

Penggunaan Teknik Digital Image Processing dalam Menentukan Ukuran Diameter Gelembung Berukuran Mikro

Yoriza DwiKusuma 1^a, Drajat Indah Mawarni 2^{b*}

^a Jurusan Teknik Mesin STT Ronggolawe Cepu Jl. Kampus Ronggolawe Blok B No. 1 Mentul Cepu Kab. Blora

^b Jurusan Teknik Mesin STT Ronggolawe Cepu Jl. Kampus Ronggolawe Blok B No. 1 Mentul Cepu Kab. Blora

* Alamat Email: drajatindah74@gmail.com

Diterima : 29-12-2024

- Direview : 30-12-2024

- Diterbitkan : 31-12-2024

Intisari

Penelitian ini mengkaji penggunaan teknik *Digital Image Processing* (Pemrosesan Citra Digital) untuk mengukur dan menganalisis distribusi diameter gelembung mikro pada *Microbubble Generator* tipe aliran *swirl* dengan variasi debit air (QL) dan debit udara (QG). Teknik pemrosesan *citra digital* dipilih karena dapat melakukan pengukuran secara otomatis, cepat, dan konsisten, dibandingkan metode konvensional yang sering kali lambat dan kurang akurat. Penelitian ini menggunakan MATLAB R2021a dengan *Image Processing Toolbox* untuk memproses video rekaman dari kamera Canon 1200D, yang dikonversi dan diekstraksi menjadi gambar dengan format TIF. Penelitian ini memfokuskan pada distribusi gelembung dalam kondisi debit air sebesar 24 lpm, 32 lpm, dan 40 lpm serta variasi debit udara dari 0,1 hingga 0,8 lpm. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada debit air rendah (24 lpm), ukuran gelembung cenderung lebih kecil dan lebih terpusat, sedangkan pada debit air lebih tinggi (32 lpm dan 40 lpm), distribusi ukuran gelembung lebih merata dan bervariasi. Hasil akhir dari ekstraksi data *image processing* ini adalah distribusi diameter microgelembung yang dinyatakan dalam *Probability Distribution Function* (PDF) dan digunakan untuk mempresentasikan perbandingan distribusi dimensi gelembung udara yang dihasilkan oleh MBG. Tantangan yang dihadapi dalam penelitian ini meliputi validasi pada QG tinggi, di mana terdapat penyimpangan dalam hasil distribusi yang diakibatkan oleh kualitas pencitraan atau gangguan fisik.

Kata Kunci : *Digital Image Processing, Microbubble, Microbubble Generator, Microbubble Generator tipe swirl, Probability Density Function*

Abstract

This study examines the use of *Digital Image Processing* techniques to measure and analyze the distribution of microbubble diameters in a *swirl flow type Microbubble Generator* with variations in water flow rate (QL) and air flow rate (QG). *Digital image processing* techniques were chosen because they can perform measurements automatically, quickly, and consistently, compared to conventional methods which are often slow and less accurate. This study uses MATLAB R2021a with the *Image Processing Toolbox* to process video recordings from a Canon 1200D camera, which are converted and extracted into images in TIF format. This study focuses on the distribution of bubbles in water discharge conditions of 24 lpm, 32 lpm, and 40 lpm and variations in air discharge from 0.1 to 0.8 lpm. The results of the analysis show that at low water discharge (24 lpm), the bubble size tends to be smaller and more centralized, while at higher water discharge (32 lpm and 40 lpm), the bubble size distribution is more even and varied. The final result of this image processing data extraction is the distribution of microbubble diameters expressed in the *Probability Distribution Function* (PDF) and is used to present a comparison of the distribution of air bubble dimensions produced by MBG. Challenges faced in this study include validation at high QG, where there are deviations in the distribution results due to imaging quality or physical interference.

Keywords : *Digital Image Processing, Microbubble, Microbubble Generator, Microbubble Generator tipe swirl, Probability Density Function*

1. Pendahuluan

Penelitian dalam bidang pengukuran gelembung mikro atau gelembung yang berukuran kurang dari 1 mm, memiliki signifikansi besar, terutama dalam berbagai aplikasi industri, seperti rekayasa kimia, farmasi, bioteknologi, dan teknologi lingkungan. Gelembung mikro digunakan dalam proses flotasi, reaktor kimia, dan terapi medis, seperti dalam pengiriman obat atau terapi ultrasonik. Ukuran gelembung berpengaruh besar terhadap efisiensi proses, seperti laju

perpindahan massa, reaksi kimia, atau efektivitas terapi medis. Oleh karena itu, pengukuran yang akurat dan cepat dari ukuran gelembung mikro menjadi tantangan penting dalam berbagai aplikasi (Hwang, J. H., & Zheng, Y., 2017).

