



## Pengembangan Karakterisasi Gelembung Mikro Menggunakan Metode PIV beserta Pemantauan dengan IOT

Taufik Ibnu Salim<sup>1</sup>, Endang Juliastuti<sup>2</sup>, Vebi Nadhira<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Badan Riset dan Inovasi Nasional

<sup>2,3</sup>Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung

<sup>1</sup>taufik11098@gmail.com

### Abstract

The development of microbubble technology has been widely used in various fields. One of these areas is sterilization technology using microbubbles to speed up and increase the effectiveness of the sterilization process. One example is room sterilization using vaporized ozone gas microbubbles which can minimize the spread of the Covid-19 virus. However, research and development of microbubbles are still not much related to the characterization of their size and hydrodynamic properties. In this study, we propose the development of a continuous characterization of the size of microbubbles using the image analysis method. Image analysis aims to find the displacement vector using particle image velocimetry (PIV) techniques. The Hadamard-Rybczynski equation was used to calculate the size of the microbubbles based on the rising velocity vector of the microbubbles. The image capture process uses an LED light shadow technique to get a brighter and more stable image. The template matching algorithm is used to speed up the displacement vector analysis process used in the PIV technique. The analysis process is carried out in-situ in parallel processing using the python program on the raspberry pi4 unit. The analysis process uses three program services that run parallel, namely recording, pre-processing, and processing services. The measurement process uses three validations, namely pixel validation, template matching algorithm validation, and interrogation window. Bubble size data is displayed in the form of real-time graphs and size distribution histograms online using IoT. The test results show the size distribution of the microbubbles produced has an average of 14.60  $\mu\text{m}$  with a deviation value of 0.11  $\mu\text{m}$ .

Keywords: PIV, shading techniques, template matching, microbubble size.

### Abstrak

Perkembangan teknologi gelembung mikro telah banyak dimanfaatkan di berbagai bidang. Salah satu bidang tersebut adalah teknologi sterilisasi menggunakan gelembung mikro untuk mempercepat dan meningkatkan efektifitas proses sterilisasi. Salah satu contohnya adalah sterilisasi ruangan menggunakan gelembung mikro gas ozon yang diuapkan yang dapat meminimalisir penyebaran virus Covid19. Akan tetapi penelitian dan pengembangan gelembung mikro masih belum banyak terkait karakterisasi ukuran dan sifat hidrodinamisnya. Dalam penelitian ini mengusulkan pengembangan karakterisasi ukuran gelembung mikro secara kontinyu menggunakan metode analisa citra. Analisa citra bertujuan untuk mencari vektor perpindahan menggunakan teknik *particle image velocimetry* (PIV). Persamaan Hadamard-Rybczynski digunakan untuk menghitung ukuran gelembung mikro berdasarkan vektor kecepatan naik gelembung mikro. Proses pengambilan citra menggunakan mekanisme teknik bayangan cahaya LED agar mendapatkan citra yang lebih terang dan stabil. Algoritma pencocokan *template* digunakan untuk mempercepat proses analisa vektor perpindahan yang digunakan dalam teknik PIV. Proses analisa dilakukan in-situ secara paralel menggunakan program python pada unit pengolah raspberry pi4. Proses analisa menggunakan 3 layanan program yang berjalan secara paralel yaitu layanan perekam, pra-pengolah dan pengolah. Proses pengukuran menggunakan 3 validasi yaitu validasi piksel, validasi algoritma pencocokan template dan validasi jendela interogasi. Data ukuran gelembung ditampilkan dalam bentuk grafik realtime dan histogram distribusi ukuran secara daring menggunakan IoT. Hasil pengujian menunjukkan distribusi ukuran gelembung mikro yang dihasilkan memiliki rata-rata 14.60  $\mu\text{m}$  dengan nilai deviasi sebesar 0.11  $\mu\text{m}$ .

Kata kunci : PIV, teknik bayangan, pencocokan *template*, ukuran gelembung mikro.

### 1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi gelembung mikro di Indonesia sudah diaplikasikan dalam banyak bidang [1,2]. Salah

satu bidang yang sudah banyak menerapkan teknologi gelembung mikro adalah bidang budidaya perikanan [3,4,5]. Namun beberapa bidang lainnya belum memanfaatkan teknologi ini secara efektif. Salah satu

bidang tersebut adalah bidang sterilisasi yang belum banyak menerapkan teknologi gelembung mikro [6,7,8]. Gelembung mikro berperan penting dalam hal efisiensi penggunaan bahan sterilisasi. Gelembung mikro adalah gelembung yang memiliki ukuran dalam orde mikro meter [9]. Gelembung ini memiliki kelebihan diantaranya dapat bertahan lebih lama di dalam air dan memiliki konsentrasi udara yang lebih tinggi dari pada gelembung makro [3]. Dengan ketahanan lebih lama di dalam air maka proses sterilisasi menjadi lebih efisien. Ukuran gelembung yang lebih kecil dapat meningkatkan kapasitas produksi gas terlarut persatu meter persegi sehingga konsentrasi kadar gas lebih tinggi.

