

DETEKSI AREA KERUSAKAN PADA CITRA TERUMBU KARANG AKIBAT *CORAL BLEACHING* BERBASIS PENGOLAHAN CITRA DIGITAL

Mutmainnah Muchtar*¹, Riska²

¹Program Studi Ilmu Komputer, Fakultas Teknologi Informasi, USN Kolaka, Kolaka, Sultra

²Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Perikanan, dan Peternakan, USN Kolaka,
Kolaka, Sultra

e-mail: *muchtarmutmainnah@gmail.com, riska05071991@gmail.com

Abstract

Coral reefs have a very large role in marine ecosystems, because they provide rich habitats and support biodiversity. Segmentation on images of coral reefs experiencing coral bleaching is also very important. Coral bleaching is a phenomenon in which coral reefs lose their symbiotic algae pigments, resulting in bleaching and possibly death of coral reefs. By segmenting coral reef images that experience coral bleaching, we can separate areas affected by bleaching from areas that are still healthy. This study aims to detect areas of damage that occur in underwater images of coral reefs that have experienced coral bleaching. By using techniques in digital image processing and segmentation based on colour intensity, satisfactory results are obtained. The test results show that the RAE and ME values are quite low, namely 0.051 and 0.035 respectively with an average processing time of 0.2 seconds. This research is expected to assist in further analysis and modelling related to coral bleaching to understand the causative factors and develop appropriate protection strategies.

Keyword: coral bleaching, digital image processing, segmentation, thresholding

PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara yang berada pada posisi kedua sebagai negara dengan garis pantai terpanjang di dunia setelah Kanada (Ningrum et al., 2020). Potensi laut Indonesia meliputi sumber daya alam seperti ikan, minyak dan gas bumi, mineral, dan energi terbarukan. Selain itu, Indonesia juga memiliki kekayaan alam bawah laut yang luar biasa, seperti terumbu karang yang indah. Terumbu karang (*coral reefs*) merupakan struktur kompleks yang terbentuk dari koloni organisme karang yang hidup dalam hubungan simbiosis dengan alga bersel satu (*zooxanthellae*) (Boilard et al., 2020). Terumbu karang merupakan ekosistem yang sangat penting, menyediakan habitat untuk ribuan spesies laut, melindungi pantai dari erosi, dan berperan dalam siklus nutrisi serta penyerapan karbon di laut. Pemanasan global, pencemaran, penangkapan ikan yang tidak berkelanjutan, degradasi habitat, dan aktivitas manusia lainnya telah menyebabkan kerusakan terumbu karang di beberapa wilayah di Indonesia (Ramadhan et al., 2016; Oliver et al., 2018; Riska et al., 2022). Sehingga terumbu karang termasuk ke dalam salah satu ekosistem yang terancam utamanya karena kegiatan manusia seperti pencemaran dari daratan dan praktek perikanan yang merusak (Ramadhan et al., 2016; Riska et al., 2022). Sementara ancaman lain yang lebih potensial adalah kenaikan suhu permukaan air laut yang dapat menyebabkan pemutihan karang atau *coral bleaching* (Setiawan et al., 2017). Oleh karena itu, perlu dilakukan pengelolaan yang berkelanjutan dan perlindungan terhadap ekosistem laut agar tetap lestari bagi generasi mendatang.

Coral bleaching atau pemutihan karang merujuk pada kondisi di mana terumbu karang kehilangan warnanya dan menjadi pucat atau putih. Hal ini terjadi ketika terumbu karang mengalami stres di lingkungannya yang disebabkan oleh peningkatan suhu air, polusi, atau perubahan dalam kimiawi air. Ketika terumbu karang mengalami tekanan atau ketidakseimbangan lingkungan, alga simbiotik (*zooxanthellae*) yang hidup di dalam jaringan karang, yang memberikan warna dan nutrisi, dikeluarkan oleh karang. Akibatnya, terumbu karang

tampak memutih atau berwarna putih (Boilard et al., 2020; Oliver et al., 2018). Jika stressor berlanjut atau semakin intens, terumbu karang yang memutih tersebut dapat mati, menyebabkan kerusakan jangka panjang pada ekosistem terumbu karang.

Dalam pengolahan citra digital, terdapat beberapa cara untuk mensegmentasi area citra bawah laut dari terumbu karang yang mengalami *coral bleaching*. Salah satu metode yang umum digunakan adalah metode segmentasi berdasarkan perbedaan intensitas warna. Pada citra terumbu karang, area yang mengalami pemutihan biasanya memiliki intensitas warna yang lebih rendah atau berbeda dibandingkan dengan area karang yang sehat. Dengan menggunakan algoritma segmentasi, seperti metode *thresholding* atau segmentasi berbasis wilayah, intensitas warna yang berbeda dapat diidentifikasi dan area yang terkena *coral bleaching* dapat dipisahkan dari area yang sehat. Hal ini dapat memberikan pemahaman yang lebih detail tentang luas dan distribusi pemutihan terumbu karang, sehingga tindakan pengelolaan dan pemulihan yang tepat dapat diambil untuk mengurangi dampak dan menjaga kelestarian terumbu karang (Levy et al., 2018).

