a venturi-type bubble generator. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27(April), 101238.
- [6] M. Sadatomi, A. Kawahara, K. Kano, and A. Ohtomo, 2005, Performance of New Micro-Bubble Generator With A Spherical Body in Flowing Water Tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29, 615-623.
- [7] M Sadatomi, A. Kawahara, H. Matsuura, S. Shikatani, 2012, Microbubble Generation Rate and Bubble Dissolution Rate Into Water by A Simple Multi Fluid Mixer With Orifice and Porous Tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 41, 23- 30.
- [8] K Tabei, S. Haruyama, S. Yamaguchi, 2007, Study of Micro Bubble Generation by a Swirl Jet, *Journal of Environment and Engineering*, 2(1), 172 – 182.
- [9] H.S Alam, (2018). Design and Performance of Swirl Flow Microbubble Generator. *International Journal of Engineering & Technology*, 66.
- [10] Ohnari, Fisheries experiments of cultivated shells using microbubbles technique, *Journal of the Heat Transfer Society of Japan* 40 (160) (2001) 2-7 (in Japanese)



- [11] X. Xu, X. Ge, Y. Qian, B. Zhang, H. Wang, Q. Yang, 2018, Effect of Nozzle Diameter on Bubble Generation with Gas Self-Suction through Swirling Flow. *Chemical Engineering Research and Design*, 138, 13-20.
- [12] Y.M.Lau, N.G.Deen, J.A.M.Kuipers., 2013, Development of an image measurement technique for size distribution in dense bubbly flow. *Chemical Engineering Science*, 94, 20-29.
- [13] IGNB. Catrawedarma, Deedarlianto, Indarto., 2021, Statistical Characterization of Flow Structure of Air-water Two-phase Flow in Airlift Pump-Bubble Generator System. *International Journal of Multiphase Flow*, 138, 103596.
- [14] A. K. Jana, G. Das, P. K. Das, 2006, Flow regime identification of two-phase liquid-liquid upflow through vertical pipe. *Chemical Engineering Science*, 61, 1500-1515.