Salah satu penerapan teknologi gelembung mikro di bidang sterilisasi adalah pada alat airborne terminator [10]. Alat ini berfungsi untuk disinfektan virus covid19 menggunakan gas terlarut berupa gas Ozon ( $O_3$ ) [11]. Penggunaan gelembung mikro pada sistem sterilisasi ini berfungsi meningkatkan efisiensi dan konsentrasi penggunaan gas ozon. Gas ozon memiliki kelebihan dalam hal tidak adanya residu pada kulit manusia. Hal ini berbeda dengan disinfektan konvensional yang menggunakan bahan kimia sehingga meninggalkan residu pada kulit manusia. Akan tetapi disinfektan menggunakan gelembung mikro ozon memiliki beberapa kekurangan. Penggunaan gas ozon ataupun generator ozon membuat harga proses sterilisasi ini lebih mahal dibandingkan disinfektan konvensional. Selain itu proses validasi dan verifikasi ukuran gelembung mikro belum sepenuhnya dilakukan terhadap setiap Penghasil Gelembung Mikro (PGM) yang telah dibuat. Dalam penelitian ini berfokus pada proses validasi dan verifikasi ukuran gelembung mikro.

Perkembangan penelitian dan pengembangan terkait PGM di Indonesia telah cukup banyak dilakukan [12,13]. Akan tetapi produksi PGM ini mengalami kendala dalam hal karakteristik distribusi ukuran gelembung mikro yang dihasilkan [14]. Proses produksi yang masih manual membuat kualitas setiap PGM tidak sama. Hal ini berakibat gelembung mikro yang dihasilkan belum memiliki data karakteristik ukuran gelembung mikro yang sama untuk setiap PGM yang baru selesai diproduksi. Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan melakukan pengembangan metode karakteristik ukuran gelembung mikro [15]. Sehingga setiap PGM yang selesai diproduksi dapat memiliki data karakteristik masing-masing.

Proses karakteristik ukuran gelembung mikro yang tersedia sebelumnya masih membutuhkan waktu yang cukup lama dan dilakukan secara manual [15,16]. Akan tetapi mulai tahun 2018 sudah ada penelitian yang menggunakan sistem semi otomatis [17,18,19]. Teknik pengukuran dapat dilakukan secara langsung akan tetapi teknik ini membutuhkan kamera dan peralatan yang cukup mahal seperti kamera dengan kecepatan rekam dan resolusi yang tinggi [19,20]. Sedangkan teknik

pengukuran secara tak langsung membutuhkan media uji yang lebih kompleks [15,18]. Teknik ini juga membutuhkan waktu pengolahan data yang lebih lama [15,18,19].

Untuk itu dalam penelitian ini mengajukan sistem analisa secara insitu dan otomatis serta waktu pengolahan secara paralel untuk mempercepat waktu analisa. Penelitian ini juga bertujuan meningkatkan keakuratan pengukuran dengan meningkatkan resolusi pengukuran. Pengolahan analisa citra secara paralel digunakan untuk mengolah data hasil pengukuran teknik secara tidak langsung untuk mempersingkat durasi pengolahan data.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini mengajukan sistem analisa secara tak langsung menggunakan kamera digital mikroskop standar yang diproses secara paralel dengan unit pengolah dengan daya rendah seperti Raspberry Pi4. Penelitian ini juga bertujuan meningkatkan keakuratan pengukuran dengan menggunakan lampu LED sebagai sumber cahaya agar citra yang diperoleh stabil. Sementara itu metode pengolahan sistem analisa dirancang agar sistem yang dibuat secara paralel memenuhi tujuan penelitian yaitu analisa ukuran gelembung secara berkelanjutan dan waktu nyata.

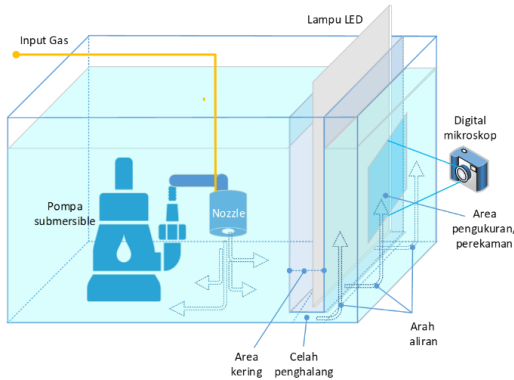
### 2.1. Perancangan media analisa

Perancangan media analisa terlihat seperti pada Gambar 1. Metode yang dipakai dalam penelitian ini adalah metode metode PIV. Pada umumnya metode *particle image velocimetry* (PIV) menggunakan teknik refleksi sinar laser akan tetapi pada penelitian ini menggunakan teknik bayangan lampu led untuk menghitung perpindahan vektor [20]. Pemilihan teknik tersebut disebabkan karena teknik refleksi sinar laser memiliki kelemahan yaitu membutuhkan kamera dengan kualitas bagus seperti fitur low light. Hal tersebut disebabkan objek yang di tangkap kamera adalah refleksi sinar laser oleh gelembung mikro yang memiliki intensitas cahaya sangat rendah [15,18].

