

Karakterisasi *Microbubble* pada *Plasma Activated Water* melalui Metode Segmentasi Citra Berbasis Matlab

Mei Wulandari^{1*}, Sri Wahyu Suciwati², Ahmad Faruq Abdurrahman³, dan Humairoh Ratu Ayu⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung
Email Corresponding Author: meywulandari1005@gmail.com

ABSTRAK

Microbubble merupakan gelembung gas berukuran mikrometer yang memiliki luas permukaan spesifik tinggi dan berperan penting dalam meningkatkan efisiensi transfer massa gas ke dalam cairan. Karakterisasi *microbubble* menjadi aspek penting untuk mengetahui jumlah, ukuran, dan distribusi gelembung yang dihasilkan suatu sistem. Namun, pengukuran secara manual membutuhkan waktu yang relatif lama dan rentan terhadap subjektivitas pengamat. Oleh karena itu, diperlukan metode analisis yang mampu melakukan karakterisasi *microbubble* secara otomatis, cepat, dan objektif. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem analisis diameter *microbubble* berbasis segmentasi citra digital menggunakan MATLAB untuk memperoleh karakteristik *microbubble* secara kuantitatif. Penelitian dilakukan menggunakan citra *microbubble* yang dihasilkan oleh dua jenis *diffuser*, yaitu *diffuser* C50 dan *diffuser* C80. Proses analisis meliputi tahap pra-pemrosesan citra, segmentasi menggunakan metode *thresholding*, identifikasi *local maxima* sebagai *marker*, penerapan *marker-controlled watershed* untuk memisahkan objek yang saling berhimpitan, serta ekstraksi parameter karakteristik *microbubble*. Data yang diperoleh dianalisis dalam bentuk jumlah gelembung, diameter rata-rata, dan distribusi ukuran *microbubble*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode yang dikembangkan mampu mengidentifikasi objek *microbubble* secara efektif dan melakukan pengukuran karakteristik secara otomatis. *Diffuser* C50 menghasilkan 2114 *microbubble* dengan diameter rata-rata 3,029 μm , sedangkan *diffuser* C80 menghasilkan 1256 *microbubble* dengan diameter rata-rata 2,724 μm . Hasil tersebut menunjukkan bahwa jenis *diffuser* memengaruhi jumlah dan ukuran gelembung yang terbentuk. Penelitian ini memberikan kontribusi berupa sistem analisis *microbubble* terintegrasi berbasis MATLAB yang mampu meningkatkan efisiensi dan objektivitas proses karakterisasi dibandingkan metode manual. Pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan melalui optimasi metode segmentasi dan penggunaan citra dengan kualitas yang lebih tinggi untuk meningkatkan akurasi pengukuran.

Kata-kata kunci: *Microbubble*; Segmentasi Citra; MATLAB; Watershed; Diameter Gelembung.

PENDAHULUAN

Microbubble merupakan gelembung gas yang berukuran *micrometer* dan memiliki karakteristik berupa luas permukaan spesifik yang tinggi, kecepatan naik yang rendah, serta waktu tinggal yang lebih lama di dalam cairan dibandingkan gelembung konvensional. Karakteristik tersebut menjadikan *microbubble* banyak digunakan di berbagai bidang, seperti pengolahan air, pertanian, akuakultur, teknologi lingkungan dan proses transfer massa gas-cair (Nair *et al.*, 2022; Temesgen *et al.*, 2017; Verinda *et al.*, 2022). Ukuran dan konsentrasi *microbubble* merupakan parameter penting dalam proses karakterisasi karena berpengaruh terhadap validitas hasil analisis dan evaluasi performa sistem pembangkit *microbubble*. Selain itu, ukuran gelembung digunakan untuk mengevaluasi kualitas pembentukan *microbubble* karena berkaitan dengan distribusi ukuran, homogenitas gelembung, serta karakteristik sistem

yang digunakan untuk menghasilkan gelembung tersebut (Agarwal *et al.*, 2022; Stigter *et al.*, 2025; Temesgen *et al.*, 2017). Perkembangan teknologi *microbubble* mendorong meningkatnya kebutuhan terhadap metode karakterisasi yang mampu memberikan informasi mengenai *bubble*. Teknologi *micro-nano bubble* mampu menghasilkan karakteristik *bubble* yang berpengaruh terhadap proses pelarutan gas di dalam air (Abdurrahman *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2025). Perbedaan jenis *diffuser* menghasilkan distribusi ukuran *microbubble* yang berbeda, *diffuser* C80 menghasilkan diameter rata-rata yang lebih kecil dan lebih homogen dibandingkan *diffuser* C50 (Fitryan *et al.*, 2025).