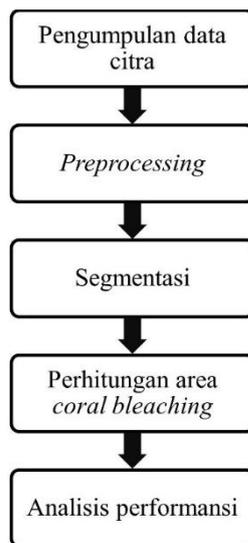
Penelitian mengenai deteksi dan segmentasi citra terumbu karang telah menjadi fokus utama dalam upaya pemetaan dan pemahaman yang lebih baik tentang ekosistem karang. Tujuan dari segmentasi citra terumbu karang adalah untuk memisahkan area karang dari latar belakang atau elemen lain dalam citra, sehingga memungkinkan analisis yang lebih mendalam tentang keadaan dan keberagaman terumbu karang. (Thenu & Makailipessy, 2017) dan (Irawan et al., 2017) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui sebaran ekosistem terumbu karang dan luasannya menggunakan citra satelit Landsat dan juga didukung oleh validasi lapangan. Selain menggunakan citra satelit, penggunaan citra yang diakuisisi dengan *drone* juga bisa dilakukan. Seperti penelitian oleh (Levy et al., 2018) yang bertujuan untuk mengetahui sebaran terumbu karang yang mengalami *coral bleaching* menggunakan citra yang diakuisi dengan *drone*. Ketiga penelitian ini menunjukkan hasil yang baik, namun metode pengambilan datasetnya masih memiliki kekurangan, misalnya dari segi resolusi spasial yang terbatas, pengaruh kondisi atmosfer, juga masalah privasi dari penggunaan *drone*. (Ihsan et al., 2019) mengklasifikasikan citra terumbu karang *genus* karang keras dengan menggunakan metode ekstraksi fitur citra yaitu GLCM dan klasifikasi Support Vector Machine (SVM). Namun akurasinya masih cukup rendah karena tidak mencapai 50%. Selanjutnya, (Song et al., 2021) melakukan penelitian terkait segmentasi citra terumbu karang dengan menggunakan citra RGB dan citra *spectral* terumbu karang. Metode segmentasi secara semantik dilakukan dalam penelitian ini menggunakan model jaringan syaraf tiruan. Namun penelitian ini hanya berfokus pada segmentasi area terumbu karang saja. Sementara itu, (Alhamad, 2021) menerapkan metode ekstraksi fitur citra yaitu Filter Gabor untuk mengklasifikasikan terumbu karang ke dalam 2 kategori yaitu rusak dan baik. Dilanjutkan oleh (Ahmad Fauzi & Adisuputra, 2023) yang melakukan segmentasi dengan algoritma *thresholding watershed* pada citra bawah laut untuk memisahkan karang mati dengan area lainnya dengan hasil yang baik. Namun kedua penelitian ini tidak secara spesifik berfokus pada karang mati yang terjadi karena *coral bleaching*.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mendeteksi dan mensegmentasi area pada citra terumbu karang yang secara khusus mengalami fenomena pemutihan karang atau *coral bleaching*. Proses deteksi dilakukan dengan menggunakan serangkaian teknik-teknik dalam pengolahan citra digital yang terdiri atas proses konversi warna, median filter, *thresholding*, operasi morfologi, dan penentuan persentase area *coral bleaching*. Dengan mendeteksi area terumbu karang yang terkena *coral bleaching*, dapat diketahui sejauh mana tingkat persentase kerusakan karang yang terjadi sehingga masyarakat dapat lebih proaktif dalam menjaga kelestarian terumbu karang. Informasi ini penting untuk pengambilan keputusan dan tindakan yang tepat dalam pengelolaan terumbu karang.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan. Gambar 1 menunjukkan tahapan dari metode yang diusulkan. Tahap pertama adalah pengumpulan data citra terumbu karang yang mengalami proses pemutihan (*coral bleaching*). Data yang digunakan berjumlah 12 citra yang bersumber dari penelitian oleh (Jamil et al., 2021). Selanjutnya citra terumbu karang dikoreksi pada tahap *preprocessing* dan dilakukan segmentasi berdasarkan intensitas warna. Setelah area terumbu karang yang mengalami pemutihan berhasil dipisahkan dari area karang yang tidak mengalami

pemutihan, maka kemudian akan dihitung masing-masing persentase dari area kerusakannya. Terakhir, kinerja dari metode yang diusulkan akan dihitung menggunakan RAE (*relative foreground area error*) dan ME (*misclassification error*).



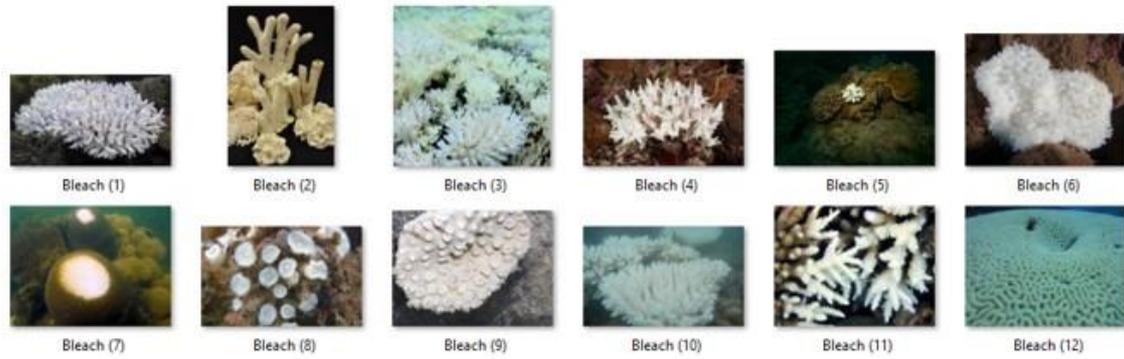
Gambar 1. Tahapan pelaksanaan penelitian

A. Pengumpulan Data

Sebanyak 12 citra terumbu karang yang mengalami *coral bleaching* digunakan dalam penelitian ini. Citra tersedia secara online pada situs *kaggle.com* yang merupakan bagian dari dataset yang digunakan oleh (Jamil et al., 2021) dengan berbagai resolusi seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 1. Citra pada dataset ini diakuisisi dengan menggunakan kamera yang terpasang pada kamera bawah laut. Gambar 2 menunjukkan citra terumbu karang yang digunakan dalam penelitian ini.