Pada penelitian ini memilih menggunakan teknik bayangan daripada teknik refleksi laser yang dipakai pada penelitian sebelumnya [15,18]. Kelebihan teknik bayangan adalah lebih stabil ketika konsentrasi gelembung semakin sedikit [19]. Hal sebaliknya terjadi ketika memakai refleksi sinar laser, semakin sedikit refleksi sinar laser maka akan semakin banyak distorsi. Sehingga apabila kualitas kamera kurang bagus maka distorsi kamera lebih dominan daripada refleksi gelembung mikro oleh sinar laser [15,18].

Akan tetapi penggunaan teknik bayangan memerlukan tempat didalam media untuk meletakkan lampu led. Hal ini dapat dikombinasikan dengan membuat kotak penghalang. Desain kotak penghalang dapat digunakan

untuk beberapa kebutuhan seperti menurunkan kecepatan gelembung, penyaring gelembung berukuran besar, dan mengurangi aliran turbulente. Celah penghalang yang digunakan sebagai penyaring gelembung memiliki tinggi 2 cm agar terbentuk aliran laminer dengan lebar yang sama dengan daerah pengamatan mikro [21]. Detail skema media dan peralatan dapat dilihat pada Gambar 1.

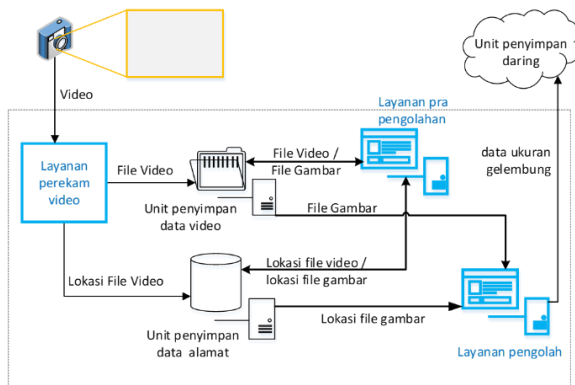


Gambar 1. Rancangan Media Analisa

## 2.2. Perancangan sistem analisa ukuran gelembung

Perancangan sistem analisa ukuran gelembung dimulai dari perancangan sistem pengolah paralel kemudian perancangan algoritma analisa ukuran gelembung. Sistem pengolah paralel dimulai dari akuisisi video dari kamera hingga pemantauan distribusi ukuran gelembung jarak jauh. Sedangkan algoritma analisa ukuran gelembung berupa teknik perhitungan vektor perpindahan menggunakan metode PIV dan pencocokan template.

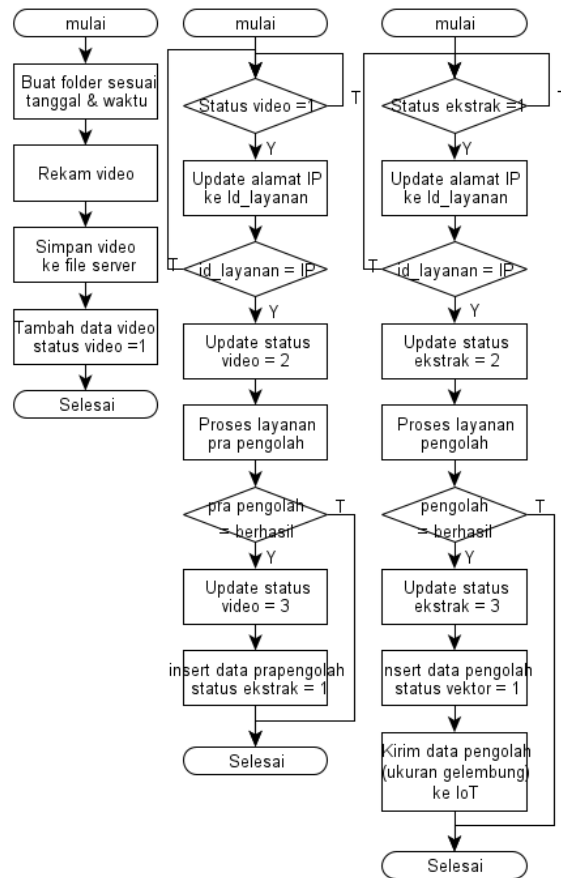
Perancangan sistem pengolah paralel berfungsi menganalisa distribusi ukuran gelembung secara paralel agar durasi pengolahan menjadi lebih pendek. Lamanya durasi pengolahan menjadi masalah utama dalam proses analisa. Untuk itu diperlukan metode baru agar proses analisa menjadi lebih cepat. Salah satu caranya adalah merubah pengolahan secara sekuensial menjadi paralel seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Rancangan skema analisa secara paralel

