

PENGUKURAN GELEMBUNG MIKRO MENGGUNAKAN ALGORITMA HOUGH CIRCLE TRANSFORM

Dinda Salsabiila Padmakirana¹, Yusnan Hasani Siregar^{2*}, Taufik Ibnu Salim³, Frida Agung Rakhmadi⁴
¹Program Studi Fisika-Fakultas Sains dan Teknologi-UIN Sunan Kalijaga, ²Pusat Riset Teknologi Tepat Guna-BRIN, ³Pusat Riset Mekatronika Cerdas-BRIN, ⁴Program Studi Fisika-Fakultas Sains dan Teknologi-UIN Sunan Kalijaga, *Pusat Riset Teknologi Tepat Guna-BRIN
e-mail: ¹17106020034@student.uin-suka.ac.id, ²yusnanhasan@gmail.com, ³tauf021@brin.go.id, ⁴frida.rakhmadi@uin-suka.ac.id

ABSTRACT

An analysis of the Hough transform algorithm as a microbubble measurement method with manual annotation and accuracy testing methods was conducted. Existing microbubble measurement methods are unable to measure bubble sizes smaller than 150 μm and have equipment that is not compact enough. The Hough transform algorithm may be a more optimized microbubble measurement method than the existing microbubble measurement methods. This research aims to apply and test the Hough circle transform algorithm as a microbubble measurement method. This research was conducted with 5 samples, each sample lasted 10 seconds. In this study, it can be concluded that the Hough Circle Transform algorithm, as a method for measuring microbubbles, is able to detect bubbles with sizes ranging from 0.11 to 0.36 μm , with an average size of 0.20 μm . The average accuracy across the five data samples is 98%.

Keywords: *hough circle transform, image processing, microbubble*

INTISARI

Telah dilakukan penelitian analisis algoritma hough circle transform sebagai metode pengukuran gelembung mikro dengan metode pengujian anotasi manual dan akurasi. Metode pengukuran gelembung mikro yang ada dirasa tidak mampu mengukur ukuran gelembung dibawah 150 μm , dan memiliki perlengkapan yang dirasa kurang ringkas. Algoritma hough circle transform memungkinkan untuk menjadi metode pengukuran gelembung mikro yang lebih optimal dari metode pengukuran mikro sebelumnya. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan dan menguji algoritma hough circle transform sebagai metode pengukuran gelembung mikro. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan 5 sampel dengan tiap sampel berdurasi 10 detik. Pada penelitian ini dapat disimpulkan, algoritma hough circle transform sebagai metode pengukuran gelembung mikro mampu mendeteksi gelembung dengan ukuran gelembung berkisar dari 0,11 hingga 0,36 μm , dengan rata-rata 0,20 μm . Nilai akurasi rata-rata dari kelima sampel data sebesar 98%.

Kata Kunci: gelembung mikro, hough circle transform, pengolahan citra

1. PENDAHULUAN

Air yang berkualitas merupakan salah satu kebutuhan dasar yang penting bagi manusia. Adapun ciri air yang berkualitas adalah tidak berwarna, tidak memiliki rasa, tidak berbau, dan memiliki kadar oksigen yang tinggi (Geetha et al., 2023; Revansyah et al., 2023). Semakin tinggi kadar oksigen terlarut (*dissolved oxygen*) dalam air, kualitas air juga akan semakin baik. Oksigen terlarut dalam air mampu membantu proses respirasi, degradasi bahan organik maupun anorganik, proses metabolisme dan pertukaran zat yang menghasilkan energi untuk membantu pertumbuhan dan perkembangbiakan (Utomo et al., 2021). Oksigen juga diperlukan oleh bakteri aerob untuk mengurai limbah pada air, sehingga membantu proses daur ulang air buatan secara perlahan. Selain itu, air dengan kadar oksigen tinggi dapat membantu kelangsungan makhluk hidup.

Untuk menjaga kualitas air terdapat proses daur ulang, baik secara alami melalui hujan maupun buatan. Proses daur ulang secara buatan dilakukan dengan cara menginjeksikan gelembung oksigen pada air. Oleh karena itu proses injeksi oksigen dibutuhkan untuk meningkatkan kadar oksigen terlarut dalam air. Salah satu alat injektor yang pernah dikembangkan adalah LIPI Ultrafine Bubble Generator atau LUTOR. Alat ini mampu mengalirkan gelembung oksigen kedalam air. Ukuran gelembung yang dihasilkan oleh LUTOR masih terlalu besar dengan ukuran gelembung minimal 200 μm , sehingga memiliki nilai apung yang tinggi, dan kadar oksigen terlarut dalam air menurun dengan cepat. Untuk mendapatkan nilai apung yang rendah, maka diperlukan gelembung

dengan ukuran lebih kecil yang dihasilkan oleh generator. Dalam menghasilkan gelembung ukuran kecil sering terkendala saat proses validasi ukurannya. Metode pengukuran gelembung mikro yang ada saat ini seperti *laser diffraction* (Couto et al., 2009), *optical scattering* (Miwa et al., 2010), *spectral imaging* (Browning et al., 2020), dan *mie scattering* (Russell et al., 2020). Namun, metode-metode tersebut membutuhkan biaya yang mahal baik itu hardware maupun software yang digunakan. Selain itu, pengukuran dengan metode-metode tersebut kurang efektif dalam mengukur gelembung dibawah 150 μm . Oleh karena itu, metode pengukuran yang dapat mengukur ukuran gelembung yang lebih kecil dapat membantu penelitian dalam menghasilkan ukuran gelembung yang semakin kecil dari ukuran sebelumnya.