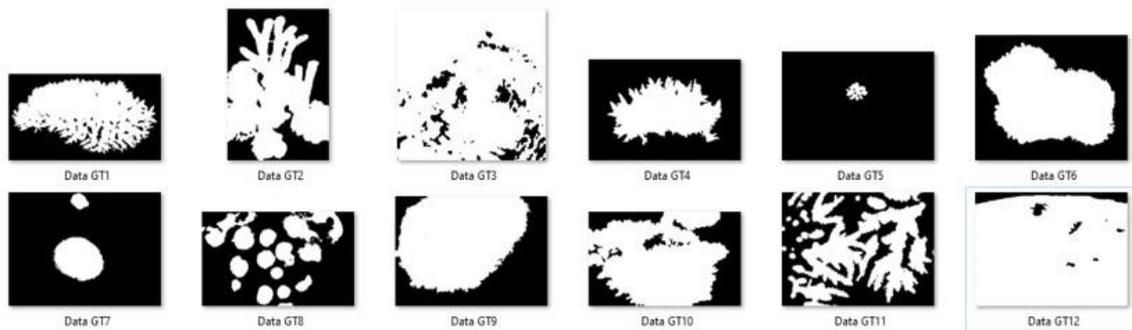
Tabel 1. Informasi terkait resolusi citra yang digunakan

Data Citra	Resolusi (<i>width x height</i>)
Data 1	495 x 282
Data 2	199 x 300
Data 3	199 x 204
Data 4	498 x 333
Data 5	923 x 663
Data 6	469 x 389
Data 7	879 x 660
Data 8	1592 x 991
Data 9	390 x 282
Data 10	415 x 258
Data 11	527 x 395
Data 12	300 x 225



Gambar 2. Dataset terumbu karang yang mengalami *coral bleaching*

Selain menyiapkan data citra utama, data citra *groundtruth* dari segmentasi area pemutihan karang juga disiapkan. Citra *groundtruth* merupakan citra biner yang akan menjadi referensi atau acuan dalam membandingkan citra hasil segmentasi dari penelitian ini, untuk kemudian diukur performansi dari metode segmentasi yang dilakukan. Citra *groundtruth* dibuat dengan melibatkan seorang ahli di bidang analisis data citra terumbu karang dan menggunakan *software* Adobe Photoshop. Gambar 3 menunjukkan citra *groundtruth* dalam penelitian ini.



Gambar 3. Citra *groundtruth*

B. Preprocessing Citra

- **Konversi RGB ke CMYK**

Operasi pra-pemrosesan atau *preprocessing* citra dilakukan untuk meningkatkan fitur tertentu dari citra. Ruang warna CMYK adalah ruang warna subtraktif berdasarkan warna primer yang terdiri atas *cyan*, *magenta*, *yellow*, dan *black*. Pada tahap ini, data citra terumbu karang dikonversi dari ruang warna RGB ke ruang warna CMYK. Kemudian dipilih citra channel K yang merupakan *channel* warna hitam. Proses ini menghasilkan citra terumbu karang dalam bentuk citra *grayscale* 8-bit yang lebih jelas dibandingkan dengan metode rata-rata. Persamaan 1-4 menunjukkan proses konversi citra RGB ke CMYK (Yang et al., 2019).

$$K = \min(255 - R, 255 - G, 255 - B) \quad (1)$$

$$C = \frac{255 - R - K}{255 - K} \quad (2)$$

$$M = \frac{255 - G - K}{255 - K} \quad (3)$$

$$Y = \frac{255 - B - K}{255 - K} \quad (4)$$

dimana R, G, dan B merupakan nilai piksel pada masing-masing *channel* warna merah, hijau dan biru pada ruang warna RGB. Sedangkan K, C, M, dan Y merupakan nilai piksel dari masing-masing warna hitam, *cyan*, *magenta*, dan kuning pada ruang warna CMYK. Gambar 4 menunjukkan citra RGB terumbu karang dan citra *grayscale* terumbu karang yang

menekankan pada nilai *channel* K.