Metode konvensional untuk mengukur ukuran gelembung, seperti metode manual menggunakan mikroskop atau perangkat optik, sering kali tidak memadai dalam hal kecepatan, akurasi, dan presisi. Penggunaan metode manual juga rentan terhadap subjektivitas operator dan keterbatasan dalam jumlah data yang dapat diperoleh. Selain itu, ukuran

gelembung yang sangat kecil dan bervariasi secara cepat memerlukan pendekatan yang lebih otomatis dan akurat untuk melakukan pengukuran dalam jumlah besar (Zhang, H., & Zhang, J, (2019).

Untuk mengatasi masalah ini, teknik Digital Image Processing (Pemrosesan Citra Digital) telah diperkenalkan sebagai metode alternatif yang sangat efektif. Teknik ini memungkinkan analisis citra secara otomatis untuk menentukan ukuran dan distribusi gelembung dengan lebih akurat, cepat, dan konsisten. Pemrosesan citra digital memanfaatkan algoritma komputer untuk memproses dan menganalisis gambar yang diambil dari kamera atau mikroskop digital. Proses ini dapat meliputi deteksi tepi, segmentasi citra, dan analisis partikel yang memungkinkan pengukuran diameter gelembung mikro secara otomatis.

Pemrosesan citra digital memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode tradisional. Pertama, teknik ini dapat memproses gambar dalam waktu yang sangat singkat dan menghasilkan hasil yang lebih konsisten, terutama ketika digunakan dalam lingkungan dengan perubahan dinamis. Kedua, teknik ini mampu menangani sejumlah besar data yang tidak mungkin diolah secara manual. Ketiga, akurasi pengukuran dapat ditingkatkan dengan mengurangi faktor subjektif manusia dan dengan menggunakan teknik koreksi otomatis untuk distorsi optik atau gangguan lainnya (Lee, W., & Lee, D, (2021).

Pada penelitian ini, teknik pemrosesan citra digital digunakan untuk menentukan ukuran diameter gelembung mikro dengan memvariasikan laju debit air (QL) dan laju debit udara (QG). Pemrosesan citra memungkinkan untuk mengukur distribusi diameter gelembung dalam berbagai kondisi aliran yang berbeda, dari laju aliran rendah hingga tinggi. Tantangan yang dihadapi dalam penelitian ini termasuk validasi pengukuran pada gelembung dengan ukuran sangat kecil (mikro), serta mempertahankan konsistensi pengukuran pada variasi laju debit udara dan air yang tinggi.

Dalam konteks ini, teknologi pengolahan citra digital menjadi salah satu alat yang sangat berguna dalam menganalisis dan mengukur diameter gelembung pada gambar atau video. Pengolahan Citra Digital merupakan suatu metode penangkapan dan pengolahan citra yang bersifat tidak merusak (non-intrusif) dimana proses pengambilan data dilakukan dengan bantuan alat penangkap citra khusus untuk kemudian diolah menggunakan perangkat lunak dengan algoritma pengolahan citra. Teknik ini memiliki keunggulan yaitu dapat mengukur dimensi distribusi gelembung pada aliran yang tidak teratur secara akurat serta kemampuan untuk bekerja secara otomatis, menghasilkan pengukuran yang konsisten (Mawarni dkk, 2023).

Dari penelitian sebelumnya masih sedikit informasi yang melakukan penelitian metode digital image processing terhadap bubble. Oleh karena itu,

penelitian ini menggunakan Microbubble generator tipe aliran swirl sebagai alat untuk eksperimen penelitian dengan variasi debit air (QL) dan debit udara (QG). Penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih baik tentang kontribusi dan potensi digital image processing dalam analisis ukuran bubble dengan pengolahan data menggunakan metode image processing pada perangkat lunak MATLAB R2021a.

2. Kerangka Teori

2.1. Microbubble

Microbubble adalah bubble yang mempunyai ukuran dengan rentang antara milimeter dan mikrometer. Beberapa keunikan dari microbubble adalah karena ukuran bubble yang sangat kecil, sehingga luas kontak antara permukaan fase cair dan gas besar sehingga efisiensinya meningkat. memiliki waktu tinggal dalam cairan lebih lama, memiliki kecepatan slip lebih rendah karena laju kelarutan yang dihasilkan lebih tinggi dengan kecepatan naik (rising velocity) lebih lambat (Mawarni & Korawan, 2019).