Pada penelitian ini mengusulkan penerapan metode *hough circle transform (HCT)* sebagai solusi metode pengukuran gelembung mikro. HCT mampu meminimalisir penggunaan hardware dan software yang cukup mahal serta ruangan pengukuran yang terkondisi dalam keadaan gelap. HCT adalah metode yang diterapkan dalam mengisolasi suatu fitur pada sebuah citra, dalam mendeteksi bentuk-bentuk geometri seperti lingkaran, garis, elips, dan lain-lain. Metode ini mencari ruang pencarian 3D Hough, transformasi dapat mengukur centroid dan radius setiap objek melingkar dalam sebuah gambar (W.O. Barbosa & Vieira, 2019). Salah satu penerapan metode HCT yaitu pengukuran diameter lingkaran. Kinerja penerapan HCT sebagai metode pengukuran gelembung mikro perlu divalidasi untuk menghasilkan nilai akurasi dan presisi. Tujuan dari penelitian ini adalah mengaplikasikan metode HCT untuk mengukur gelembung mikro yang terkandung dalam air.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dibagi menjadi dua tahapan yaitu pengambilan data dan pengolahan data. Tahapan pengambilan data bertujuan untuk mengambil data gelembung oksigen dari air PDAM Cisititu Dago Bandung. Tahapan pengambilan data dibagi menjadi tiga proses yaitu persiapan alat dan bahan, preparasi sampel, dan perekaman citra. Proses dalam pengambilan data dilakukan berdasarkan alur yang ditunjukkan oleh Gambar 1.

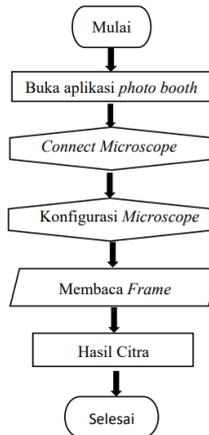


Gambar 1. Diagram alir pengambilan data

Tujuan dari persiapan perekaman citra ini adalah melakukan kalibrasi kamera mikroskop jenis *solomi USB microscope – LED digital electronic microscope with bracket 50X–1600X* yang digunakan dalam pengambilan sampel gelembung. Kalibrasi bertujuan untuk memastikan factor skala sebesar 1:100 sehingga dapat digunakan untuk merekam citra gelembung lebih akurat. Kalibrasi dilakukan menggunakan *glass USAF 1951 resolution test chart* dan *microscope micrometer calibration ruler* yang akan disesuaikan dengan perangkat laptop macbook air 15. Selain itu, *microscope micrometer calibration ruler* digunakan untuk membantu dalam menentukan skala dari suatu citra.

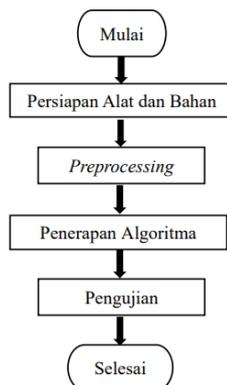
Tahap perekaman citra bertujuan untuk merekam citra gelembung mikro. Target dari tahapan ini adalah diperoleh sebanyak 5 video dengan durasi perekaman 10 detik sebagai data latih dan validasi, serta data uji sebanyak 5 video dengan durasi perekaman 10 detik dengan frame rate 20 fps. Perekaman citra gelembung oksigen dilakukan berdasarkan diagram alir yang ditunjukkan oleh Gambar 2. Langkah-langkah yang dilakukan diantaranya adalah: membuka aplikasi *photo booth* pada perangkat laptop sebagai display citra untuk mempermudah dalam perekaman citra, menyambungkan kamera melalui *port USB*, memastikan kamera

mikroskop yang digunakan telah terkonfigurasi dengan benar dan mengatur resolusi kecerahan atau pengaturan lainnya dengan menggunakan *glass USAF 1951 resolution test chart*, menekan tombol perekaman pada aplikasi *photo booth* untuk membaca frame serta mengakhiri perekaman citra gelembung mikro sehingga data secara otomatis tersimpan dalam galeri perangkat laptop.



Gambar 2. Diagram alir perekaman data

Tahapan pengolahan data dilakukan berdasarkan diagram alir pada Gambar 3. Pengolahan data terdiri dari empat proses yaitu persiapan alat dan bahan, preprocessing, penerapan algoritma, serta pengujian. Pengolahan data bertujuan untuk mendeteksi dan menemukan lingkaran dalam citra digital menggunakan algoritma *hough circle transform*. Algoritma ini mampu mendeteksi objek dan mengukur geometri pada citra gelembung mikro.