Karakterisasi *microbubble* umumnya dilakukan dengan metode analisis citra digital untuk memperoleh informasi mengenai jumlah gelembung, luas area, diameter dan distribusi ukuran. Namun, pengukuran secara manual membutuhkan waktu yang relatif lama dan rentan terhadap subjektivitas pengamat. Metode pengolahan citra otomatis mampu meningkatkan objektivitas identifikasi gelembung serta mengurangi kesalahan yang sering terjadi pada proses pengukuran manual (Aliev *et al.*, 2024). Pengolahan citra digital memungkinkan pengukuran morfologi dan ukuran *microbubble* dilakukan secara otomatis dan real-time sehingga meningkatkan efisiensi proses karakterisasi gelembung (Jin *et al.*, 2024). Oleh karena itu, diperlukan metode analisis otomatis yang mampu mengidentifikasi dan mengukur karakteristik *microbubble* secara lebih cepat dan konsisten. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah pengolahan citra digital berbasis MATLAB yang memungkinkan proses segmentasi dan ekstraksi parameter geometris dilakukan secara otomatis (Gonzalez and Woods, 2018). Perkembangan metode segmentasi citra terus mengalami peningkatan yang dapat menghasilkan identifikasi objek lebih akurat pada berbagai aplikasi ilmiah (shrestha and kaur, 2019). Berbagai metode segmentasi yang telah dikembangkan untuk meningkatkan akurasi identifikasi objek pada citra digital. Metode *marker-controlled watershed* mampu memisahkan objek gelembung yang saling berhimpitan dengan lebih baik dibandingkan metode segmentasi konvensional (Peng *et al.*, 2022). pengolahan citra dapat digunakan untuk menentukan distribusi ukuran diameter *bubble* secara kuantitatif (Mawarni *et al.*, 2023). Kemudian, karakterisasi *microbubble* berbasis citra digital mampu memberikan informasi ukuran dan distribusi *bubble* secara lebih efektif (Najim *et al.*, 2024). selain itu, kualitas segmentasi dipengaruhi oleh tahapan *preprocessing*, terutama peningkatan kontras dan reduksi noise sebelum proses segmentasi berlangsung (Liang *et al.*, 2025; Nugroho *et al.*, 2024).

Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa algoritma *watershed* masih menjadi salah satu metode yang efektif untuk segmentasi objek gelembung, karena mampu memisahkan objek yang saling berhimpitan dengan tingkat akurasi yang tinggi (Kornilov *et al.*, 2022; Peng *et al.*, 2022). Selain itu, metode karakteristik *microbubble* berbasis pengolahan citra terus berkembang untuk menghasilkan pengukuran ukuran dan distribusi *bubble* secara tepat dan otomatis (Najim *et al.*, 2024; Wen *et al.*, 2024). Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa teknologi *microbubble* dan *micro-nano bubble* semakin banyak diterapkan pada berbagai bidang sehingga kebutuhan terhadap sistem karakterisasi yang akurat menjadi semakin penting (Zhao *et al.*, 2025). Karakterisasi *microbubble* berbasis pengolahan citra menunjukkan bahwa integrasi proses segmentasi dan ekstraksi parameter geometris mampu meningkatkan akurasi pengukuran ukuran *bubble* dibandingkan metode konvensional (Mera-Campo *et al.*, 2023; Wen

et al., 2024). Meskipun demikian, penelitian yang mengintegrasikan *preprocessing*, *marker-controlled watershed*, ekstraksi diameter ekuivalen, dan visualisasi distribusi ukuran *microbubble* dalam satu sistem berbasis MATLAB masih terbatas. Pengembangan sistem segmentasi yang terintegrasi dengan proses ekstraksi fitur masih menjadi tantangan pada berbagai aplikasi pencitraan ilmiah, sehingga diperlukan pendekatan yang mampu menggabungkan proses segmentasi dan karakterisasi objek dalam satu platform analisis (Zhao *et al.*, 2025).