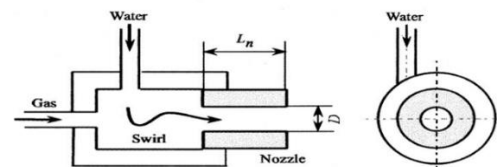
Menurut The American Heritage Dictionary of the English language: Fourth edition (2000), pengertian Microbubble adalah gelembung udara yang berukuran mikro yang dapat tersuspensi secara merata pada cairan. Dalam penelitian-penelitian yang telah dilaksanakan, terdapat beberapa definisi berbeda dari Microbubble. Ohnari (2002) mendefinisikan Microbubble sebagai gelembung yang ukurannya kurang dari 10 μm . Kemudian Sadatomi dkk (2005), mendefinisikan Microbubble sebagai gelembung berukuran $\leq 200 \mu\text{m}$. Sedangkan Terasaka (2011) mendefinisikan Microbubble adalah gelembung kecil yang memiliki diameter 10-60 μm .

2.2. Microbubble generator

Microbubble generator (MBG) merupakan suatu alat yang dapat menghasilkan gelembung-gelembung berukuran mikro yang menggunakan prinsip tekanan negatif yang berfungsi untuk meningkatkan kandungan oksigen terlarut pada air serta penjernihan air dengan waktu relatif lebih singkat (Yulianto, 2019).

2.3. Microbubble generator tipe swirl

Microbubble generator tipe swirl merupakan Microbubble generator yang dapat menghasilkan gelembung-gelembung kecil yang saat ini sedang dikembangkan. Selain memiliki kemampuan menghasilkan gelembung udara kecil secara efektif, desainnya juga lebih sederhana dengan proses pembuatan yang lebih mudah (Tabei & Haruyama. 2007, Terasaka et al. 2011, Kogawa et al. 2015, Xu et al. 2018) dibandingkan dengan Microbubble generator non-tipe swirl.



Gambar 2. 2 Skema Microbubble Generator Tipe Swirl Jet

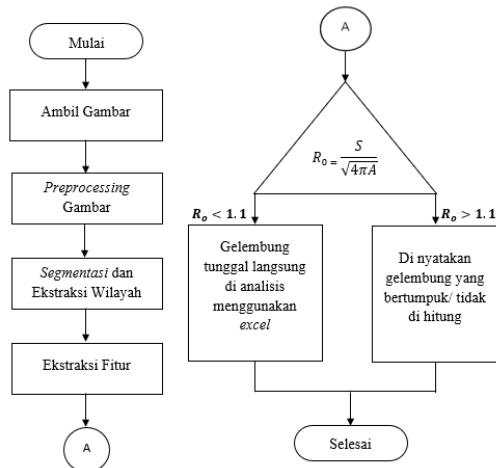
2.4. Digital image processing

Digital image processing adalah sebuah metode yang memungkinkan penangkapan dan pengolahan citra secara non-intrusif atau tanpa merusak objek yang diobservasi. Proses pengumpulan data dalam teknik ini melibatkan penggunaan alat tangkap gambar khusus, yang kemudian diolah menggunakan perangkat lunak dengan algoritma image processing (Mawarni dkk, 2023). Dalam penelitian microbubble, metode ini digunakan untuk menganalisis distribusi ukuran diameter gelembung mikro yang dihasilkan seperti penelitian performa Microbubble generator yang dilakukan oleh Deendarlianto dkk, (2015) dan Sadatomi dkk,

(2012). Pengolahan citra melibatkan proses input dan output berupa gambar, di mana gambar diekstraksi dan objek tunggal diklasifikasikan berdasarkan hasil analisis gambar mentah atau raw image. Gambar kemudian diproses untuk dikonversi menjadi bentuk matriks sebelum dianalisis lebih lanjut.