Gambar 4. Konversi citra RGB ke citra *grayscale* CMYK *channel* K

• Median Filter

Median filter adalah salah satu metode pengolahan citra yang digunakan untuk mengurangi *noise* atau gangguan pada citra (Muchtar et al., 2016; Setiyorini et al., 2019). Metode ini mengganti setiap nilai piksel dengan nilai median dari piksel-piksel tetangganya. Dengan menggunakan median filter, maka kualitas citra bisa ditingkatkan dengan cara mengurangi *noise* tanpa mengorbankan detail yang penting. Nilai median dihitung dengan mengurutkan nilai piksel-piksel tetangga dan memilih nilai tengah sebagai pengganti. Algoritma median filter adalah sebagai berikut:

1. Ambil citra input yang akan diolah. Dalam hal ini citra *grayscale*.
2. Tentukan ukuran kernel (misalnya 3x3, 5x5, atau sesuai kebutuhan).
3. Untuk setiap piksel dalam citra, lakukan langkah-langkah berikut: a. Pilih piksel tetangga yang termasuk dalam kernel berdasarkan posisi relatif terhadap piksel saat ini. b. Kumpulkan nilai intensitas piksel-piksel tetangga tersebut. c. Urutkan nilai intensitas secara *ascending*. d. Ambil nilai tengah (nilai median) dari kumpulan nilai intensitas. e. Gantikan nilai piksel saat ini dengan nilai median yang diambil.
4. Ulangi langkah 3 untuk setiap piksel dalam citra.
5. Hasilkan citra output yang telah mengalami proses median filter.

C. Segmentasi Citra

• Segmentasi Berdasarkan Intensitas Warna

Segmentasi merupakan teknik dalam pengolahan citra yang bertujuan untuk membagi citra ke dalam beberapa region atau daerah berdasarkan kemiripan atribut yang dimiliki oleh citra (Ahmad Fauzi & Adisuputra, 2023). Segmentasi berdasarkan intensitas warna mengacu pada proses memilih atau mengubah piksel-piksel dalam citra berdasarkan kondisi yang berkaitan dengan intensitas warnanya. Proses ini memungkinkan untuk menentukan rentang nilai warna tertentu atau kombinasi nilai warna dalam *channel* warna tertentu sebagai kondisi untuk memilih piksel-piksel yang termasuk ke dalam ROI (*region of interest*). Pada penelitian ini, digunakan 2 nilai ambang pada proses *thresholding*, yaitu nilai ambang bawah dan ambang atas. Metode ini membagi piksel-piksel dalam citra terumbu karang menjadi dua kategori berdasarkan ambang batas yang ditentukan. Piksel dengan intensitas di atas ambang batas akan diklasifikasikan sebagai satu kategori, sementara piksel dengan intensitas di bawah ambang batas akan diklasifikasikan sebagai kategori lainnya (Banakar et al., 2017). Pada penelitian ini, nilai ambang bawah adalah 120 dan ambang atas adalah 255. Berikut ini algoritma dari proses segmentasi yang diajukan:

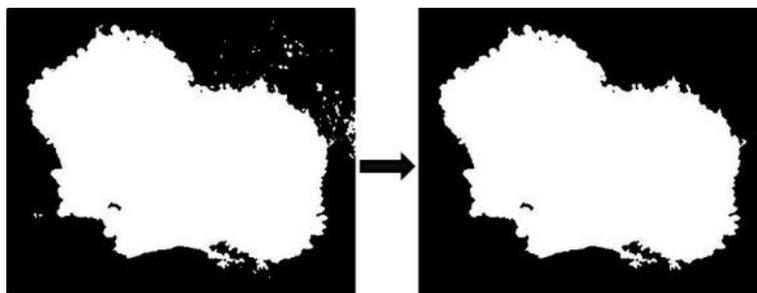
1. Baca citra *grayscale* hasil *preprocessing*
2. Tentukan dua nilai ambang batas, yaitu ambang bawah (*low*) dan atas (*high*), yang akan digunakan untuk memisahkan piksel-piksel dalam citra.
3. Buat citra biner awal dengan menginisialisasi matriks biner dengan ukuran yang sama seperti citra asli.

4. Loop melalui setiap piksel dalam citra:
 - Dapatkan nilai piksel pada koordinat (x, y) .
 - Jika nilai piksel berada di antara *low* dan *high*, ubah nilai piksel pada citra biner ke 255 (putih).
 - Jika tidak, ubah nilai piksel pada citra biner ke 0 (hitam).
5. Tampilkan citra biner hasil segmentasi.

• Operasi Morfologi Opening

Operasi morfologi opening adalah operasi dasar dalam pemrosesan citra biner yang terdiri dari dua tahap: erosi dan dilasi. Pada tahap erosi, elemen struktural kecil digeser di citra untuk mengurangi ukuran objek dan menghilangkan noise kecil. Kemudian, pada tahap dilasi, elemen struktural yang sama digeser untuk memperbesar objek dan mengisi bagian-bagian kecil yang hilang. Operasi opening menghilangkan noise, menyempurnakan kontur objek, dan memisahkan objek yang saling terhubung (Pasrun et al., 2020). Tujuan dilakukannya proses ini adalah untuk menghilangkan piksel-piksel berukuran kecil yang dianggap sebagai noise pada citra terumbu karang. Gambar 5 menunjukkan contoh hasil operasi opening untuk menghilangkan piksel-piksel yang berukuran kecil. Output dari proses ini menghasilkan citra biner. Persamaan 5 menunjukkan formula untuk melakukan operasi opening.