Berdasarkan uraian tersebut penelitian ini difokuskan pada pengembangan metode analisis diameter *microbubble* berbasis segmentasi citra digital menggunakan MATLAB. Sistem yang dikembangkan mengintegrasikan tahapan *preprocessing* citra, segmentasi menggunakan *marker-controlled watershed*, ekstraksi diameter ekuivalen, serta visualisasi distribusi ukuran gelembung. Penelitian ini bertujuan memperoleh karakteristik *microbubble* berupa jumlah gelembung, diameter, dan distribusi ukuran secara otomatis sehingga proses analisis dapat dilakukan dengan lebih cepat, objektif, dan efisien dibandingkan pengukuran manual.

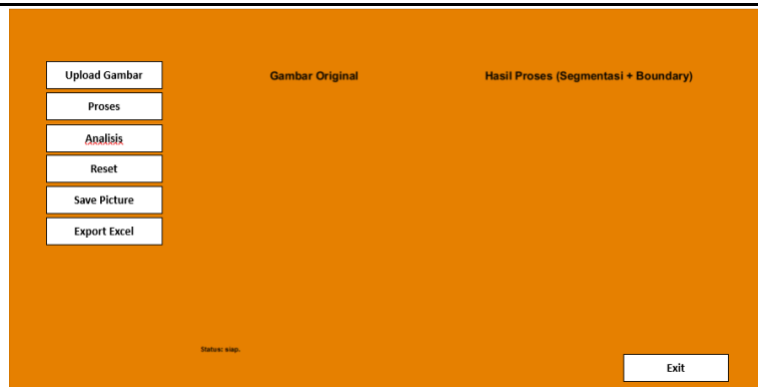
METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif eksperimental yang berfokus pada pengembangan metode segmentasi citra *microbubble* berbasis MATLAB untuk memperoleh karakteristik *microbubble* secara otomatis (Juwana *et al.*, 2018). Objek penelitian ini berupa citra *microbubble* hasil dokumentasi yang diperoleh dari dua jenis *diffuser*, yaitu *diffuser* C50 dan *diffuser* C80. Proses pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB dan excel. Selanjutnya dilakukan tahap *pra-processing* yang meliputi peningkatan kontras dan reduksi noise guna meningkatkan kualitas citra sebelum proses segmentasi (Mawarni *et al.*, 2023). Sistem analisis yang dikembangkan dilengkapi dengan *Graphical User Interface* (GUI) untuk mengintegrasikan seluruh tahapan pengolahan citra, sehingga proses karakterisasi *microbubble* dapat dilakukan secara otomatis dan lebih mudah digunakan oleh pengguna.

Prosedur Penelitian

Prosedur pada penelitian ini diawali dengan proses akuisisi citra *microbubble* menggunakan sistem pencitraan untuk memperoleh data citra yang akan dianalisis. Citra yang diperoleh kemudian dimasukkan ke dalam GUI MATLAB untuk dilakukan proses pengolahan citra. Tampilan antarmuka GUI sistem analisis *microbubble* pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Antarmuka GUI Sistem Analisis *Microbubble*

Pengolahan citra dimulai dari proses peningkatan kualitas citra melalui pengaturan kontras dan reduksi *noise*, sehingga batas objek *microbubble* dan latar belakang dapat dideteksi secara jelas (Mawarni *et al.*, 2023). Selanjutnya, dilakukan proses segmentasi menggunakan *thresholding* untuk memisahkan objek *microbubble* dari latar belakang sehingga diperoleh citra biner. Pemisahan objek *microbubble* dari latar belakang dilakukan melalui proses segmentasi yang dilanjutkan dengan operasi morfologi untuk memperbaiki bentuk objek hasil segmentasi. Pada tahap ini, metode *watershed* digunakan untuk memisahkan gelembung yang berhimpitan sehingga batas antar objek dapat dikenali dengan lebih baik dan akurat (Jahedsaravani *et al.*, 2017). Setelah proses pemisahan objek selesai, dilakukan ekstraksi fitur geometris menggunakan program yang telah dikembangkan pada MATLAB. Parameter yang diperoleh meliputi jumlah gelembung yang terdeteksi, diameter minimum, diameter maksimum, dan diameter rata-rata *microbubble*. Seluruh hasil analisis ditampilkan secara otomatis melalui GUI dalam bentuk citra hasil segmentasi, data numerik, dan grafik distribusi ukuran gelembung.