Sistem pengolahan dilakukan secara paralel dengan membagi menjadi beberapa layanan sesuai fungsinya

agar dapat berjalan secara bersamaan. Proses analisa ini terdiri dari tiga bagian layanan yaitu layanan perekaman, layanan pra pengolah dan layanan pengolah. Ketiga layanan tersebut dibuat bagan alur seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Bagan alur layana paralel, a) layanan perekam, b) layanan pra pengolah, c) layanan analisa

Layanan perekam bertugas membuat folder sesuai tanggal dan waktu di file server. Layanan ini kemudian merekam video di area pengamatan secara berkelanjutan setiap 30 detik. Untuk selanjutnya layanan perekam menyimpan file video ke folder di unit penyimpanan. Layanan perekam kemudian menyimpan alamat penyimpanan tersebut ke basis data beserta dengan data berupa status video sudah siap di proses.

Layanan pra pengolah bertugas mengekstrak video ke dalam bentuk bingkai yang tersimpan di basis data yang memiliki status video siap diproses. Layanan pra pengolah menambahkan identitas berupa alamat IP dan id layanan. Id layanan merupakan nomor identitas untuk setiap layanan paralel. Fungsi Id layanan adalah menghindari file video terproses oleh beberapa layanan yang berbeda. Setelah selesai maka menyimpan data hasil ekstraksi ke file server dan menambahkan data di bagian basis data.

Layanan pengolah bertujuan mengolah deretan bingkai hasil ekstraksi layanan pra pengolah untuk kemudian di

proses menjadi data ukuran gelembung. Layanan ini mengambil dua gambar secara berurutan untuk dianalisa perpindahan vektor di setiap jendela pengawasan. Data vektor kemudian di konversi menjadi ukuran gelembung menggunakan persamaan Hadamard-Rybczynski atau disingkat persamaan H-R seperti pada rumus 1 dengan memasukkan nilai konversi piksel ke meter [22, 23]. Data hasil pengolahan ukuran gelembung kemudian di simpan ke basis data dan ke awan atau *Cloud*. Penyimpanan di awan menggunakan basis data Mongoddb untuk menyimpan data permanent seperti data rata-rata radius gelembung serta untuk menyimpan data sementara seperti data aktual ukuran gelembung beserta distribusinya dalam bentuk histogram.

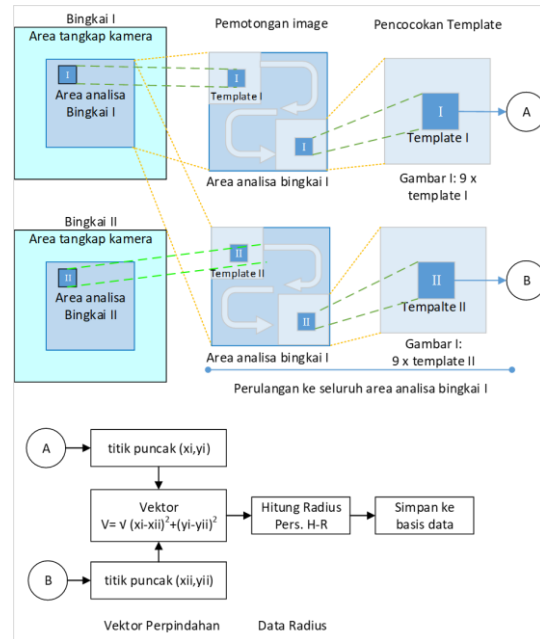
$$R = \sqrt{\frac{3\mu_f(2\mu_f - 3\mu_g) \Delta x}{(\rho_g - \rho_f)(\mu_f - \mu_g) \Delta t}} \quad (1)$$

Dimana R adalah Jari- jari gelembung (m),  $\rho_b$  adalah densitas gelembung (kg/m<sup>3</sup>),  $\rho_f$  adalah densitas fluida (kg/m<sup>3</sup>),  $\mu_f$  adalah viskositas fluida (Ns/m<sup>2</sup>),  $\mu_b$  adalah viskositas gelembung (Ns/m<sup>2</sup>),  $g$  adalah percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>),  $\Delta x$  adalah perpindahan gelembung (m),  $\Delta t$  adalah Selang waktu perpindahan gelembung (s).

Algoritma layanan pengolah yang berfungsi untuk analisa ukuran gelembung dilakukan di unit pengolah dapat dirancang seperti pada Gambar 4. Pada unit ini bingkai video yang berurutan dilakukan pemotongan sesuai area analisa. Langkah selanjutnya adalah melakukan pencuplikan mulai dari kiri atas sampai kanan bawah area analisa sebesar ukuran jendela interogasi. Area pencuplikan ini dilakukan pada area yang sama pada bingkai yang pasangannya untuk kemudian dilakukan pencocokan *template*. Pencocokan *template* yang dipakai dalam penelitian ini adalah mode *sadiff* pada kepastakaan *Open cv* seperti pada rumus 2. Hasil pencocokan *template* menunjukkan titik pusat pada area jendela interogasi. Perbandingan titik pusat antar bingkai yang berurutan menunjukkan pergerakan vektor. Data vektor inilah yang dihitung untuk menggunakan persamaan H-R menjadi ukuran gelembung.