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (5)$$



Gambar 5. Proses operasi opening pada citra biner menghilangkan piksel berukuran kecil

D. Penentuan Area Terumbu Karang yang Mengalami *Coral Bleaching*

Perhitungan persentase area citra terumbu karang yang mengalami dan tidak mengalami fenomena *coral bleaching* dilakukan dengan cara yang cukup sederhana. Untuk memperoleh persentase area yang mengalami *coral bleaching*, maka total nilai piksel putih (nilai 255) yang didapatkan pada proses operasi morfologi dibandingkan dengan jumlah total keseluruhan piksel (ΣP) pada citra biner. Cara memperolehnya ditunjukkan pada Persamaan 6.

$$\text{Area coral bleaching (\%)} = \frac{P_{255}}{\Sigma P} * 100\% \quad (6)$$

E. Metode Analisis Performansi

Dalam mengukur performa dari metode yang diajukan, evaluasi dilakukan dengan menggunakan metode RAE (*relative foreground area error*) dan ME (*misclassification error*) (Arifin et al., 2019). RAE mengukur jumlah perbedaan properti objek seperti luas dan bentuk. Pengukuran perbedaan ini dilakukan pada segmentasi citra yang dihasilkan oleh sistem pada citra *groundtruth* (pengamatan ahli). Sedangkan ME didefinisikan sebagai bentuk korelasi antara citra hasil segmentasi dari sistem dan *groundtruth*. Bentuk korelasinya adalah dengan melihat rasio perbandingan piksel *background* yang dikenali sebagai objek dan rasio perbandingan piksel objek yang dikenali sebagai *background*. Nilai RAE dan ME adalah antara 0 dan 1. Jika makin mendekati 0 maka semakin baik. Artinya bahwa hasil segmentasi dianggap sangat mirip dengan citra *groundtruth*. Persamaan 7 dan 8 masing-masing menunjukkan cara mendapatkan nilai RAE

dan ME.

$$RAE = \begin{cases} \frac{A_O - A_T}{A_O} & \text{if } A_T < A_O, \\ \frac{A_T - A_O}{A_T} & \text{if } A_T \geq A_O, \end{cases} \quad (7)$$

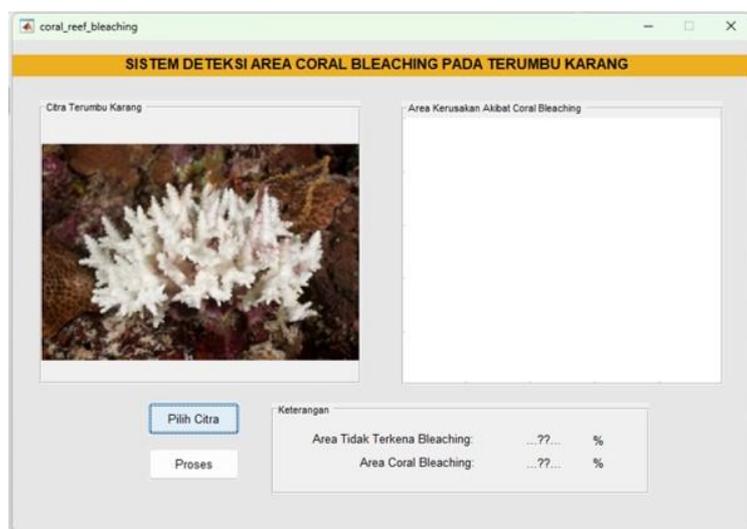
dimana A_O adalah luas citra groundtruth, dan A_T adalah luas citra yang dihasilkan.

$$ME = 1 - \frac{|B_O \cap B_T| + |F_O \cap F_T|}{|B_O| + |F_O|} \quad (8)$$

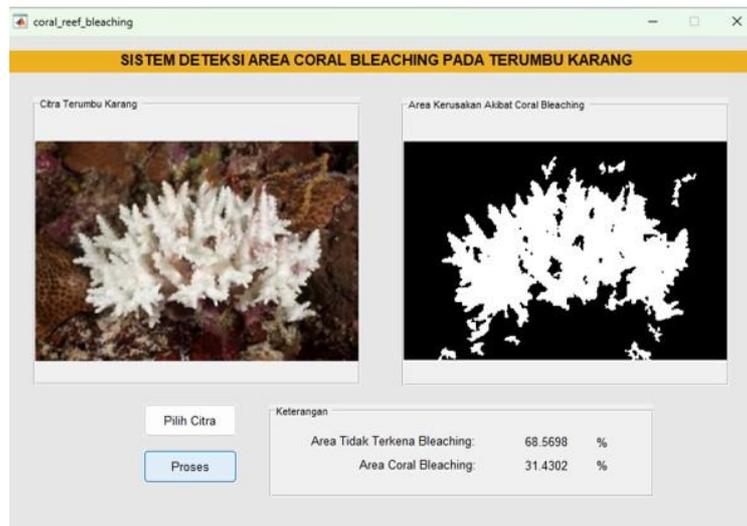
dimana B_O dilambangkan sebagai area *background* (area terumbu karang yang tidak mengalami *coral bleaching*) dan F_O is adalah area *foreground* (area terumbu karang yang mengalami *coral bleaching*) dari citra groundtruth. B_T dilambangkan sebagai area *background* dari citra hasil segmentasi, sedangkan F_T adalah area objek *foreground* dari citra hasil segmentasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