Analisis Data

Data hasil ekstraksi karakteristik *microbubble* dianalisis secara deskriptif untuk membandingkan karakteristik gelembung yang dihasilkan oleh *diffuser* C50 dan *diffuser* C80. Parameter yang dianalisis meliputi jumlah *microbubble*, diameter rata-rata, dan distribusi ukuran gelembung. Data yang diperoleh kemudian dianalisis secara deskriptif dan disajikan dalam bentuk visualisasi hasil segmentasi serta distribusi ukuran gelembung (Juwana *et al.*, 2018; Mawarni *et al.*, 2023).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Akuisisi dan *Pra-processing* Citra

Tahap awal penelitian dilakukan melalui akuisisi citra *microbubble* yang diperoleh dari hasil dokumentasi *diffuser* penghasil *microbubble*. Citra yang diperoleh kemudian dianalisis melalui tahapan *pra-processing*, segmentasi citra, pemisahan objek *bubble* yang berhimpitan, serta ekstraksi karakteristik *bubble*. Hasil analisis kemudian disajikan dalam bentuk visual berupa deteksi *bubble* dan histogram distribusi diameter, serta dalam bentuk numerik berupa

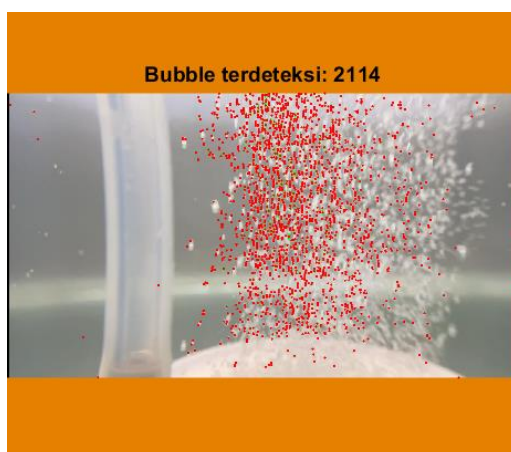
jumlah *microbubble* dan diameter rata-rata. Berikut gambar portal antarmuka analisis *microbubble* berbasis MATLAB yang digunakan pada penelitian ini



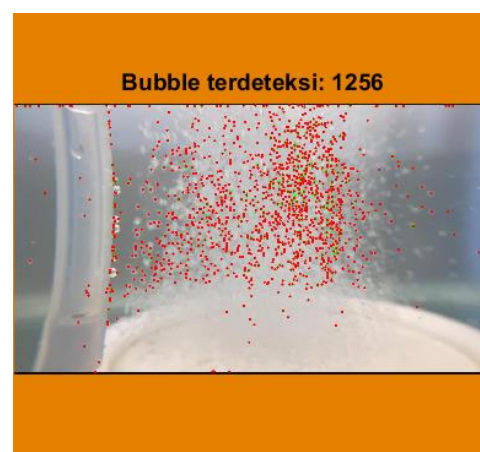
Gambar 2. GUI Program Analisis *Microbubble*

Hasil Segmentasi *Microbubble*

Segmentasi citra dilakukan menggunakan metode *thresholding*, *local maxima*, dan metode *watershed*. Metode *thresholding* digunakan untuk memisahkan objek *bubble* dari latar belakang berdasarkan objek pixel. Namun, beberapa gelembung yang berhimpitan masih terdeteksi sebagai satu objek. Oleh karena itu dilakukan identifikasi *local maxima* untuk menentukan titik pada setiap gelembung sebagai penanda (*marker*). Selanjutnya, metode *marker-controlled watershed* diterapkan untuk memisahkan *microbubble* yang saling berhimpitan menjadi objek individual. Hasil segmentasi menunjukkan bahwa setiap gelembung dapat diidentifikasi dengan lebih baik sehingga mendukung proses pengukuran diameter dan analisis distribusi ukuran *microbubble*. Hasil segmentasi citra ditunjukkan pada Gambar 3.a dan Gambar 3.b