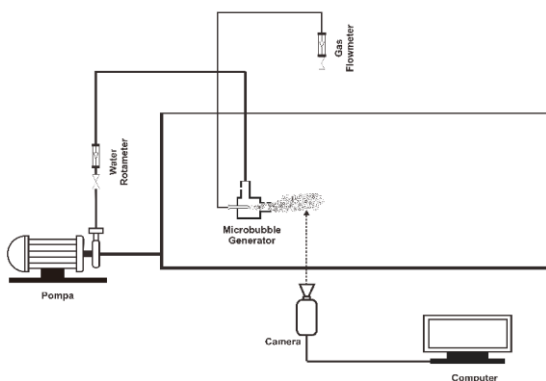
3. Metodologi

3.1. Diagram Alir Penelitian (Flow Chart)

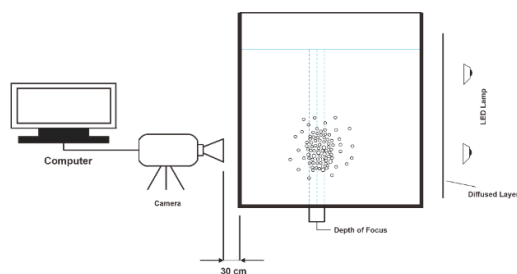


Gambar 3.1. Diagram Alir

3.2. Skema Penelitian



Gambar 3.2. Skema Peralatan Penelitian



Gambar 3.3. Perekaman image

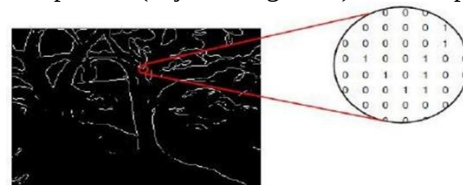
Skema dari penelitian ini menggunakan metode *digital image processing* dengan menggunakan *software* matlab R2021a. Hasil perekaman dengan *camera* canon 1200D adalah *file* video berekstensi Mov. Sebelum dilakukan *image processing*, *file* video dikonversi ke *file* video berekstensi mp4. Kemudian *file* video diekstrak menjadi *file* *image* berekstensi tif. *Image processing* dilakukan dengan

menggunakan *software* matlab R2021a yang dilengkapi *image processing toolbox*. *Image* hasil ekstraksi video yang dihasilkan *camera* adalah *image* abu-abu (*grayscale image*). Metode penelitian ini menggunakan teknik *image representation*, *image preprocessing*, *image enhancement*, *image segmentasi*, *image analysis*, *validasi*. Langkah-langkah *image processing* dengan menggunakan *software* matlab adalah sebagai berikut:

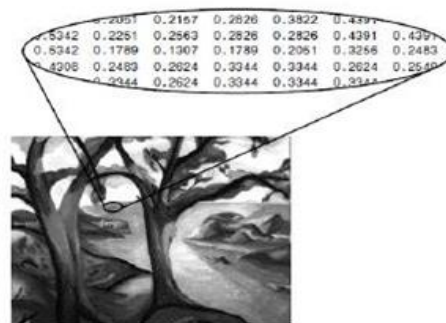
a. Image representation.

Image yang dibaca matlab akan diubah dalam bentuk matrik. Elemen matrik menyatakan nilai pixel dari *image*, nilainya antara 0-255. 0 menyatakan warna hitam, 255 menyatakan warna putih dan diantaranya adalah warna abu abu.

binary image merupakan format gambar dengan nilai elemen gambar berupa 0 dan 1, sehingga struktur gambar dapat dikelompokkan (object recognition) secara cepat.



Gambar 3. 4 Binary Image Dan Nilai Pixel



Gambar 3. 5 Grayscale image

Grayscale image adalah gambar yang tersusun dari kumpulan matriks piksel dengan nilai integer dalam jangka [0, 255] yang merepresentasikan nilai bayangan dari warna abu-abu yang ditangkap.

b. Image preprocessing

Proses ini bertujuan untuk mengubah ukuran *image*. Pada penelitian ini, proses mengubah ukuran dengan cara memotong (crop) *image*. Pemotongan *image* dilakukan karena pencahayaan tidak bisa merata di seluruh bidang *image*. *Image* cenderung terang di bagian tengah dan gelap pada bagian tepi. Hal ini akan menyulitkan pemrosesan *image* selanjutnya.

c. Image enhancement

Tujuan dari *image enhancement* adalah menonjolkan fitur tertentu dari suatu *image*. Fitur tertentu dalam hal ini adalah gelembung. Pada penelitian ini, teknik yang digunakan untuk menonjolkan gelembung pada *image* dengan cara pemfilteran *image*. Filter tersebut digunakan untuk meningkatkan kontras dan mengurangi noise (derau) pada *image*. Perintah matlab yang digunakan untuk meningkatkan kontras dari *image* adalah *imtophat* dan *imbothat*.

d. Image Segmentasi

Image segmentasi adalah suatu proses untuk memisahkan sebuah obyek dari background, sehingga obyek tersebut dapat diproses untuk keperluan yang lain. Obyek dalam hal ini adalah gelembung. Metode yang digunakan adalah mengonversi *grayscale image* menjadi *binary image* dan diikuti dengan komplemen. *Binary image* adalah *image* dengan nilai pixel 0 dan 1. Untuk mengonversi dari *grayscale image* ke *binary image* ditentukan nilai ambang batas (*threshold*) untuk mendefinisikan nilai pixel *grayscale image* yang akan bernilai 1 atau 0. Perintah matlab untuk mengonversi adalah *im2bw*. Setelah dilakukan konversi gelembung akan terlihat berwarna hitam (nilai pixel 0) dan background berwarna putih (nilai pixel 1). Agar ukuran gelembung dapat dianalisis *image* kemudian dikomplemen.