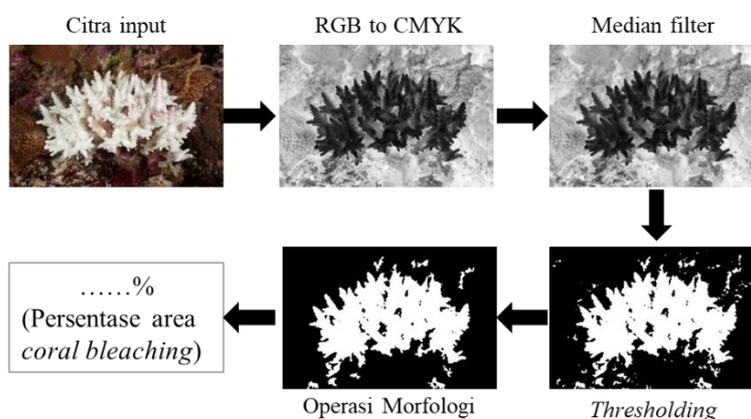
Sebelum melakukan analisis terkait metode yang diusulkan, terlebih dulu dilakukan proses implementasi sistem. Gambar berikut adalah antarmuka dari sistem. Sistem ini dibangun dengan menggunakan perangkat lunak Matlab dan dikembangkan dengan menggunakan metode *Waterfall* (Fu'ady & Suhendar, 2020). Tahapan ini terdiri atas tahap analisis kebutuhan, perancangan, implementasi atau pengkodean, pengujian dan pemeliharaan. Sistem ini terdiri dari 2 tombol utama yaitu tombol untuk memilih data citra terumbu karang dan tombol untuk menentukan area terumbu karang yang mengalami *coral bleaching* dengan menerapkan langkah-langkah yang diusulkan. Antarmuka pengguna sistem dapat dilihat pada Gambar 6, di mana *user* memilih tombol "Pilih Citra" untuk memilih citra terumbu karang dalam direktori yang telah ditentukan. Sedangkan Gambar 7 menunjukkan hasil akhir dari sistem ketika *user* memilih tombol "Proses". Pada bagian ini menunjukkan persentase area terumbu karang yang mengalami dan tidak mengalami *coral bleaching*. Gambar 8 menunjukkan keseluruhan proses yang ada dalam sistem ini sesuai dengan metode yang diajukan. Keseluruhan proses ini tidak ditampilkan pada antarmuka untuk tujuan simplifikasi antarmuka sistem.



Gambar 6. Tampilan antarmuka sistem untuk deteksi area *coral bleaching*



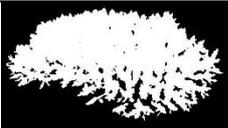
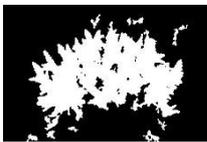
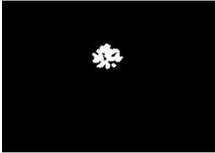
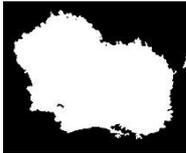
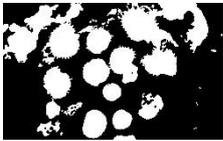
Gambar 7. Tampilan akhir sistem dengan detail persentase area *coral bleaching*



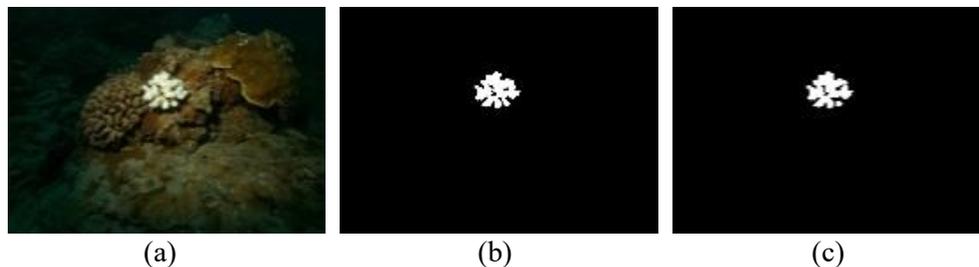
Gambar 8. Proses penentuan area terumbu karang yang mengalami *coral bleaching*

Analisis dalam penelitian ini didasarkan pada citra *groundtruth*. Tabel 2 menunjukkan persentase area terumbu karang yang mengalami *coral bleaching* dan yang tidak mengalami *bleaching* (area *background*) dengan menggunakan tahapan yang diusulkan. Rata-rata waktu proses untuk memperoleh persentase area *coral bleaching* adalah selama 0,20 detik. Untuk menghitung tingkat kesalahan metode segmentasi sistem, digunakan metode evaluasi kinerja. Hasil pengujian segmentasi dievaluasi menggunakan RAE (*relative foreground area error*) dan ME (*misclassification error*). Hasil evaluasi dengan metode RAE dan ME juga dapat dilihat pada Tabel 2. RAE mengukur jumlah perbedaan properti objek seperti luas dan bentuk. Pengukuran perbedaan ini dilakukan pada segmentasi citra yang dihasilkan oleh sistem terhadap citra *groundtruth*. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata perhitungan RAE adalah 0,051. Sementara itu, ME pada pengujian ini menunjukkan nilai rata-rata sebesar 0,035. Gambar 9 menunjukkan citra uji ke-5 yang memperoleh hasil segmentasi dengan nilai *error* terkecil yaitu nilai ME sebesar 0,001. Hal ini juga mengindikasikan bahwa metode yang diusulkan telah mampu memberikan kinerja segmentasi yang baik dalam mendeteksi area *coral bleaching*.