Gambar 3.a Hasil Segmentasi *Microbubble* C50



Gambar 3.b Hasil Segmentasi *Microbubble* C80

Hasil Ekstraksi Karakteristik *Microbubble*

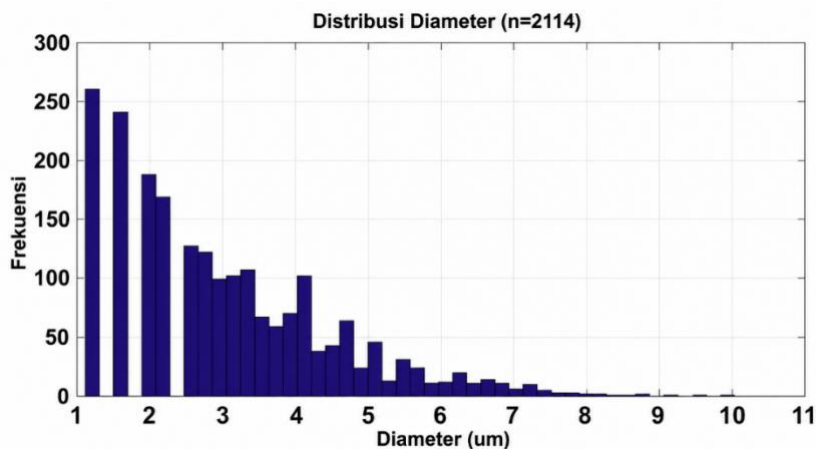
Setelah proses segmentasi selesai, dilakukan pelabelan objek dan ekstraksi parameter untuk memperoleh karakteristik *microbubble* secara kuantitatif. Proses ini memungkinkan setiap gelembung yang berhasil disegmentasi dihitung sebagai objek individual sehingga dapat dilakukan pengukuran ukuran gelembung secara otomatis. Parameter yang dianalisis meliputi jumlah gelembung yang terdeteksi, diameter minimum, diameter maksimum, dan diameter rata-rata. Hasil ekstraksi menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu mengidentifikasi dan mengukur karakteristik *microbubble* secara efektif berdasarkan citra hasil segmentasi.

Tabel 1. Data Analisis *Microbubble*

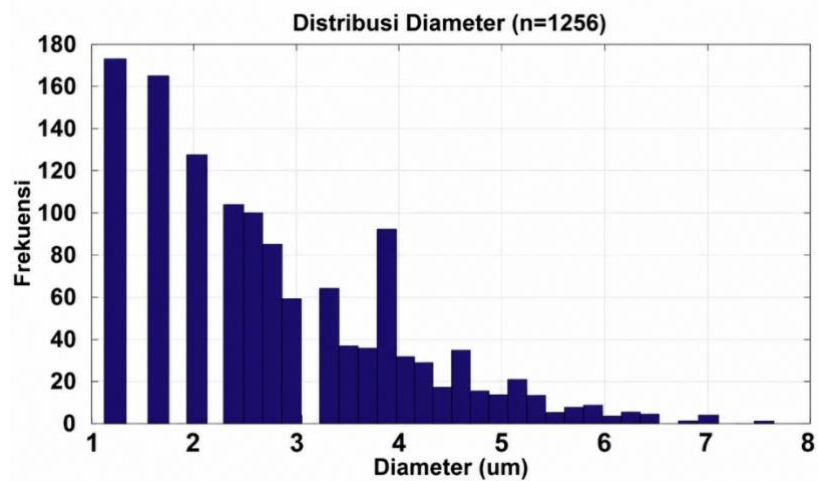
No	Jenis <i>Diffuser</i>	Jumlah <i>Microbubble</i>	Diameter Rata-rata (μm)
1	C50	2114	3,029
2	C80	1256	2,724

Hasil ekstraksi karakterisasi *microbubble* menunjukkan adanya perbedaan jumlah gelembung dan diameter rata-rata yang dihasilkan oleh masing-masing *diffuser*. *Diffuser* C50 menghasilkan 2114 *microbubble* dengan diameter rata-rata sebesar 3,029 μm , sedangkan *diffuser* C80 menghasilkan 1256 *microbubble* dengan diameter rata-rata sebesar 2,724 μm . Hasil ini menunjukkan bahwa kedua *diffuser* menghasilkan karakteristik *microbubble* yang berbeda, baik dari segi jumlah maupun ukuran gelembung yang terbentuk. Perbandingan karakteristik *microbubble* pada kedua *diffuser* ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Selain menghasilkan data jumlah dan diameter rata-rata, sistem yang dikembangkan juga mampu menampilkan distribusi ukuran *microbubble* dalam bentuk histogram. Visualisasi distribusi diameter digunakan untuk menunjukkan sebaran ukuran gelembung yang dihasilkan oleh masing-masing *diffuser*. Histogram distribusi diameter *microbubble* untuk *diffuser* C50 dan C80 ditunjukkan pada Gambar 4.a dan Gambar 4.b.