e. Image analysis

Pada bagian ini *image* gelembung dianalisis secara kuantitatif yang meliputi luas, diameter ekuivalen, pusat, perimeter dan *roundness* gelembung. Yang menjadi kesulitan dalam *image analysis* dari gelembung yaitu adanya gelembung yang saling menempel atau berdekatan. Gelembung yang saling menempel atau berdekatan pada original *image* akan tampak menyatu pada *binary image*, sehingga dalam analisis akan dideteksi sebagai satu gelembung. Untuk meningkatkan keakuratan analisis, pada penelitian ini digunakan metode yang dikembangkan Lau, dkk (2013) untuk mendeteksi apakah gelembung saling menempel atau tidak. Proses pada metode ini dapat dibagi menjadi tiga tahap yaitu :

1. Memisahkan gelembung berdasarkan *roundness* yang didefinisikan sebagai berikut :

$$RO = S\sqrt{4\pi A}$$

dimana:

S = perimeter gelembung

A = luasan gelembung

$RO > 1,3$ didefinisikan sebagai gelembung saling menempel.

$RO < 1,3$ didefinisikan sebagai *solitary* gelembung.

2. Melakukan operasi morfologi *watershed* pada gelembung saling menempel ($RO > 1,3$).
3. Menggabungkan kembali *solitary* gelembung dan gelembung yang telah dilakukan proses *watershed*.

f. Validasi

Validasi digunakan untuk memastikan apakah hasil dari pemrosesan *image processing* mendekati kondisi sebenarnya atau mendekati kenyataan atau tidak. Proses *validasi* ini dilakukan dengan cara menggambar lingkaran yang berpusat dan memiliki diameter ekuivalen sesuai dengan data yang telah diekstrak.

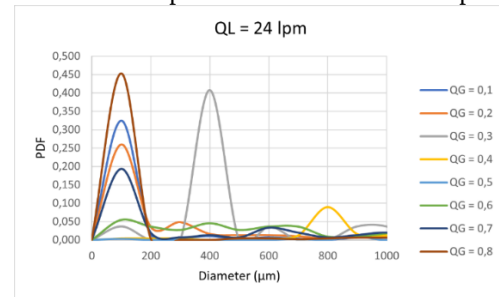
4. Hasil dan Pembahasan

Pengambilan citra dilakukan menggunakan kamera yang merekam video dalam format MOV dengan resolusi 1280×720 piksel pada 60 *frame per detik* (fps). Proses pengolahan citra dilakukan dengan menggunakan *toolbox* pada perangkat lunak MATLAB R2021a, di mana video hasil perekaman diekstrak menjadi 100 gambar berformat TIF yang kemudian diolah lebih lanjut. Hasil akhir dari pengolahan ini adalah file MS Excel yang berisi data diameter total gelembung yang dihasilkan.

4.1 Grafik PDF (Probability density function)

Hasil *Image processing* yang dilakukan untuk mengetahui distribusi *microbubble* di validasi dengan menggunakan grafik PDF untuk mengetahui distribusi *bubble* secara detail. Grafik tersebut menggambarkan Fungsi Kepadatan Probabilitas (PDF) dari distribusi diameter (mikrometer) untuk berbagai nilai QL dan QG pada laju aliran cairan lpm (liter per menit). Sumbu X (Diameter μm) menggambarkan diameter partikel atau *bubble* dalam mikrometer. Sumbu Y (PDF) menggambarkan fungsi kepadatan probabilitas, yang menunjukkan seberapa besar kemungkinan diameter tertentu berada dalam distribusi.

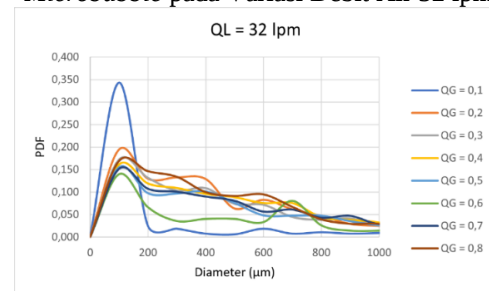
A. Grafik PDF (Probability density function) Distribusi Microbubble pada Variasi Debit Air 24 lpm



Gambar 4. 1 Grafik PDF (Probability density function) Distribusi Microbubble pada Variasi Debit Air 24 lpm dengan Debit Udara 0,1 - 0,8 lpm