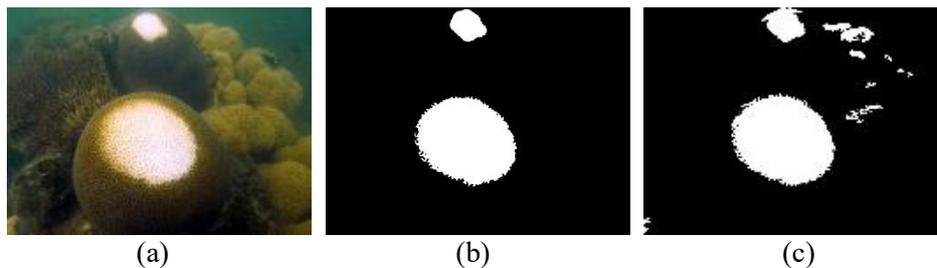
Tabel 2. Hasil evaluasi segmentasi area *coral bleaching*

Data	Citra input	Hasil segmentasi	RAE	ME	Waktu (detik)	Area coral bleaching (%)	Area bukan coral bleaching (%)
1			0,061	0,031	0,17	47,08	52,92
2			0,051	0,029	0,23	54,37	45,63
3			0,054	0,048	0,11	85,29	14,71
4			0,012	0,044	0,14	31,43	68,57
5			0,008	0,001	0,28	1,31	98,69
6			0,006	0,023	0,17	48,41	51,59
7			0,155	0,020	0,24	12,62	87,38
8			0,126	0,044	0,50	34,18	65,82
9			0,022	0,058	0,13	60,56	39,44

10			0,014	0,031	0,12	66,41	33,59
11			0,043	0,023	0,14	49,94	50,06
11			0,055	0,071	0,12	88,42	11,58
Rata-rata			0,051	0,035	0,20		



Gambar 9. Citra uji dengan nilai *error* terkecil. (a) Citra input; (b) Citra *groundtruth*; dan (c) Citra hasil segmentasi dengan metode yang diajukan



Gambar 10. Citra uji dengan nilai *error* terbesar. (a) Citra input; (b) Citra *groundtruth*; dan (c) Citra hasil segmentasi dengan metode yang diajukan

Namun demikian, masih terdapat kesalahan dalam proses segmentasi. Misalnya, data uji ke-7 menunjukkan nilai *error* tertinggi dengan nilai RAE sebesar 0,155. Seperti yang terlihat pada Gambar 10, hasil segmentasi sistem menunjukkan masih ada beberapa piksel yang dikonversi sebagai piksel objek (*area coral bleaching*), yang seharusnya merupakan *area background* (area yang tidak terkena *bleaching*). Hal ini dikarenakan karena nilai ambang yang digunakan dalam penelitian ini bersifat statis atau *non-adaptive*. Meskipun demikian, penggunaan nilai ambang atas dan bawah untuk segmentasi berdasarkan intensitas warna yang digunakan dalam penelitian ini juga telah menunjukkan hasil yang cukup memuaskan. Penambahan metode *preprocessing* citra serta penggunaan teknik *thresholding* yang bersifat adaptif bisa dilakukan untuk mengurangi nilai *error* rata-rata dari metode segmentasi area pada citra *coral bleaching* ataupun citra pada penelitian-penelitian sejenis.

KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dilakukan teknik pengolahan citra digital untuk mendeteksi area *coral bleaching* pada citra terumbu karang. Tahapan yang dilakukan terdiri atas proses konversi citra RGB ke CMYK untuk memperoleh nilai *channel K*, median *filtering*, *thresholding* menggunakan nilai ambang batas dan bawah, serta operasi morfologi untuk mendeteksi area *coral bleaching*. Dari hasil evaluasi didapatkan bahwa:

1. Nilai rata-rata RAE (*relative foreground area error*) adalah sebesar 0,051 dan nilai rata-rata ME (*misclassification error*) adalah sebesar 0,035. Apabila nilai *error* makin mendekati angka 0, maka semakin akurat hasil segmentasi yang dilakukan. Nilai RAE dan ME yang ditunjukkan ini relatif kecil sehingga dapat disimpulkan bahwa metode yang diajukan dapat mendeteksi area *coral bleaching* dengan baik dengan waktu proses yang relatif cepat (0,20 detik) secara otomatis.
2. Nilai *error* tertinggi terdapat pada citra uji ke 7 dengan nilai RAE sebesar 0,155. Sedangkan *error* terendah terdapat pada citra uji ke 5 dengan ME sebesar 0,001.