Gambar 3. Alur pengolahan data

Tahap *preprocessing* ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi deteksi objek pada citra, metode *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE)* dan *gaussian blur* diterapkan secara berurutan. CLAHE digunakan untuk meningkatkan kontras lokal pada citra dengan membagi citra menjadi beberapa wilayah kecil (*tiles*) dan menerapkan *histogram equalization* secara adaptif pada setiap wilayah. Teknik ini menonjolkan detail pada area dengan variasi intensitas pencahayaan yang tinggi, sehingga batas tepi objek menjadi lebih jelas tanpa meningkatkan kontras secara berlebihan di seluruh citra (Pizer et al., 1987). Setelah kontras ditingkatkan dengan CLAHE, *gaussian blur* diterapkan untuk mengurangi *noise* pada citra dengan melakukan penghalusan melalui kernel *Gaussian*. Langkah ini mengurangi detail kecil yang tidak relevan, namun tetap mempertahankan struktur utama objek, sehingga deteksi objek pada tahap selanjutnya, seperti deteksi lingkaran menggunakan HCT menjadi lebih akurat dan stabil (Gonzalez & Woods, 2007). Kombinasi teknik *preprocessing* ini sering digunakan dalam aplikasi pengolahan citra digital untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dalam deteksi objek berbasis fitur atau ciri.

Penerapan algoritma HCT untuk mendeteksi lingkaran dilakukan dengan menggunakan fungsi *Hough Circle()* pada *library openCV*. HCT bekerja dengan menganalisis piksel-piksel dalam gambar untuk menemukan pola yang menyerupai lingkaran. Proses ini melibatkan konversi piksel dalam ruang citra (*image space*) ke ruang parameter (*parameter space*), yang memungkinkan identifikasi lingkaran dengan berbagai jari-jari dan posisi pusat (*center*). Untuk menampilkan ukuran lingkaran dapat dilakukan dengan cara mengkonversi ke ukuran asli citra. Konversi ukuran fisik dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (1).

$$Ukuran Gelembung = Radius \text{ (dalam piksel)} \times skala \dots\dots\dots(1)$$

Pengujian data hasil penerapan algoritma HCT diperlukan karena dapat membantu mengukur performa algoritma ini dalam mendeteksi lingkaran pada berbagai situasi dan kondisi citra. Tujuannya adalah mengevaluasi kinerja metode HCT dalam mendeteksi dan mengukur gelembung mikro. Anotasi manual dilakukan pada citra-citra dalam dataset. Target dari tahapan ini yaitu menandai lokasi lingkaran dan mengklasifikasikan pendeteksian dalam dua kategori yaitu terdeteksi dan tidak terdeteksi. Proses kedua yaitu pengujian akurasi algoritma HCT. Target dari tahapan ini adalah didapatkannya data pengujian akurasi metode HCT sebagai metode pengukuran gelembung mikro. Pengujian akurasi dilakukan pada setiap sampel data dengan menggunakan Persamaan (2).

$$Akurasi = 100\% - \frac{(\sum T_{\text{terdeteksi salah}})}{n} \times 100\% \dots\dots\dots(2)$$

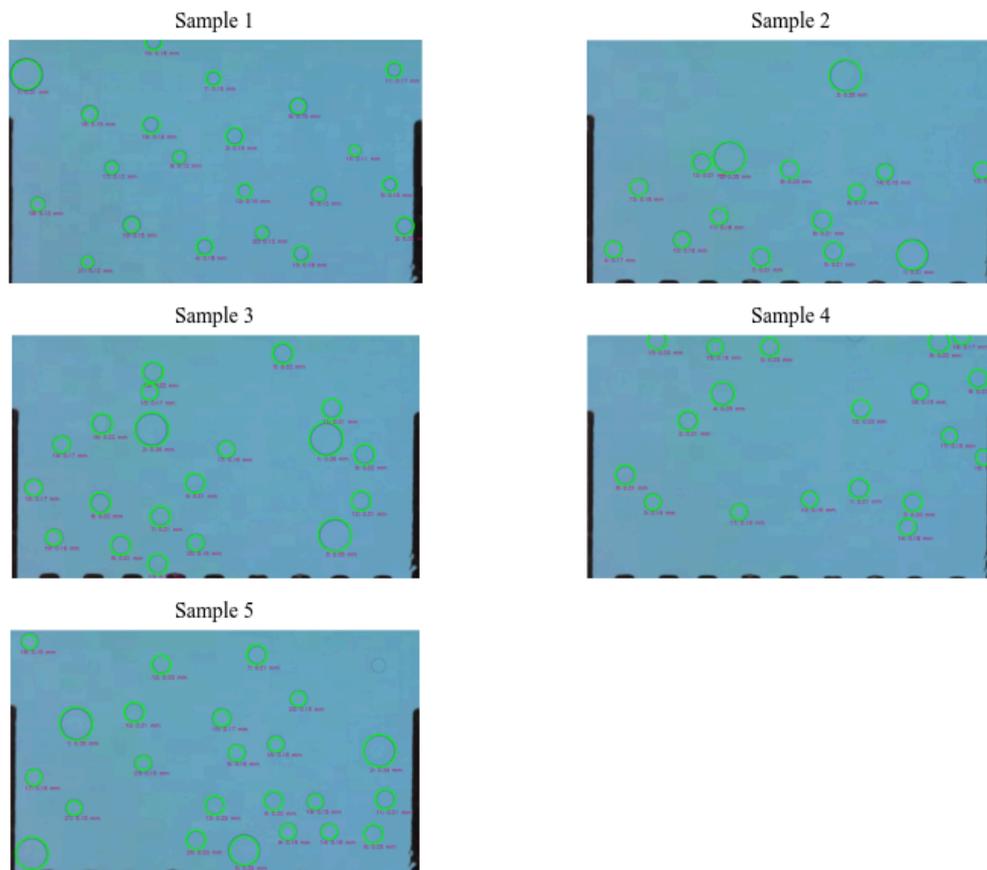
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil

Algoritma hough circle transform sebagai metode pengukuran gelembung mikro telah berhasil diterapkan. Gambar 4 menunjukkan hasil penerapan algoritma tersebut terhadap sampel 1 sampai sampel 5. Pada gambar hasil analisis lima sampel yang ditampilkan, terlihat bahwa deteksi lingkaran dengan berbagai diameter telah dilakukan menggunakan metode analisis citra berbasis algoritma deteksi tepi. Meskipun sebagian besar lingkaran berhasil terdeteksi dan diberi label diameter, terdapat beberapa lingkaran pada sampel 4 dan sampel 5 yang tidak teridentifikasi oleh sistem, sehingga tidak diberi label ukuran. Hal ini menunjukkan adanya keterbatasan atau ketidaktepatan parameter dalam algoritma deteksi yang digunakan.

Beberapa faktor kemungkinan mempengaruhi ketidak terdeteksi ini. Salah satunya adalah perbedaan kecerahan dan kontras pada citra. Jika terdapat lingkaran dengan kontras rendah terhadap latar belakang atau berada pada area pencahayaan yang kurang optimal, tepi lingkaran mungkin menjadi kurang jelas sehingga sulit terdeteksi oleh algoritma. Selain itu, ukuran lingkaran juga bisa mempengaruhi hasil deteksi, terutama jika lingkaran-lingkaran yang terlewat berada di luar rentang ukuran yang ditetapkan dalam parameter deteksi. Algoritma deteksi citra seringkali mengabaikan objek yang ukurannya terlalu kecil atau terlalu besar dibandingkan ukuran rata-rata yang terprogram. Faktor lain yang mungkin berperan adalah adanya noise atau gangguan visual dalam citra yang dapat mengganggu akurasi deteksi tepi, terutama jika gangguan tersebut menyerupai bentuk tepi lingkaran.

Untuk mengatasi keterbatasan ini, diperlukan *fine-tuning* pada parameter deteksi, seperti sensitivitas dan *threshold* algoritma, serta mungkin penerapan metode pengolahan citra tambahan. Peningkatan kontras lokal, penggunaan filter smoothing untuk mengurangi noise, atau penyesuaian *threshold* untuk deteksi tepi dapat membantu meningkatkan akurasi deteksi sehingga semua lingkaran dalam sampel dapat teridentifikasi dengan baik. Temuan ini menunjukkan pentingnya evaluasi dan optimasi algoritma dalam proses analisis citra untuk memastikan seluruh fitur objek yang diinginkan dapat terdeteksi secara akurat.



Gambar 4. Hasil penerapan algoritma hough circle transform

Hasil ekstraksi berupa data fitur (diameter, radius, koordinat pusat) dan ukuran gelembung yang dikonversi menggunakan Persamaan (1) dapat dilihat pada Tabel 1 hingga Tabel 5. Hasil pengukuran gelembung mikro menunjukkan bahwa terdapat 98 gelembung yang terdeteksi dalam sampel. Rata-rata radius gelembung adalah 19,65 piksel, dengan rentang ukuran dari 11 hingga 36 piksel. Diameter rata-rata adalah 39,31 piksel, dengan minimum 22 piksel dan maksimum 72 piksel. Dalam satuan mikrometer, ukuran gelembung berkisar dari 0,11 hingga 0,36 μm , dengan rata-rata 0,20 μm . Hasil ini sesuai dengan penerapan algoritma berbasis *hough transform* pada citra gelembung laut dengan ukuran minimal 20 μm (Al-Lashi et al., 2016). Ini membuktikan bahwa algoritma yang digunakan mampu untuk mengukur gelembung mikro di bawah 150 μm .

Ukuran gelembung dalam piksel menunjukkan distribusi yang cukup bervariasi, dengan rata-rata 1318,83 piksel persegi dan standar deviasi sebesar 886,10 piksel persegi, yang menunjukkan adanya variasi ukuran yang signifikan antar gelembung. Nilai maksimum yang tercatat adalah 4071,50 piksel persegi, sedangkan nilai minimumnya adalah 380,13 piksel persegi. Distribusi ini menunjukkan keberagaman ukuran gelembung dalam sampel yang diamati, dan kemungkinan adanya variasi dalam proses pembentukan gelembung.

Tabel 1. Hasil penerapan algoritma hough circle transform pada sampel 1

No	Gelembung Mikroskop	Diameter	Radius	Koordinat Pusat (x, y)	Ukuran Gelembung (μm)
1	Gelembung_01	62	31	(37, 74)	31×10^{-2}
2	Gelembung_02	40	20	(843, 399)	20×10^{-2}
3	Gelembung_03	38	19	(481, 206)	19×10^{-2}
4	Gelembung_04	36	18	(417, 443)	18×10^{-2}
5	Gelembung_05	32	16	(812, 310)	16×10^{-2}
6	Gelembung_06	26	13	(661, 331)	13×10^{-2}
7	Gelembung_07	32	16	(436, 82)	16×10^{-2}
8	Gelembung_08	30	15	(616, 142)	15×10^{-2}
9	Gelembung_09	24	12	(363, 251)	12×10^{-2}
10	Gelembung_10	30	15	(261, 397)	15×10^{-2}
11	Gelembung_11	34	17	(821, 64)	17×10^{-2}
12	Gelembung_12	32	16	(502, 323)	16×10^{-2}