Hasil PDF dengan nilai QG yang lebih rendah ($QG = 0,1, 0,2$ lpm), puncak kurva berpusat di sekitar diameter yang lebih kecil ($100-200 \mu\text{m}$), yang menunjukkan bahwa *bubble* yang lebih kecil lebih mungkin terjadi pada laju aliran tersebut. Saat QG meningkat ($QG = 0,3$ lpm), puncak kurva bergeser ke diameter yang lebih besar (sekitar $350 \mu\text{m}$), yang berarti *bubble* yang lebih besar lebih mungkin terjadi. Pada nilai QG yang lebih tinggi ($QG = 0,4$ lpm dan di atasnya), puncak kurva semakin menurun, yang berarti bahwa ukuran gelembung berukuran 350 mikro ke atas semakin sedikit ditemukan. Bentuk grafik yang berbeda yang disajikan pada variasi ($QG = 0,3$ lpm) lebih disebabkan karena pada kondisi tersebut tumbukan antar gelembung sangat besar sehingga terjadi gelembung yang saling menempel dan menyebabkan penangkapan *image processing* menginterpretasikan gelembung yang besar.

B. Grafik PDF (Probability density function) Distribusi Microbubble pada Variasi Debit Air 32 lpm

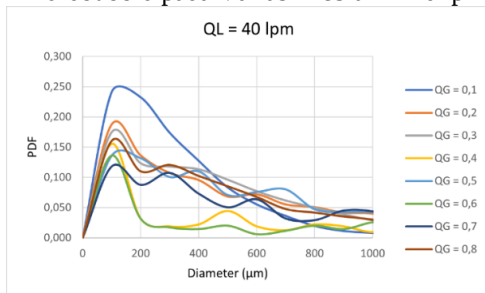


Gambar 4. 2 Grafik PDF (Probability density function) Distribusi Microbubble pada Variasi Debit Air 32 lpm dengan Debit Udara 0,1 - 0,8 lpm

Semua kurva menunjukkan puncak dominan sekitar $100 \mu\text{m}$, yang menunjukkan konsentrasi *bubble* yang tinggi dengan diameter ini di semua laju aliran gas (QG).

Efek Peningkatan QG (QG = 0,1 lpm) Kurva biru memiliki puncak tertinggi sekitar 100 μm . Saat QG meningkat, tinggi puncak kurva menurun dan distribusi melebar. Hal ini menunjukkan bahwa laju aliran gas yang lebih tinggi menghasilkan rentang ukuran *bubble* yang lebih luas, yang menunjukkan lebih banyak turbulensi atau pencampuran dalam sistem. Pada nilai QG yang lebih tinggi (QG = 0,7, 0,8), puncak kurva terjadi peningkatan *probabilitas* pada ukuran diameter 100 μm , karena semakin tinggi nilai QG, semakin besar diameter ukuran *bubble* yang di hasilkan tetapi pada grafik menunjukkan pada nilai (QG = 0,7, 0,8) terjadi kenaikan *probabilitas* pada ukuran diameter 100 μm sehingga kurva pada (QG = 0,7, 0,8) terjadi error dalam memvalidasi *bubble*.

C. Grafik PDF (*Probability density function*) Distribusi Microbubble pada Variasi Debit Air 40 lpm



Gambar 4. 3 Grafik PDF (*Probability density function*) Distribusi Microbubble pada Variasi Debit Air 40 lpm dengan Debit Udara 0,1 – 0,8 lpm

Pada QG yang lebih rendah (QG = 0,1), grafik menunjukkan puncak kurva yang tinggi di diameter yang lebih kecil (sekitar 100-200 μm). Ini mungkin menunjukkan bahwa *bubble* yang lebih kecil lebih dominan ketika laju aliran gas rendah.

Saat QG meningkat, puncak PDF cenderung menjadi lebih rendah dan lebih lebar, dan mungkin bergeser ke ukuran *bubble* yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa pada laju aliran gas yang lebih tinggi, distribusi ukuran *bubble* lebih merata dan mencakup *bubble* yang lebih besar. Pada nilai QG yang lebih tinggi (QG = 0,8), puncak kurva kurang jelas, karena semakin tinggi nilai QG, semakin besar diameter ukuran *bubble* yang di hasilkan tetapi pada grafik menunjukkan pada nilai (QG = 0,8) terjadi kenaikan *probabilitas* pada ukuran diameter 100 μm , sehingga kurva pada (QG = 0,8) terjadi error dalam memvalidasi *bubble*.