SARAN

Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik, ke depannya penelitian ini bisa dikembangkan dengan menggunakan dataset citra terumbu karang yang lebih banyak dan memiliki tingkat keabuan yang lebih jelas antara *background* dan objek. Selain itu, diperlukan teknik yang lebih andal dalam minimalisir *noise*. Penambahan metode pengolahan citra lainnya sangat dianjurkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad Fauzi, A., & Adisuputra, A. (2023). Implementation of ColorSpace, GrabCut, and Watershed Methods on Digital Image Segmentation of Coral and Fish Objects. *Journal of Computer Networks, Architecture and High Performance Computing*, 5(1), 87–99. <https://doi.org/10.47709/cnahpc.v5i1.2012>
- Alhamad, A. (2021). Ekstrasi Ciri Metode Filter Gabor Untuk Deteksi Kerusakan Terumbu Karang. *Jurnal Nasional CosPhi*, 5(2), 2597–9329. <http://www.image-net.org/>.
- Arifin, A. Z., Tanuwijaya, E., Nugroho, B., Priyatno, A. M., Indraswari, R., Astuti, E. R., & Navastara, D. A. (2019). Automatic image slice marking propagation on segmentation of dental CBCT. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 17(6), 3218–3225. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v17i6.13220>
- Banakar, A., Zareiforoush, H., Baigvand, M., Montazeri, M., Khodaei, J., & Behroozi-Khazaei, N. (2017). Combined Application of Decision Tree and Fuzzy Logic Techniques for Intelligent Grading of Dried Figs. *Journal of Food Process Engineering*, 40(3). <https://doi.org/10.1111/jfpe.12456>
- Boilard, A., Dubé, C. E., Gruet, C., Mercière, A., Hernandez-Agreda, A., & Derome, N. (2020). Defining coral bleaching as a microbial dysbiosis within the coral holobiont. In *Microorganisms* (Vol. 8, Issue 11, pp. 1–26). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8111682>
- Fu'ady, T. D., & Suhendar, B. (2020). Analisa perancangan sistem informasi pendaftaran magang kerja menggunakan waterfall. *Journal of Innovation and Future Technology (IFTECH)*, 2(2), 56–65.
- Ihsan, M., Sauri, A., Widodo, A. W., Luthfi, O. M., Studi, P., Kelautan, I., & Perikanan, F. (2019). *Klasifikasi Genus Karang Keras (Scleractinia) dengan Metode Gray Level Co-Occurrence Matrix* (Vol. 3, Issue 6). <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- Irawan, J., Sasmito, B., & Suprayogi, A. (2017). PEMETAAN SEBARAN TERUMBU KARANG DENGAN METODE ALGORITMA LYZENGA SECARA TEMPORAL MENGGUNAKAN CITRA LANDSAT 5 7 DAN 8 (Studi Kasus : Pulau Karimunjawa) (Vol. 6, Issue 2).

- Jamil, S., Rahman, M., & Haider, A. (2021). Bag of features (Bof) based deep learning framework for bleached corals detection. *Big Data and Cognitive Computing*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/bdcc5040053>
- Levy, J., Hunter, C., Lukaczyk, T., & Franklin, E. C. (2018). Assessing the spatial distribution of coral bleaching using small unmanned aerial systems. *Coral Reefs*, 37(2), 373–387. <https://doi.org/10.1007/s00338-018-1662-5>
- Muchtar, M., Suciati, N., & Fatichah, C. (2016). FRACTAL DIMENSION AND LACUNARITY COMBINATION FOR PLANT LEAF CLASSIFICATION. *Jurnal Ilmu Komputer Dan Informasi*, 9(2), 96. <https://doi.org/10.21609/jiki.v9i2.385>
- Ningrum, I. P., Muchtar, M., Saputra, R. A., Sajiah, A. M., Harati, S. R., & Jaya, H. (2020). Fuzzy Logic Methods to Identify Potential Area Mapping for Mangrove Forests in Kendari using Landsat Image. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 797(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/797/1/012019>
- Oliver, J. K., Berkelmans, R., & Eakin, C. M. (2018). *Coral Bleaching in Space and Time* (pp. 27–49). https://doi.org/10.1007/978-3-319-75393-5_3
- Pasrun, Y. P., Muchtar, M., Basyarah, A. N., & Noorhasanah. (2020). Indonesian License Plate Detection Using Morphological Operation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 797(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/797/1/012037>
- Ramadhan, A., Lindawati, & Kurniasari, N. (2016). *NILAI EKONOMI EKOSISTEM TERUMBU KARANG DI KABUPATEN WAKATOBI Economic Value of Coral Reef Ecosystem in the Wakatobi District*.
- Riska, R., Tasabaramo, I. A., Lalang, L., Muchtar, M., & Asni, A. (2022). Kelimpahan Mikroplastik pada Sedimen Ekosistem Terumbu Karang di Pulau Bokori Sulawesi Tenggara. *Jurnal Sumberdaya Akuatik Indopasifik*, 6(4), 331–342. <https://doi.org/10.46252/jsai-fpik-unipa.2022.vol.6.no.4.252>
- Setiawan, F., Muttaqin, A., Tarigan, S. A., Sabil, A., & Pinkan, J. (2017). *PEMUTIHAN KARANG AKIBAT PEMANASAN GLOBAL TAHUN 2016 TERHADAP EKOSISTEM TERUMBU KARANG: STUDI KASUS DI TWP GILI MATRA (GILI AIR, GILI MENO DAN GILI TRAWANGAN) PROVINSI NTB*. <http://jfmr.ub.ac.id>
- Setiyorini, A., Purnama, I. P. N., Sari, J. Y., Muchtar, M., & Ngii, E. (2019). Vehicle number plate identification using template matching algorithm for automatic parking system. *ACM International Conference Proceeding Series*, 196–200. <https://doi.org/10.1145/3330482.3330483>
- Song, H., Mehdi, S. R., Zhang, Y., Shentu, Y., Wan, Q., Wang, W., Raza, K., & Huang, H. (2021). Development of coral investigation system based on semantic segmentation of single-channel images. *Sensors*, 21(5), 1–21. <https://doi.org/10.3390/s21051848>
- Thenu, I. M., & Makailipessy, M. M. (2017). PEMETAAN PERUBAHAN EKOSISTEM WILAYAH PESISIR KECAMATAN DULLAH UTARA KOTA TUAL CHANGE OF COASTAL ECOSYSTEM MAPPING IN NORTH DULLAH SUBDISTRICT TUAL CITY. In *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan* (Vol. 8). <http://glovis.usgs>.
- Yang, R., Wu, M., Bao, Z., & Zhang, P. (2019). Cherry recognition based on color channel transform. *ACM International Conference Proceeding Series*, 292–296. <https://doi.org/10.1145/3349341.3349419>