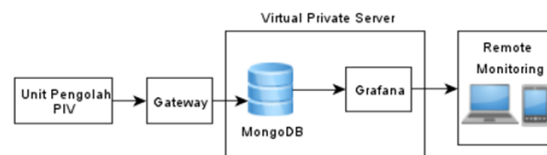
$$R(x,y) = \sum x',y'((T(x',y') - I(x+x',y+y')) \cdot M(x',y')) \quad (2)$$

Tidak semua jendela interogasi memiliki data vektor dan tidak semua data vektor di konversi menjadi data jari-jari gelembung. Ketika besar vektor adalah nol atau nilai delta posisi y adalah minus maka data akan diabaikan dan tidak dikonversi menjadi data jari-jari gelembung. Data yang di proses menjadi data ukuran gelembung adalah data yang memiliki besar vektor positif dan nilai delta y juga positif. Delta posisi y bernilai minus menunjukkan pergerakan ke bawah. Dikarenakan gelembung mikro cenderung naik ke permukaan maka hal ini menunjukkan pergerakan partikel, sehingga dapat diabaikan dalam perhitungan.



Gambar 4. Skema pencocokan *template*

Perancangan sistem pemantauan dilakukan menggunakan website yang tersimpan pada virtual private server (VPS). Pemantauan melalui website memakai Grafana dan Thingsboard sebagai dashboard. Data yang masuk berupa data ukuran gelembung dari unit pengolah PIV. Unit pengolah PIV menyimpan data ke basis data Mongoddb kemudian ditampilkan di Grafana. Grafana memiliki keunggulan dalam hal konektivitas notifikasi ke aplikasi telegram. Sehingga sangat membantu untuk mendapatkan notifikasi tanpa perlu menginstal aplikasi tambahan di android. Gambar 5 adalah skema pemantauan melalui IoT.

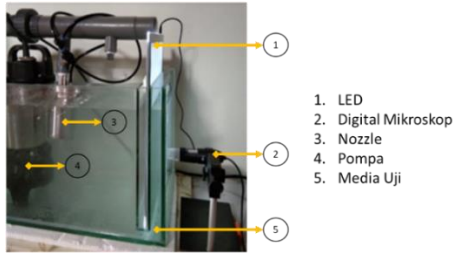


Gambar 5. Skema pemantauan dengan IoT

### 3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian dilakukan seperti pada gambar 6. Area pengujian berada diantara lampu LED dan kamera digital mikroskop. Layanan perekam dilakukan setelah pompa PGM dimatikan. Layanan pra pengolah dan pengolah secara otomatis akan mulai ketika ada data masukan yang telah selesai di proses. Proses karakterisasi gelembung mikro dalam penelitian ini dipengaruhi oleh validasi pengukuran piksel ke satuan meter, validasi algoritma pencocokan *template* dan validasi ukuran jendela interogasi. Ukuran piksel ke meter dan validasi algoritma pencocokan *template* berpengaruh terhadap perhitungan di persamaan H-R sedangkan ukuran jendela interogasi berpengaruh terhadap durasi pengolahan algoritma pencocokan

template. Ketiga parameter tersebut perlu diketahui sebelum dilakukan proses pengukuran gelembung mikro.

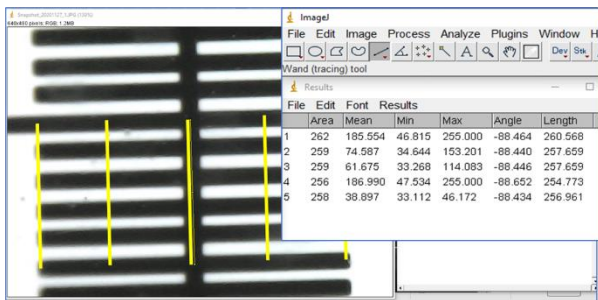


Gambar 6. Skema pemantauan dengan IoT

### 3.1. Validasi piksel.

Pengukuran gelembung mikro menggunakan persamaan H-R sangat bergantung pada konversi piksel ke mikro meter dan validasi pengukuran vektor. Pengukuran konversi piksel ke mikrometer digunakan untuk perhitungan jarak perpindahan gelembung mikro antar bingkai dalam satuan mikrometer. Sedangkan validasi pengukuran vektor digunakan untuk memvalidasi program analisa persamaan H-R terhadap besaran vektor yang sudah diketahui besar perpindahannya.

Pengukuran piksel dalam satuan mikrometer dilakukan sebanyak lima kali. Pengukuran dilakukan pada titik ukur di area pengukuran terhadap penggaris mikrometer standar. Pengukuran dilakukan menggunakan analisa citra dengan bantuan perangkat lunak ImageJ [24]. Gambar 7 adalah cara pengukuran satu piksel terhadap acuan standar penggaris mikrometer. Tabel 1 adalah Hasil pengukuran satu piksel dalam mikrometer.