Gambar 4.a Histogram Distribusi Diameter *microbubble* pada *Diffuser* C50



Gambar 4.b Histogram Distribusi Diameter *microbubble* pada *Diffuser C80*

Pembahasan

Hasil segmentasi menunjukkan bahwa gabungan metode *thresholding*, *local maxima*, dan metode *watershed* mampu mengidentifikasi objek *microbubble* secara efektif. Metode *thresholding* berfungsi memisahkan objek dari latar belakang berdasarkan perbedaan intensitas piksel sehingga diperoleh citra biner yang memudahkan proses identifikasi objek. Namun, pada kondisi *microbubble* yang saling berhimpitan, hasil *thresholding* belum mampu memisahkan setiap gelembung secara individual. Oleh karena itu, digunakan *local maxima* sebagai penanda (*marker*) untuk menentukan pusat masing-masing gelembung. Penggunaan *marker-controlled watershed* memungkinkan gelembung yang saling berhimpitan dipisahkan menjadi objek individual sehingga meningkatkan akurasi identifikasi segmentasi. Metode *watershed* berbasis *marker* mampu memperbaiki pemisahan objek gelembung yang saling berhimpitan dan menghasilkan segmentasi yang lebih akurat dibandingkan metode konvensional (Peng *et al.*, 2022). Selain itu, *watershed* merupakan salah satu metode segmentasi yang efektif untuk memisahkan objek yang memiliki batas saling berdekatan. Keberhasilan segmentasi pada penelitian ini menunjukkan bahwa tahapan tersebut mampu mendukung proses analisis kuantitatif karakteristik *microbubble* secara lebih objektif dan konsisten dibandingkan pengukuran manual (Kornilov *et al.*, 2022). Maka, pengolahan citra otomatis dapat meningkatkan objektivitas identifikasi objek serta mengurangi kesalahan yang sering terjadi pada proses pengukuran manual (Aliiev *et al.*, 2024). Segmentasi merupakan tahapan yang penting dalam pengolahan citra digital karena berfungsi memisahkan objek dari latar belakang sehingga karakteristik objek dapat dianalisis secara kuantitatif (Gonzalez and Woods, 2018).

Hasil karakterisasi *microbubble* menunjukkan bahwa *diffuser* menghasilkan 2114 *microbubble* dengan diameter rata-rata 3,029 μm , sedangkan *diffuser C80* menghasilkan 1256 *microbubble* dengan diameter rata-rata 2,724 μm . Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa jenis *diffuser* memengaruhi karakteristik gelembung yang terbentuk. *Diffuser C80* menghasilkan diameter gelembung yang lebih kecil dibandingkan *diffuser C50*. Hal ini sejalan dengan penelitian Fitryan *et al.* (2025) yang menunjukkan bahwa adanya variasi *diffuser* akan

menghasilkan distribusi ukuran *microbubble* yang berbeda. Perbedaan ukuran gelembung yang dihasilkan menunjukkan bahwa konfigurasi *diffuser* berperan penting dalam menentukan karakteristik *microbubble* yang terbentuk. Ukuran *bubble* yang lebih kecil memiliki luas permukaan spesifik yang lebih besar dibandingkan ukuran *bubble* yang lebih besar, hal ini berpotensi dapat meningkatkan efisiensi perpindahan massa gas ke dalam cairan. Penelitian yang dilakukan Temesgen *et al.* (2017) menjelaskan bahwa *microbubble* berukuran kecil memiliki kecepatan naik yang lebih rendah dan waktu tinggal yang lebih lama di dalam cairan sehingga meningkatkan peluang terjadinya transfer massa. Hal ini serupa juga dengan penelitian yang dilakukan Agarwal *et al.* (2022) yang menyatakan bahwa ukuran gelembung merupakan parameter penting dalam menentukan karakteristik hidrodinamika dan efisiensi perpindahan massa pada sistem gas-cair. Oleh karena itu, diameter rata-rata yang lebih kecil pada *diffuser* C80 menunjukkan potensi yang lebih baik dalam mendukung proses pelarutan gas, meskipun jumlah gelembung yang dihasilkan lebih sedikit dibandingkan *diffuser* C50.