13	Gelembung_13	36	18	(623, 458)	18×10^{-2}
14	Gelembung_14	22	11	(737, 237)	11×10^{-2}
15	Gelembung_15	36	18	(308, 4)	18×10^{-2}
16	Gelembung_16	30	15	(172, 159)	15×10^{-2}
17	Gelembung_17	24	12	(219, 274)	12×10^{-2}
18	Gelembung_18	26	13	(61, 352)	13×10^{-2}
19	Gelembung_19	38	19	(303, 182)	19×10^{-2}
20	Gelembung_20	24	12	(539, 413)	12×10^{-2}
21	Gelembung_21	24	12	(167, 476)	12×10^{-2}

Tabel 2. Hasil penerapan algoritma hough circle transform pada sampel 2

No	Gelembung Mikroskop	Diameter	Radius	Koordinat Pusat (x, y)	Ukuran Gelembung (μm)
1	Gelembung_01	62	31	(701, 465)	31×10^{-2}
2	Gelembung_02	70	35	(307, 254)	35×10^{-2}
3	Gelembung_03	70	35	(557, 77)	35×10^{-2}
4	Gelembung_04	34	17	(57, 453)	17×10^{-2}
5	Gelembung_05	42	21	(531, 458)	21×10^{-2}
6	Gelembung_06	42	21	(507, 391)	21×10^{-2}
7	Gelembung_07	42	21	(375, 470)	21×10^{-2}
8	Gelembung_08	34	17	(581, 329)	17×10^{-2}
9	Gelembung_09	40	20	(437, 280)	20×10^{-2}
10	Gelembung_10	32	16	(205, 433)	16×10^{-2}
11	Gelembung_11	36	18	(284, 381)	18×10^{-2}
12	Gelembung_12	42	21	(247, 265)	21×10^{-2}
13	Gelembung_13	36	18	(111, 320)	18×10^{-2}
14	Gelembung_14	32	16	(643, 286)	16×10^{-2}
15	Gelembung_15	34	17	(853, 281)	17×10^{-2}

Tabel 3. Hasil penerapan algoritma hough circle transform pada sampel 3

No	Gelembung Mikroskop	Diameter	Radius	Koordinat Pusat (x, y)	Ukuran Gelembung (μm)
1	Gelembung_01	72	36	(665, 221)	36×10^{-2}
2	Gelembung_02	72	36	(296, 201)	36×10^{-2}
3	Gelembung_03	70	35	(683, 425)	35×10^{-2}
4	Gelembung_04	42	21	(387, 315)	21×10^{-2}
5	Gelembung_05	44	22	(573, 39)	22×10^{-2}
6	Gelembung_06	44	22	(746, 254)	22×10^{-2}
7	Gelembung_07	42	21	(314, 386)	21×10^{-2}
8	Gelembung_08	42	21	(230, 447)	21×10^{-2}
9	Gelembung_09	44	22	(187, 357)	22×10^{-2}
10	Gelembung_10	44	22	(298, 79)	22×10^{-2}
11	Gelembung_11	42	21	(677, 157)	21×10^{-2}
12	Gelembung_12	42	21	(739, 353)	21×10^{-2}
13	Gelembung_13	42	21	(308, 487)	21×10^{-2}
14	Gelembung_14	34	17	(105, 233)	17×10^{-2}
15	Gelembung_15	34	17	(291, 121)	17×10^{-2}
16	Gelembung_16	44	22	(190, 189)	22×10^{-2}
17	Gelembung_17	32	16	(454, 243)	16×10^{-2}
18	Gelembung_18	34	17	(46, 325)	17×10^{-2}
19	Gelembung_19	32	16	(88, 431)	16×10^{-2}
20	Gelembung_20	32	16	(389, 442)	16×10^{-2}

Tabel 4. Hasil penerapan algoritma hough circle transform pada sampel 4

No	Gelembung Mikroskop	Diameter	Radius	Koordinat Pusat (x, y)	Ukuran Gelembung (μm)
1	Gelembung_01	42	21	(574, 326)	21×10^{-2}
2	Gelembung_02	42	21	(213, 182)	21×10^{-2}
3	Gelembung_03	32	16	(139, 355)	16×10^{-2}
4	Gelembung_04	50	25	(286, 125)	25×10^{-2}
5	Gelembung_05	40	20	(386, 26)	20×10^{-2}
6	Gelembung_06	42	21	(81, 297)	21×10^{-2}
7	Gelembung_07	40	20	(687, 355)	20×10^{-2}
8	Gelembung_08	44	22	(743, 15)	22×10^{-2}
9	Gelembung_09	40	20	(825, 93)	20×10^{-2}
10	Gelembung_10	32	16	(470, 349)	16×10^{-2}
11	Gelembung_11	32	16	(321, 376)	16×10^{-2}
12	Gelembung_12	40	20	(578, 157)	20×10^{-2}
13	Gelembung_13	40	20	(148, 11)	20×10^{-2}

14	Gelembung_14	36	18	(675, 407)	18×10^{-2}
15	Gelembung_15	32	16	(271, 26)	16×10^{-2}
16	Gelembung_16	32	16	(837, 260)	16×10^{-2}
17	Gelembung_17	30	15	(765, 214)	15×10^{-2}
18	Gelembung_18	30	15	(703, 121)	15×10^{-2}
19	Gelembung_19	34	17	(791, 2)	17×10^{-2}