4.2 Pembahasan

Dari hasil yang disampaikan, berikut adalah analisis dan pembahasan dari tiga grafik PDF (*Probability Density Function*) yang menggambarkan distribusi diameter *microbubble* pada debit air 24, 32, dan 40 lpm dan variasi debit udara 0,1 - 0,8 lpm:

A. PDF Distribusi Microbubble pada Debit Air 24 lpm

1. QG (0,1 - 0,2 lpm) : Pada debit air 24 lpm dan QG yang rendah, puncak kurva PDF terletak di sekitar diameter *bubble* yang kecil, yaitu 100-200 μm . Hal ini menunjukkan bahwa laju aliran gas yang rendah menghasilkan lebih banyak *microbubble* dengan ukuran yang kecil.
2. QG (0,3 lpm) : Ketika QG meningkat menjadi 0,3, puncak kurva bergeser ke diameter yang lebih besar

(sekitar 350 μm). Ini menunjukkan bahwa dengan peningkatan QG, probabilitas terbentuknya *bubble* yang lebih besar juga meningkat.

3. QG (0,4 lpm dan di atasnya): Pada QG yang lebih tinggi, puncak kurva tidak lagi jelas, dan distribusi menjadi lebih tersebar. Hal ini menandakan adanya kesulitan dalam memvalidasi ukuran *bubble* pada QG tinggi, kemungkinan karena kualitas kamera atau proses perekaman gambar.

Sehingga pada debit air 24 lpm, distribusi diameter *bubble* pada QG rendah cenderung berpusat pada ukuran yang kecil, namun dengan meningkatnya QG, distribusi bergeser ke ukuran *bubble* yang lebih besar, meskipun validasi *bubble* menjadi sulit pada QG yang tinggi.

B. PDF Distribusi Microbubble pada Debit Air 32 lpm

1. QL (32 lpm) : Semua kurva PDF menunjukkan puncak dominan sekitar 100 μm , menunjukkan bahwa ukuran *bubble* ini paling banyak terjadi di seluruh variasi QG.
2. Efek Peningkatan QG : Seiring dengan peningkatan QG, tinggi puncak kurva menurun, dan distribusi menjadi lebih lebar, menunjukkan rentang ukuran *bubble* yang lebih luas. Hal ini mengindikasikan bahwa laju aliran gas yang lebih tinggi menciptakan turbulensi yang lebih besar, menghasilkan ukuran *bubble* yang lebih bervariasi.
3. QG (0,7 - 0,8 lpm) : Grafik menunjukkan penyimpangan di mana probabilitas *bubble* dengan diameter 100 μm kembali meningkat, bertentangan dengan kecenderungan distribusi yang lebih merata pada QG yang lebih rendah. Hal ini mungkin mengindikasikan kesalahan dalam validasi *bubble* pada debit udara yang tinggi.

Sehingga pada debit air 32 lpm, ukuran *bubble* kecil (100 μm) mendominasi distribusi di seluruh variasi QG, namun peningkatan QG menyebabkan penyebaran distribusi yang lebih lebar. Pada QG yang sangat tinggi, terjadi penyimpangan dalam validasi *bubble*.

C. PDF Distribusi Microbubble pada Debit Air 40 lpm

1. QG (0,1 lpm) : Grafik menunjukkan puncak kurva pada diameter *bubble* yang kecil (sekitar 100-200 μm). Ini menandakan dominasi ukuran *bubble* kecil ketika laju aliran gas rendah.
2. Efek Peningkatan QG : Dengan meningkatnya QG, puncak kurva menjadi lebih rendah dan lebih lebar, mengindikasikan distribusi ukuran *bubble* yang lebih merata dan mencakup ukuran yang lebih besar.
3. QG (0,8 lpm) : Pada QG yang tinggi, grafik kembali menunjukkan penyimpangan di mana probabilitas *bubble* dengan diameter 100 μm meningkat secara tidak terduga. Hal ini menunjukkan bahwa pada QG yang tinggi, terdapat kesulitan dalam memvalidasi *bubble* yang dihasilkan, mungkin karena gangguan pada sistem pencatatan atau faktor fisik lainnya yang mempengaruhi distribusi.

Sehingga pada debit air 40 lpm, distribusi diameter *bubble* cenderung lebih merata pada QG yang lebih tinggi, tetapi pada QG yang sangat tinggi, validasi *bubble* menjadi sulit, menyebabkan kesalahan dalam grafik.