Hasil penelitian ini mendukung temuan Mera-Campo *et al.* (2023) dan Najim *et al.* (2024) yang menunjukkan bahwa metode pengolahan citra digital mampu digunakan untuk karakterisasi *microbubble* secara kuantitatif melalui pengukuran ukuran dan distribusi gelembung. Penggunaan analisis citra memungkinkan proses pengukuran dilakukan secara otomatis sehingga menghasilkan data yang lebih konsisten dan dapat direproduksi. Selain itu, visualisasi distribusi diameter dalam bentuk histogram memberikan informasi yang lebih lengkap mengenai sebaran ukuran *microbubble* yang dihasilkan oleh masing-masing *diffuser*.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan sistem analisis *microbubble* berbasis MATLAB yang mengintegrasikan seluruh tahapan pengolahan citra, mulai dari *pre-processing*, segmentasi menggunakan *thresholding* dan *watershed*, hingga ekstraksi karakteristik *microbubble* dalam satu platform analisis. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya berfokus pada metode segmentasi atau pengukuran diameter secara terpisah, sistem yang dikembangkan mampu melakukan identifikasi jumlah gelembung dan analisis ukuran secara otomatis sehingga proses karakterisasi *microbubble* menjadi lebih cepat, objektif, dan efisien.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem analisis *microbubble* berbasis MATLAB yang mampu melakukan segmentasi citra dan karakteristik *microbubble* secara otomatis melalui metode *thresholding* dan *watershed*. Metode yang diterapkan mampu mengidentifikasi objek *microbubble* secara efektif serta menghasilkan informasi jumlah gelembung dan diameter rata-rata. Hasil analisis menunjukkan bahwa jenis *diffuser* memengaruhi karakteristik *microbubble* yang dihasilkan, di mana *diffuser* C50 menghasilkan jumlah gelembung lebih banyak, sedangkan *diffuser* C80 menghasilkan ukuran gelembung yang lebih kecil. Kontribusi penelitian ini terletak pada integrasi proses segmentasi dan ekstraksi karakteristik *microbubble* dalam satu platform analisis yang lebih cepat dan objektif dibandingkan metode manual. Namun, penelitian ini masih memiliki keterbatasan dalam pembacaan citra dengan pencahayaan yang tidak merata atau intensitas *bubble* yang bervariasi, sehingga dapat memengaruhi kualitas segmentasi dan akurasi identifikasi objek. Oleh karena itu, penelitian

selanjutnya disarankan untuk mengembangkan metode segmentasi yang lebih adaptif terhadap variasi kualitas citra serta menguji lebih banyak jenis diffuser dan kondisi operasi agar karakterisasi *microbubble* dapat dilakukan secara lebih akurat dan komprehensif.

REFERENSI

- Abdurrahman, A. F., Yossa Adirajasa, Y., Yulianto, E., Sumariyah, S., Wardaya, Y., Sudarmanto, A., Budi, S., & Nur, M. (2022). Comparison of Ozone Production by Difference DBD Configuration Reactor and Dissolved Ozone in Water with Micro-Nano Bubble Technology. In *International Journal of Innovative Science and Research Technology* (Vol. 7). www.ijisrt.com
- Agarwal, N., Lee, M., & Kim, H. (2022). A Non-Invasive Method for Measuring Bubble Column Hydrodynamics Based on an Image Analysis Technique. *Processes*, 10(8), 1660. <https://doi.org/10.3390/pr10081660>
- Aliev, T., Korolev, I., Burdulenko, O., Alchinova, E., Subbota, A., Yasnov, M., Nosonovsky, M., & Skorb, E. V. (2024). Automatic image processing of cavitation bubbles to analyze the properties of petroleum products. *Digital Discovery*, 3(6), 1101–1107. <https://doi.org/10.1039/d4dd00003j>
- Fitryan, A., Surtono, A., Yulianto, E., Sasmita, E., Nur, M., Aprilia, A., Lidya Susanti, N., & Faruq Abdurrahman, A. (2025). Characterization of Corona Plasma Ozone Generators and Analysis of Microbubble Ozone Size for Efficient Mass Transfer-Anggyta Fitryan et.al Characterization of Corona Plasma Ozone Generators and Analysis of Microbubble Ozone Size for Efficient Mass Transfer. *Jurnal Multidisiplin Sahombu*, 5. <https://doi.org/10.58471/jms.v5i06>
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing*. Pearson.
- Jahedsaravani, A., Massinaei, M., & Marhaban, M. H. (2017). An image segmentation algorithm for measurement of flotation froth bubble size distributions. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 111, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.023>
- Jin, S., Ye, G., Guo, Y., Zhao, Z., Lu, L., Liu, Z., & Ding, Z. (2024). A real-time monitoring and measurement method for microbubble morphology based on image processing technology. *Microchemical Journal*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110881>
- Juwana, W. E., Widyatama, A., Majid, A. I., Wiratni, Indarto, & Deendarlianto. (2018). The application of digital image analysis to study the characteristic of bubble size distribution produced by orifice type microbubble generator. *AIP Conference Proceedings*, 2001. <https://doi.org/10.1063/1.5049995>
- Kornilov, A., Safonov, I., & Yakimchuk, I. (2022). A Review of Watershed Implementations for Segmentation of Volumetric Images. In *Journal of Imaging* (Vol. 8, Number 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/jimaging8050127>
- Liang, L., Chen, J., Shi, J., Zhang, K., & Zheng, X. (2025). Noise-Robust image edge detection based on multi-scale automatic anisotropic morphological Gaussian Kernels. *PLoS ONE*, 20(5 May). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0319852>
- Mawarni, D. I., Indarto, Deendarlianto, & Yuana, K. A. (2023). Metode digital image processing untuk menentukan distribusi ukuran diameter gelembung udara pada microgelembung generator. *Journal of Information System Management (JOISM)*, 4(2), 132–136. <https://doi.org/10.24076/joism.2023v4i2.977>