Gambar 7. Pengukuran satuan piksel dalam mikrometer

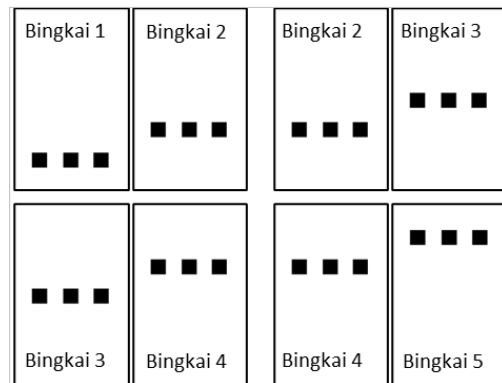
Tabel 1. Hasil pengukuran piksel dalam mikrometer

No	Panjang d bingkai (piksel)	Panjang Standar (µm)	Konversi (µm /piksel)	Rata-rata (µm /piksel)	2sigma (95% data)
1	260.568	500	1.919		
2	257.659	500	1.941		
3	257.659	500	1.941	1.942	-0.032
4	256.773	500	1.963		
5	256.961	500	1.946		

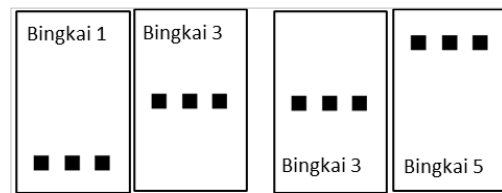
### 3.2. Validasi algoritma pencocokan template.

Algoritma pencocokan template digunakan untuk mencari besar vektor perpindahan. Algoritma ini diuji dengan membandingkan perpindahan tiga buah titik

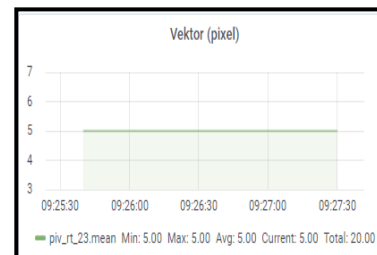
yang sudah diketahui jarak perpindahannya. Pengujian pertama yang dilakukan adalah memvalidasi besarnya vektor menggunakan lima buah bingkai yang memiliki tiga buah titik yang mengalami perubahan posisi vertikal sebesar 5 pixel untuk setiap bingkainya. Pengukuran dengan interval tiap bingkai seperti pada Gambar 8 untuk membuktikan pergeseran vektor sebesar 5 piksel. Pengukuran dengan interval dua bingkai dilakukan untuk membuktikan pergeseran vektor sebesar 10 piksel seperti pada Gambar 9. Gambar 10 dan 11 menunjukkan hasil perhitungan vektor oleh sistem sebesar 5 dan 10 piksel. Sehingga algoritma sudah terbukti akurat dalam pengukuran vektor.



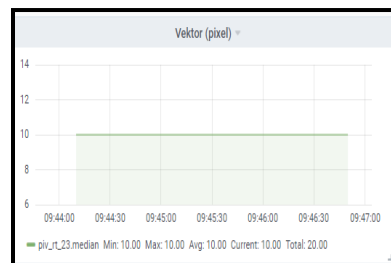
Gambar 8. Pasangan bingkai dengan perpindahan sebesar 5 piksel



Gambar 9. Pasangan bingkai dengan perpindahan sebesar 10 pixel



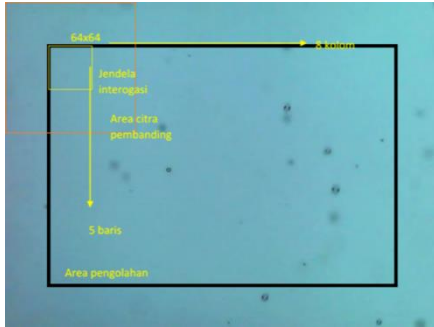
Gambar 10. Hasil validasi pengukuran sebesar 5 piksel



Gambar 11. Hasil validasi pengukuran sebesar 10 piksel

### 3.3. Validasi Jendela Interogasi

Jendela interogasi dapat di visualisasikan seperti pada gambar 12. Luas area bingkai 640\*480 piksel dengan konversi tiap piksel 1.942 mm adalah 1,244 mm x 0,933 mm atau 1,16 mm<sup>2</sup>. Ukuran jendela interogasi adalah 64x64 piksel atau sekitar 124 x 124 μm<sup>2</sup>. Ada 8 kolom dan 5 baris jendela interogasi sehingga total ada 40 buah jendela pengamatan. Tabel 2 adalah salah satu data analisa 10 bingkai secara berurutan



Gambar 12. Hasil validasi pengukuran vektor

Tabel 2. Data analisa 10 bingkai berurutan

Nc	Bingkai 1	Bingkai 2
1		
2		
3		
4		

Nc	Bingkai 1	Bingkai 2
5		
6		
7		
8		
9		

### 3.4. Pengukuran gelembung mikro

Pengukuran karakter PGM dilakukan dalam tiga kali percobaan dengan sepuluh video perekaman tiap percobaan. Data dianalisa menggunakan tiga jendela interogasi yaitu 16x16, 32x32, dan 64x64. Tabel 3 adalah hasil rata-rata ukuran gelembung. Penggunaan jendela interogasi 16x16 menghasilkan nilai rata-rata yang paling kecil. Akan tetapi nilai deviasi dan koefisien variasi yang paling kecil adalah pada jendela interogasi 64x64. Perbedaan ukuran terbesar yaitu 2.96 μm. Hal ini tidak lebih dari 1,5 kali ukuran pixel.