Tabel 5. Hasil penerapan algoritma hough circle transform pada sampel 5

No	Gelembung Mikroskop	Diameter	Radius	Koordinat Pusat (x, y)	Ukuran Gelembung (μm)
1	Gelembung_01	70	35	(137, 197)	35×10^{-2}
2	Gelembung_02	68	34	(772, 254)	34×10^{-2}
3	Gelembung_03	68	34	(45, 470)	34×10^{-2}
4	Gelembung_04	40	20	(550, 359)	20×10^{-2}
5	Gelembung_05	60	30	(489, 464)	30×10^{-2}
6	Gelembung_06	32	16	(473, 259)	16×10^{-2}
7	Gelembung_07	42	21	(515, 52)	21×10^{-2}
8	Gelembung_08	40	20	(759, 429)	20×10^{-2}
9	Gelembung_09	32	16	(580, 424)	16×10^{-2}
10	Gelembung_10	42	21	(259, 173)	21×10^{-2}
11	Gelembung_11	42	21	(784, 356)	21×10^{-2}
12	Gelembung_12	40	20	(315, 73)	20×10^{-2}
13	Gelembung_13	40	20	(427, 369)	20×10^{-2}
14	Gelembung_14	32	16	(667, 424)	16×10^{-2}
15	Gelembung_15	34	17	(442, 185)	17×10^{-2}
16	Gelembung_16	30	15	(40, 25)	15×10^{-2}
17	Gelembung_17	32	16	(49, 310)	16×10^{-2}
18	Gelembung_18	30	15	(555, 241)	15×10^{-2}
19	Gelembung_19	30	15	(638, 361)	15×10^{-2}
20	Gelembung_20	40	20	(388, 441)	20×10^{-2}
21	Gelembung_21	30	15	(133, 374)	15×10^{-2}
22	Gelembung_22	30	15	(602, 145)	15×10^{-2}
23	Gelembung_23	30	15	(278, 280)	15×10^{-2}

3.2. Pembahasan

Hasil pengukuran gelembung mikro ditampilkan dalam empat grafik utama pada Gambar 5 yang mencakup distribusi radius, distribusi diameter, ukuran gelembung dalam piksel, dan ukuran gelembung dalam mikrometer. Grafik histogram pada bagian kiri atas menunjukkan distribusi radius gelembung dalam satuan piksel. Terlihat bahwa radius gelembung bervariasi antara 10 hingga 35 piksel, dengan puncak frekuensi pada rentang sekitar 15 hingga 25 piksel. Grafik ini menunjukkan bahwa sebagian besar gelembung mikro memiliki radius yang relatif kecil, dengan beberapa gelembung berukuran lebih besar yang terdeteksi. Kurva KDE (Kernel Density Estimation) memperlihatkan pola distribusi yang miring ke kanan, mengindikasikan adanya gelembung dengan radius yang lebih besar namun dalam jumlah yang lebih sedikit.

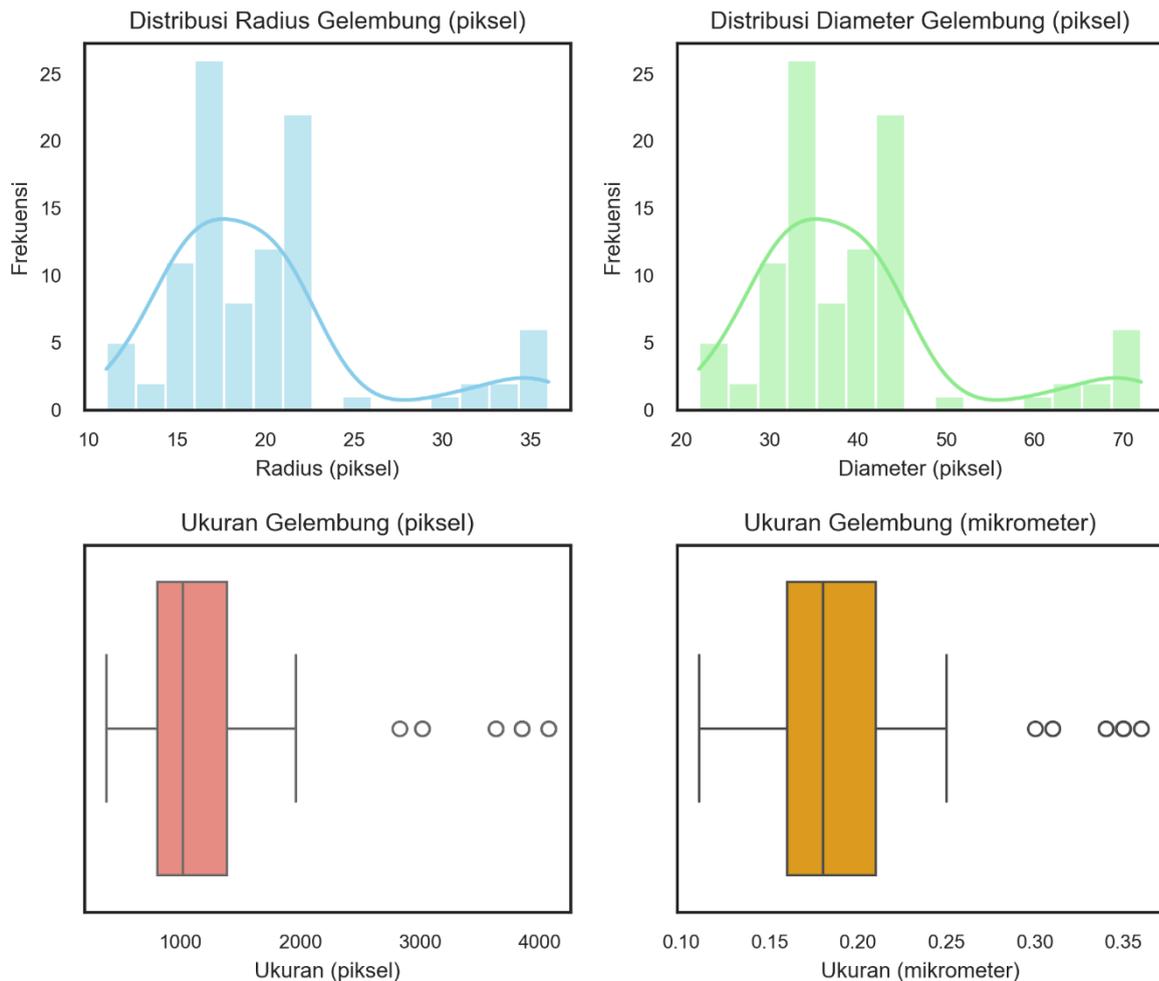
Histogram pada bagian kanan atas menunjukkan distribusi diameter gelembung dalam piksel. Diameter gelembung terdistribusi antara 20 hingga 70 piksel, dengan frekuensi tertinggi pada rentang diameter 30 hingga 50 piksel. Sama seperti pada distribusi radius, pola distribusi ini menunjukkan konsentrasi gelembung mikro pada ukuran kecil hingga sedang, dengan beberapa outlier yang lebih besar. Kurva KDE yang dihasilkan juga memperlihatkan distribusi yang cenderung miring ke arah kanan, yang menunjukkan variasi ukuran gelembung yang cukup signifikan.