- Mera-Campo, J. S., Muñoz-Alegria, J. A., Flórez-Marulanda, J. F., & Muñoz-España, E. (2023). Characterization of Microbubbles Generated in a Venturi Tube via Image Processing: Effect of Operating Parameters. *Ingenieria (Colombia)*, 28(3). <https://doi.org/10.14483/23448393.19845>
- Nair, S. S., Pinedo-Cuenca, R., Stubbs, T., Davis, S. J., Ganesan, P. B., & Hamad, F. (2022). Contemporary application of microbubble technology in water treatment. *Water Science and Technology*, 86(9), 2138–2156. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.328>
- Najim, S. A., Meerakaviyad, D., Pun, K., Russell, P., Ganesan, P. B., Hughes, D., & Hamad, F. A. (2024). Visualizing and Evaluating Microbubbles in Multiphase Flow Applications. *Fluids*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/fluids9030058>
- Nugroho, A., Sunarko, B., Wibawanto, H., Mulwinda, A., Fauzi, A., Oktaviyanti, D., & Savitri, D. W. (2024). Segmentasi Objek Citra Ultrasonografi Terotomatisasi Menggunakan Metode Aktif Kontur Kombinatorial. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Komputer*, 11(1), 8–17. <https://doi.org/10.14710/jtsiskom.2023.14712>
- Peng, C., Liu, Y., Gui, W., Tang, Z., & Chen, Q. (2022). Bubble Image Segmentation Based on a Novel Watershed Algorithm with an Optimized Mark and Edge Constraint. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1–10. <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3129873>
- shrestha, R., & kaur, Dr. M. (2019). Image Segmentation Techniques A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 06(11), 945. <https://doi.org/DOI:10.13140/RG.2.2.35679.27043>
- Stigter, R., Fiscoletti, D., Elsinga, G. E., van Terwisga, T., & Westerweel, J. (2025). An improved calibration methodology and uncertainty assessment in measurements of microbubble size and concentration. *Experiments in Fluids*, 66(1). <https://doi.org/10.1007/s00348-024-03929-3>
- 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. In *Advances in Colloid and Interface Science* (Vol. 246, pp. 40–51). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.06.011>
- Verinda, S. B., Muniroh, M., Yulianto, E., Maharani, N., Gunawan, G., Amalia, N. F., Hobley, J., Usman, A., & Nur, M. (2022). Degradation of ciprofloxacin in aqueous solution using ozone microbubbles: spectroscopic, kinetics, and antibacterial analysis. *Heliyon*, 8(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10137>
- Wen, W., Harpster, S. L., Piñeiro, A. M., & Wong, J. Y. (2024). *Methods for Rapid Characterization of Tunable Microbubble Formulations*. <https://doi.org/10.3390/bioengineering>
- Zhao, S., Wu, J., & Li, Y. (2025). Advances in the Research on the Properties and Applications of Micro-Nano Bubbles. In *Processes* (Vol. 13, Number 7, p. 2106). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/pr13072106>