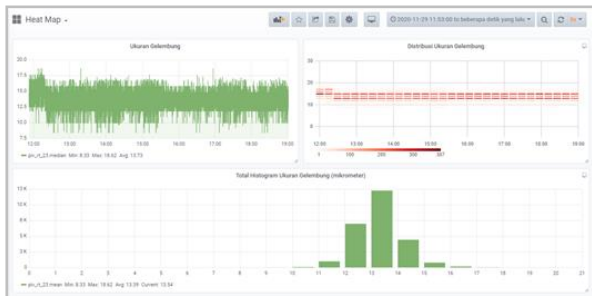
Tabel 3. Perbandingan jendela interogasi

No.	Rata-rata ukuran gelembung mikro (μm)		
	Jendela Interogasi		
	16x16	32x32	64x64
1	11.75	13.59	14.70
2	11.77	13.72	14.48
3	11.40	13.36	14.62
Rata-rata	11.64	13.56	14.60
Deviasi	0.21	0.18	0.11
Koef. Variasi	1.80 %	1.33 %	0.75 %

Mekanisme pelaporan ke IoT memakai basis data bertipe deret waktu (*Time Series Data Base*). Setiap data PIV dari sepasang bingkai yang dianalisa dikirim ke VPS dan disimpan pada basis data MongoDB. Untuk visualisasi data distribusi radius gelembung digunakan aplikasi Grafana. Visualisasi yang digunakan di Grafana adalah heatmap chart dan histogram seperti pada gambar 13. Hasil pemantauan keseluruhan adalah seperti pada Gambar 14.



Gambar 13. Pelaporan distribusi ukuran ke IoT



Gambar 14. Pelaporan distribusi ukuran ke IoT

#### 4. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah analisa pengukuran gelembung mikro dapat dijalankan secara paralel dan dilakukan secara insitu. Resolusi pengukuran yang diperoleh dalam penelitian ini adalah 1.94  $\mu\text{m}$ . Penggunaan 3 jendela interograsi menghasilkan ukuran yang tidak jauh berbeda yaitu kurang dari 3  $\mu\text{m}$  atau 1.5 kali ukuran piksel yang dapat dibaca. Jendela interograsi 64x64 pixel memiliki nilai deviasi terkecil yaitu 0.11  $\mu\text{m}$  dan nilai rata-rata ukuran gelembung mikro sebesar 14.60  $\mu\text{m}$ .

Penelitian ini masih memiliki banyak peluang untuk dilakukan pengembangan agar dapat menghasilkan distribusi ukuran gelembung lebih teramati dengan baik lagi. Beberapa saran yang diajukan pada penelitian selanjutnya adalah menggunakan kamera dengan resolusi yang tinggi serta dikombinasikan dengan lensa pembesaran >1000X. Perekaman video menggunakan setidaknya dua kamera digital mikroskop pada tingkat zoom yang berbeda untuk pengukuran rentang distribusi yang lebih lebar.