Grafik boxplot pada bagian kiri bawah menunjukkan persebaran ukuran gelembung dalam satuan piksel. Persebaran data menunjukkan bahwa sebagian besar ukuran gelembung terkonsentrasi pada kisaran nilai di bawah 2000 piksel. Ada beberapa titik pencilan (outliers) yang berada pada ukuran di atas 3000 piksel, yang menunjukkan adanya beberapa gelembung dengan ukuran jauh lebih besar dibandingkan gelembung mikro lainnya. Hal ini menunjukkan adanya variasi ukuran yang cukup tinggi dalam sampel gelembung yang diamati.

Grafik boxplot pada bagian kanan bawah menunjukkan ukuran gelembung dalam mikrometer. Sama seperti boxplot dalam piksel, persebaran data memperlihatkan bahwa ukuran gelembung sebagian besar berada pada kisaran 0.10 hingga 0.20 mikrometer. Beberapa titik outlier terlihat pada nilai di atas 0.30 mikrometer, yang menunjukkan keberadaan gelembung berukuran lebih besar yang mungkin berperan sebagai outlier dalam analisis. Variasi ini dapat disebabkan oleh ketidakteraturan dalam proses pembentukan gelembung atau kondisi

deteksi yang tidak seragam.

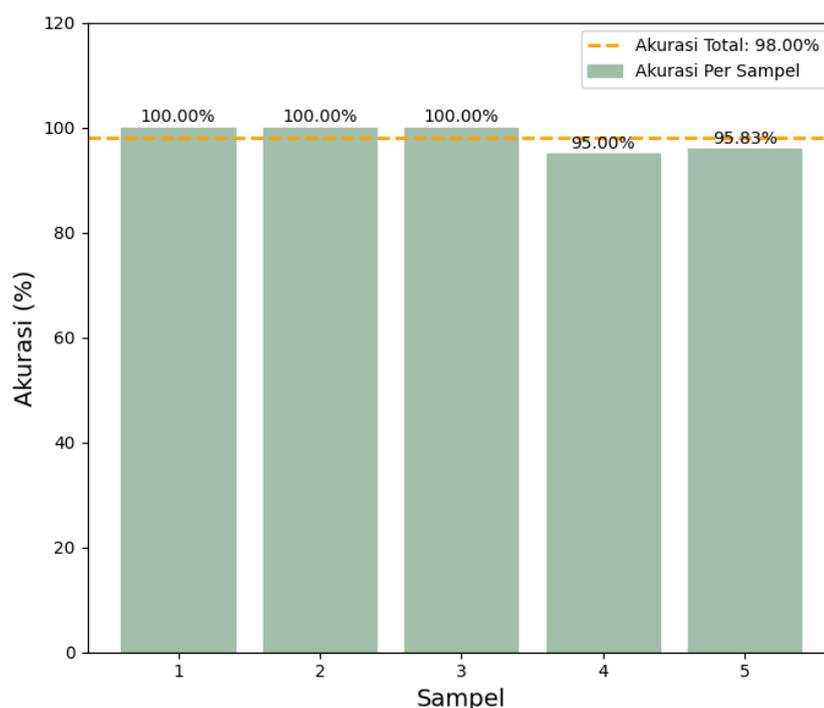
Secara keseluruhan, Gambar 5 menunjukkan bahwa ukuran gelembung mikro dalam sampel yang dianalisis memiliki persebaran yang didominasi oleh ukuran kecil hingga sedang, baik dalam radius maupun diameter. Adanya beberapa outlier dalam ukuran gelembung menunjukkan potensi keberagaman dalam pembentukan gelembung mikro yang bisa dipengaruhi oleh faktor-faktor eksternal atau internal selama proses pembentukan. Distribusi yang cenderung miring ke arah kanan pada histogram radius dan diameter juga menunjukkan bahwa meskipun mayoritas gelembung berada pada ukuran kecil, terdapat beberapa gelembung yang berukuran cukup besar dan mungkin memerlukan perhatian lebih lanjut dalam analisis atau optimasi proses.