5. Simpulan

Ukuran *Bubble* pada debit air rendah (24 lpm) cenderung menghasilkan *bubble* yang lebih kecil pada QG rendah, sementara debit air yang lebih tinggi (32 lpm dan 40 lpm) cenderung menghasilkan distribusi ukuran *bubble* yang lebih merata dan lebih bervariasi seiring peningkatan QG. Pada QG yang sangat tinggi, kesulitan dalam memvalidasi *bubble* mulai muncul, hal ini terlihat dari penyimpangan pada distribusi PDF yang tidak konsisten dengan pola sebelumnya. Hal ini disebabkan faktor teknis seperti kualitas pencatatan atau pengaruh fisik yang memengaruhi hasil distribusi. Sedangkan pada peningkatan QG cenderung meningkatkan turbulensi dalam sistem, yang pada gilirannya memperluas distribusi ukuran *bubble*. Namun, pada tingkat QG yang sangat tinggi, gangguan ini mungkin menjadi terlalu besar sehingga mengganggu keakuratan validasi.

Daftar Pustaka

- Hwang, J. H., & Zheng, Y. (2017). "Microbubble and ultrasound imaging for biomedical applications." *Medical Image Analysis*, 36, 19-36. DOI: [10.1016/j.media.2016.12.002].
- Zhang, H., & Zhang, J. (2019). "A review of microbubble measurement methods and techniques." *Journal of Microfluidics and Nanofluidics*, 23(4), 437-453. DOI: [10.1007/s10404-019-2291-0].
- Lee, W., & Lee, D. (2021). "Automated bubble size measurement using digital image processing techniques." *Applied Surface Science*, 535, 146708. DOI: [10.1016/j.apsusc.2020.146708].
- Batubara, Y., & Mawarni, D. I. (2022). Karakterisasi *Bubble* yang Dihasilkan *Microbubble Generator* Tipe Aliran *Swirl* dengan Metode *Image Processing*. *Prosiding Industrial Research* <https://jurnal.polban.ac.id/ojs-3.1.2/proceeding/article/view/4182>
- Mawarni, D. I., Indarto, I., Deendarlianto, D., & ... (2022). Pengaruh Jarak Nosel Udara dengan *Outlet* Terhadap Dis-Tribusi Ukuran *Bubble* Yang Dihasilkan Oleh Mbg Tipe *Swirl*. *Jurnal Rekayasa* <https://rekayasamesin.ub.ac.id/index.php/rm/article/view/977>
- Mawarni, D. I., Indarto, I., Deendarlianto, D., & ... (2023). Digital *Image Processing* Untuk Menentukan Distribusi Ukuran Diameter Gelembung Udara Pada *Micro* gelembung Generator. *Journal of Information* <https://jurnal.amikom.ac.id/index.php/joism/article/view/977>
- Mawarni, D. I., & Korawan, A. D. (2019). Pengaruh Debit Fluida Air terhadap Distribusi Diameter *Bubble* pada *Microbubble Generator* Tipe *Orifice-Porous Tube*. *SIMETRIS*. <https://www.sttrcepu.ac.id/jurnal/index.php/simetris/article/view/78>
- Sadatomi, M., Kawahara, A., Matsuura, H., & Shikatani, S. (2012). *Micro-bubble* 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. <https://doi.org/10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2012.03.002>
- Yulianto, M. D. (2019). Aliran *Swirl* Dan Wire Mesh 100 Terhadap Karakteristik Distribusi *Bubble* Serta Unjuk Kerja *Microbubble Generator* Tipe *Orifice*. 12 [etd.repository.ugm.ac.id](https://etd.repository.ugm.ac.id/etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/175533)
- Rao, A. G., Sulaeman, E., & Bougrine, H. (2017). *Swirl and Vortex Flows in Combustion and Aerodynamics*. *Energy Procedia*, 120, 31-38.
- Valera-Medina, A., Syred, N., & Bowen, P. (2018). *Swirl Flows in Combustion: A Review*. *Progress in Energy and Combustion Science*, 61, 115-142.
- Xu, L., Zhang, C., & Chen, H. (2020). *Experimental Study on Swirling Flow Characteristics in a Gas-Liquid Swirl Separator*. *Journal of Fluid Mechanics*, 884, 1-29.
- Zhang, Y., Zhao, J., & Zhou, X. (2021). *Swirl Flow-Induced Cavitation in Microbubble Generation: Mechanisms and Applications*. *Chemical Engineering Journal*, 412, 128623.
- Saini, A., Kumar, V., & Singh, R. (2018). *Effect of Swirl on Combustion Stability and Emission Characteristics in Swirl Burners: A Review*. *Energy Conversion and Management*, 172, 187-204.
- Wang, Z., & Liu, S. (2019). *Effect of Nozzle Geometries on Swirl Flow Characteristics in Two-Phase Flow Systems*. *International Journal of Multiphase Flow*, 113, 138-147.