#### Daftar Rujukan

- [1] Warstek, 2020, "Teknologi Nano Bubble: Solusi Berkelanjutan Perikanan Indonesia", data diperoleh melalui situs internet: <https://warstek.com/nanobubble/>, Diunduh pada tanggal: 15 Maret 2021
- [2] Minapoli, 2019, "Microbubble Generator, Solusi Masalah Perikanan Budidaya" data diperoleh melalui situs internet: <https://www.minapoli.com/info/microbubble-generator-solusi-masalah-perikanan-budidaya>, Diunduh pada tanggal: 15 Maret 2021
- [3] Lim, Y. S., Ganesan, P., Varman, M., Hamad, F. A., & Krishnasamy, S. (2021). Effects of microbubble aeration on water quality and growth performance of *Litopenaeus vannamei* in biofloc system. *Aquacultural Engineering*, 93(August 2020), 102159. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102159>
- [4] Yun, S., Giri, S. S., Kim, H. J., Kim, S. G., Kim, S. W., Kang, J. W., ... Chang Park, S. (2019). Enhanced bath immersion vaccination through microbubble treatment in the cyprinid loach. *Fish and Shellfish Immunology*, 91(April), 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.05.021>
- [5] Salim, T. I., Haiyunnisa, T., & Alam, H. S. (2016). Design and Implementation of Water Quality Monitoring for Eel Fish Aquaculture. In 2016 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD) November 29-30, 2016 (pp. 208–213). <https://doi.org/10.1109/ISESD.2016.7886720>
- [6] Zhang, H., & Tikekar, R. V. (2021). Air microbubble assisted washing of fresh produce: Effect on microbial detachment and inactivation. *Postharvest Biology and Technology*, 181(July), 111687. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111687>
- [7] Khuntia, S.; Majumder, S.K.; Ghosh, P. 2012. Microbubble-aided water and wastewater purification: A review. *Rev. Chem. Eng.* 2012, 28, 191–221
- [8] A. Agarwal, W. J. Ng, and Y. Liu, "Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment," *Chemosphere*, vol. 84, no. 9, pp. 1175–1180, 2011
- [9] Xu, R., Wang, Y., & Li, Z. (2019). Exploration of particle technology in fine bubble characterization. *Particuology*, 46, 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2019.04.009>
- [10] Saptiyulda, E., 2020, "LPI: Ozone nanomist sterilkan kantor hingga makanan dari virus corona", data diperoleh melalui situs internet: <https://www.antaraneews.com/berita/1523500/lipi-ozone-nanomist-sterilkan-kantor-hingga-makanan-dari-virus-corona>, Diunduh pada tanggal: 15 Maret 2021
- [11] Sugiarto, A.T, Saepudin, D., Sutarman, U., 2021, "Alat Penghasil Uap Air Berozon", S00202009438, Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia Republik Indonesia Direktur Jenderal Kekayaan Intelektual.
- [12] Alam, H.S., Bahrudin, Sugiarto, A.T., Redhyka, G.G., (2017), Unsteady Numerical Simulation of Gas-Liquid Flow in Dual Chamber Microbubble Generator, 2017 2nd International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT)
- [13] Alam, H. S., Redhyka, G. G., Bahrudin, Sugiarto, A. T., Salim, T. I., & Mardhiya, I. R. (2018). Design and performance of swirl flow microbubble generator. *International Journal of Engineering*

- and Technology(UAE), 7(4), 66–69. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.40.24077>
- [14] Alam, H.S., Sugiarto, A.T., Bahrudin, B., Salim, T.I., Saepudin, D., 2020, Alat Penghasil Gelembung Mikro/Nano, IDP000071125, , Kementrian Hukum dan Hak Asasi Manusia Republik Indonesia Direktur Jenderal Kekayaan Intelektual
- [15] Redhyka, G. G., Bahrudin, & Alam, H. S. (2017). Estimation of bubble size distribution using spatial digital image correlation. Proceedings of the 2nd International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology, ICACOMIT 2017, 2018-January, 123–127. <https://doi.org/10.1109/ICACOMIT.2017.8253399>
- [16] Lee, C. H., Choi, H., Jerng, D. W., Kim, D. E., Wongwises, S., & Ahn, H. S. (2019). Experimental investigation of microbubble generation in the venturi nozzle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 136, 1127–1138. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.040>
- [17] Brasileiro, P. P. F., dos Santos, L. B., Chaprão, M. J., de Almeida, D. G., Soares da Silva, R. de C. F., Roque, B. A. C., ... Benachour, M. (2020). Construction of a microbubble generation and measurement unit for use in flotation systems. *Chemical Engineering Research and Design*, 153, 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.10.028>
- [18] Jeon, S. Y., Yoon, J. Y., & Jang, C. M. (2018). Bubble size and bubble concentration of a microbubble pump with respect to operating conditions. *Energies*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/en11071864>.
- [19] Juwana, W. E., Widyatama, A., Dinaryanto, O., Budhijanto, W., Indarto, & Deendarlianto. (2019). Hydrodynamic characteristics of the microbubble dissolution in liquid using orifice type microbubble generator. *Chemical Engineering Research and Design*. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.11.017>
- [20] Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S. T., and Kompenhans, J., (2007), *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*, 2nd ed. Heidelberg; New York: Springer, Sep. 2007
- [21] Salim, T.I., Alam, H.S., Sugiarto, A.T., “Metode dan Sistem untuk Mengukur Diameter Gelembung Udara di dalam Air,” P00202104673, Kementrian Hukum dan Hak Asasi Manusia Republik Indonesia Direktur Jenderal Kekayaan Intelektual.
- [22] Clift, R., Grace, J. R., and Weber, M. E., *Bubbles, Drops, and Particles*. Dover Publications, 2005. J. Westerweel, “Fundamentals of digital particle image velocimetry,” *Measurement Science and Technology*, vol. 8, pp. 1379–1392, Dec. 1997.
- [23] Parkinson, L., Sedev, R., Fornasiero, D., & Ralston, J. (2008). The terminal rise velocity of 10-100  $\mu\text{m}$  diameter bubbles in water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 322(1), 168–172. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.02.072>
- [24] Schindelin, J., Rueden, C. T., Hiner, M. C., and Eliceiri, K. W., “The ImageJ ecosystem: An open platform for biomedical image analysis,” *Molecular Reproduction and Development*, vol. 82, no. 7-8, pp. 518–529, Jul. 2015