Gambar 5. Analisa hasil pengukuran

Grafik pada Gambar 6 mengindikasikan bahwa HCT memiliki performa yang tinggi dan konsisten dalam mendeteksi gelembung mikro pada citra, dengan akurasi total mencapai 98%. Akurasi sempurna (100%) pada tiga sampel pertama menunjukkan bahwa algoritma sangat efektif dalam mendeteksi dan mengukur gelembung mikro pada citra dengan karakteristik tertentu. Namun, penurunan akurasi pada sampel keempat dan kelima, masing-masing menjadi 95% dan 95,83%, menunjukkan bahwa ada variasi dalam citra yang mungkin mempengaruhi efektivitas algoritma.

Penurunan ini dapat disebabkan oleh kondisi pencitraan, variasi ukuran atau intensitas gelembung mikro, atau adanya artefak lain yang mengganggu deteksi. Meski demikian, dengan rata-rata akurasi sebesar 98%, algoritma HCT tetap menunjukkan keandalan tinggi. Hasil ini dapat menjadi dasar untuk meningkatkan algoritma lebih lanjut atau mengembangkan teknik preprocessing tambahan guna mengatasi variasi citra yang mempengaruhi akurasi deteksi.



Gambar 6. Akurasi

4. KESIMPULAN

Metode pengukuran gelembung mikro menggunakan algoritma hough circle transform telah berhasil diterapkan. Hasil penerapan berupa tabel yang meliputi ukuran tiap gelembung mikro pada citra, dan gambar gelembung mikro. Berdasarkan hasil penelitian, algoritma HCT mampu mendeteksi gelembung dengan ukuran gelembung berkisar dari 0,11 hingga 0,36 μm , dengan rata-rata 0,20 μm . Nilai akurasi rata-rata dari kelima sampel data sebesar 98%.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Lashi, R. S., Gunn, S. R., & Czernski, H. (2016). Automated Processing of Oceanic Bubble Images for Measuring Bubble Size Distributions underneath Breaking Waves. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(8), 1701–1714. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0222.1>
- Browning, R. J., Aron, M., Booth, A., Rademeyer, P., Wing, S., Brans, V., Shrivastava, S., Carugo, D., & Stride, E. (2020). Spectral Imaging for Microbubble Characterization. *Langmuir*, 36(2), 609–617. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03828>
- Couto, H. J. B., Nunes, D. G., Neumann, R., & Frana, S. C. A. (2009). Micro-bubble size distribution measurements by laser diffraction technique. *Minerals Engineering*, 22(4), 330–335. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.09.006>
- Geetha, M., Bonthula, S., Al-Maadeed, S., Al-Lohedan, H., Rajabathar, J. R., Arokiyaraj, S., & Sadasivuni, K. K. (2023). Research Trends in Smart Cost-Effective Water Quality Monitoring and Modeling: Special Focus on Artificial Intelligence. *Water*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/w15183293>
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2007). *Digital image processing* (3. ed). Pearson/Prentice Hall.
- Miwa, T., Yamakoshi, Y., & Mashiyama, T. (2010). Optical Scattering Measurement of Microbubble Cloud Dynamics in Ultrasound. *Japanese Journal of Applied Physics*, 49, 07HF19.
- Pizer, S. M., Amburn, E. P., Austin, J. D., Cromartie, R., Geselowitz, A., Greer, T., Ter Haar Romeny, B., Zimmerman, J. B., & Zuiderveld, K. (1987). Adaptive histogram equalization and its variations. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 39(3), 355–368. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(87\)80186-X](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(87)80186-X)
- Revansyah, M. A., Men, L. K., Setianto, S., F, F., Safriani, L., & Aprilia, A. (2023). ANALISIS TDS, PH, DAN COD UNTUK MENGETAHUI KUALITAS AIR DI DESA CILAYUNG. *Jurnal Material Dan Energi Indonesia*, 12(02), 43. <https://doi.org/10.24198/jme.v12i02.41305>
- Russell, P., Venning, J., Pearce, B. W., & Brandner, P. A. (2020). Calibration of Mie scattering imaging for microbubble measurement in hydrodynamic test facilities. *Experiments in Fluids*, 61(4), 93. <https://doi.org/10.1007/s00348-020-2927-7>
- Utomo, L., Kusnadi, H., & Idris, N. (2021). PERANCANGAN SISTEM KENDALI KADAR OKSIGEN

DALAM AIR MENGGUNAKAN SENSOR DO METER. *PROSIDING SENANTIAS: Seminar Nasional Hasil Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(1), 31–40.

W.O. Barbosa, & Vieira, A. (2019). On the Improvement of Multiple Circles Detection from Images using Hough Transform. *TEMA*, 20, 331–342. <https://doi.org/10.5540/tema.2019.020.02.0331>