

**DETEKSI CORAL REEF BLEACHING MENGGUNAKAN CITRA
SATELIT MULTISENSOR RESOLUSI MENENGAH DI PERAIRAN
PLTU PAITON, PROBOLINGGO**

SKRIPSI

Oleh:

LUCIA ASTUTI

NIM. 175080600111002



**PROGRAM STUDI ILMU KELAUTAN
JURUSAN PEMANFAATAN SUMBERDAYA PERIKANAN DAN
KELAUTAN**

FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

MALANG

2021



**DETEKSI CORAL REEF BLEACHING MENGGUNAKAN CITRA
SATELIT MULTISENSOR RESOLUSI MENENGAH DI PERAIRAN
PLTU PAITON, PROBOLINGGO**

SKRIPSI

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Meraih Gelar Sarjana Kelautan
di Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan
Universitas Brawijaya**

Oleh:

LUCIA ASTUTI

NIM. 175080600111002

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



**PROGRAM STUDI ILMU KELAUTAN
JURUSAN PEMANFAATAN SUMBERDAYA PERIKANAN DAN
KELAUTAN
FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG**

2021

SKRIPSI

**DETEKSI CORAL REEF BLEACHING MENGGUNAKAN CITRA SATELIT MULTISENSOR
RESOLUSI MENENGAH DI PERAIRAN PLTU PAITON, PROBOLINGGO**

Oleh:

LUCIA ASTUTI
NIM. 175080600111002

Telah dipertahankan didepan penguji
pada tanggal 23 Desember 2021
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Dosen Pembimbing 1

**Menyetujui,
Dosen Pembimbing 2**

Ir. Bambang Semedi, M.Sc., Ph.D
NIP. 196212201988031004
Tanggal: 3 / 1 / 2022

Dr. Ir. Guntur, MS
NIP.195806051986011001
Tanggal: 3 / 1 / 2022

Mengetahui:
Ketua Jurusan
Pemanfaatan Sumberdaya Perikanan dan Kelautan



Dr. Eng Abu Bakar Sambah, S.Pi, MT
NIP. 197807172005021004
Tanggal: 3 / 1 / 2022



PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Lucia Astuti

NIMtas Brawij : 175080600111002

Judul Skripsi : Deteksi Coral Reef Bleaching Menggunakan Citra Satelit
Multisensor Resolusi Menengah di Perairan PLTU Paiton
Probolinggo

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa penulisan skripsi ini berdasarkan hasil penelitian, pemikiran dan pemaparan asli dari saya sendiri, baik untuk naskah, tabel, gambar maupun ilustrasi lainnya yang tercantum sebagai bagian dari Skripsi.

Jika terdapat karya / pendapat / penelitian dari orang lain, maka saya telah mencantumkan sumber yang jelas dalam daftar pustaka.

Demikian pernyataan ini saya buat, apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Brawijaya, Malang.

Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar tanpa adanya paksaan dari pihak manapun.

Malang, 23 Desember 2021



Lucia Astuti

NIM.175080600111002

IDENTITAS TIM PENGUJI

Judul : Deteksi *Coral Reef Bleaching* Menggunakan Citra Satelit Multisensor Resolusi Menengah di Perairan PLTU Paiton Probolinggo

Nama Mahasiswa : Lucia Astuti

NIM : 175080600111002

Program Studi : Ilmu Kelautan

PENGUJI PEMBIMBING:

Pembimbing 1 : Ir. Bambang Semedi, M.Sc, Ph.D

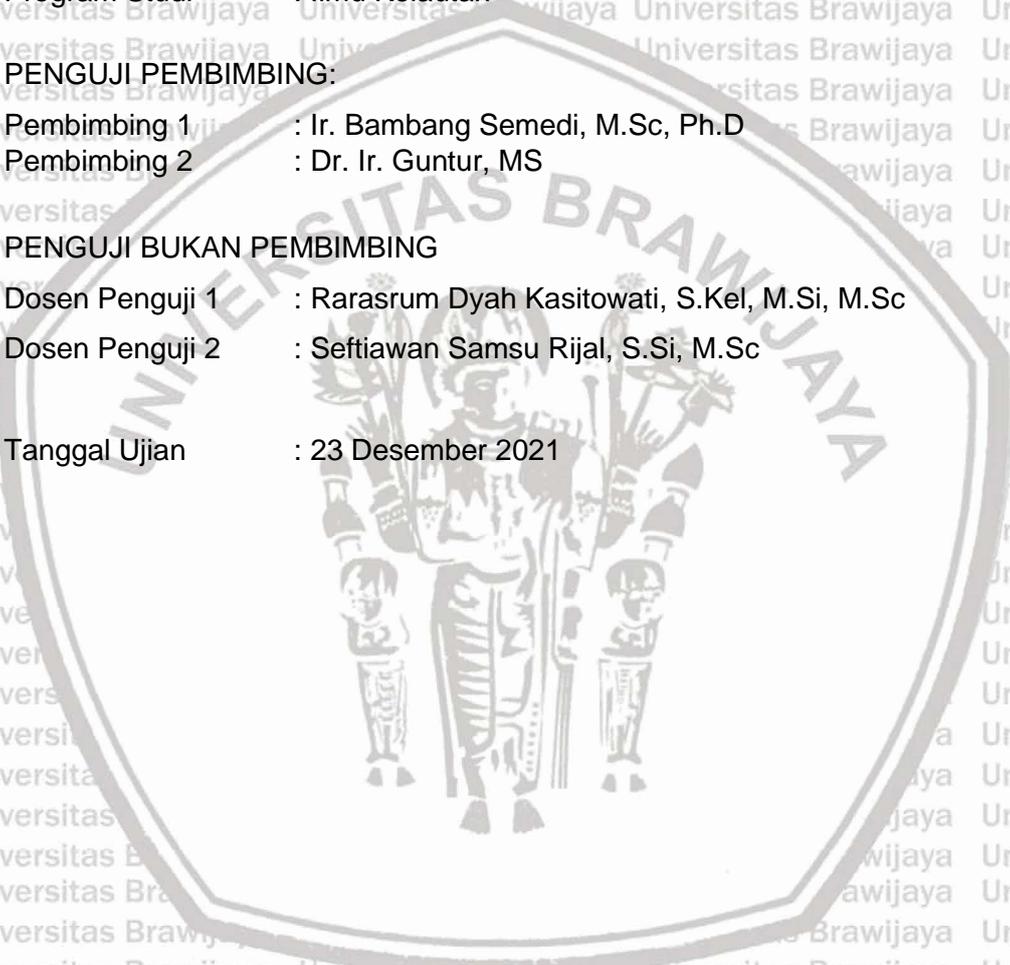
Pembimbing 2 : Dr. Ir. Guntur, MS

PENGUJI BUKAN PEMBIMBING

Dosen Penguji 1 : Rarasrum Dyah Kasitowati, S.Kel, M.Si, M.Sc

Dosen Penguji 2 : Seftiawan Samsu Rijal, S.Si, M.Sc

Tanggal Ujian : 23 Desember 2021



RINGKASAN

LUCIA ASTUTI. Deteksi *Coral Reef Bleaching* Menggunakan Citra Satelit Multisensor Resolusi Menengah di Perairan PLTU Paiton, Probolinggo (dibawah bimbingan **Ir. Bambang Semedi, M.Sc, Ph.D** dan **Dr. Ir. Guntur, MS**)

Perubahan iklim diakui secara internasional sebagai salah satu ancaman terbesar bagi terumbu karang di seluruh dunia, termasuk Indonesia. Kerusakan sering terjadi pada ekosistem terumbu karang akibat dari faktor alami dan buatan. Kerusakan terumbu karang akibat faktor buatan dapat terjadi karena sedimentasi dan pencemaran lingkungan, sedangkan akibat faktor alami dapat disebabkan oleh naik-turunnya suhu permukaan laut. Pemutihan karang massal terjadi di Indonesia pada tahun 2016, termasuk di Perairan PLTU Paiton akibat Fenomena El Nino tahun 2016. Naiknya suhu permukaan laut yang menyebabkan terjadinya pemutihan karang di Perairan PLTU Paiton tidak hanya berasal dari pemanasan global, tetapi terdapat juga pengaruh dari aktivitas PLTU Paiton. Teknologi penginderaan jauh telah diverifikasi sebagai alat yang berguna untuk melakukan pemantauan sumberdaya alam, salah satunya terumbu karang. Deteksi pemutihan terumbu karang menggunakan teknologi penginderaan jauh ini ingin menggambarkan pemantauan pemutihan karang menggunakan citra satelit yang sudah dilakukan koreksi agar mendapatkan hasil yang dapat mempresentasikan gambaran lapang.

Penelitian dilaksanakan pada bulan Juni 2021 hingga November 2021 dengan data primer yang digunakan yaitu berasal dari citra satelit Sentinel-2 *Multi Spectral Imagery* (MSI) untuk deteksi dugaan titik pemutihan karang dan citra satelit Landsat-8 *Surface Reflectance* (SR) untuk nilai sebaran suhu permukaan laut pada periode tahun 2016 – 2020. Pengolahan data deteksi pemutihan karang menggunakan algoritma *lyzhenga* untuk koreksi kedalaman perairan dan memanfaatkan nilai spektrum untuk mendeteksi titik dugaan pemutihan karang dengan nilai untuk *healthy coral* sebesar $0.05 - 0.1 \text{ sr}^{-1}$ dan *bleached coral* sebesar $0.13 - 0.15 \text{ sr}^{-1}$. Data *In Situ* pada penelitian ini yaitu data suhu permukaan laut di beberapa titik pengamatan area PLTU Paiton pada tahun 2020 dan data pemantauan karang dari tahun 2016 – 2020 di 5 lokasi pengamatan yaitu Binor, Mercusuar, *Water Intake*, *Water Discharge* Barat dan *Water Discharge* Timur.

Sebaran pemutihan karang di Perairan PLTU Paiton Probolinggo pada bulan Juli di periode tahun 2016 – 2020 terdeteksi dominan di titik yang jauh dari *outlet* tempat keluarnya air bahang dari PLTU, sedangkan area dekat *outlet* yaitu *Water Discharge* sangat sedikit terdeteksi dugaan pemutihan karang dengan luas pemutihan karang terbesar berada di tahun 2016 dengan luas 1.5 Ha yang dipengaruhi oleh adanya fenomena El-Nino yang terjadi pada periode pertengahan 2015 hingga pertengahan 2016 yang menyebabkan suhu permukaan laut lebih tinggi pada tahun 2016. Hasil pengukuran SPL *in situ* pada tahun 2020 dan sebaran SPL rata-rata citra pada tahun 2016 – 2020 menunjukkan bahwa SPL di perairan PLTU Paiton, khususnya pada *outlet* tempat keluarnya limbah air bahang masih dibawah BML yaitu 33.9 C, sehingga air bahang yang dikeluarkan masih dibawah baku mutu yang ditetapkan.

SUMMARY

LUCIA ASTUTI. Detection of Coral Reef Bleaching Using Medium Resolution Multisensor Satellite Imagery in the Coastal Water of PLTU Paiton, Probolinggo (under the guidance of **Ir. Bambang Semedi, M.Sc, Ph.D** and **Dr. Ir. Guntur, MS**)

Climate change is recognized internationally as one of the biggest threats to coral reefs worldwide, including Indonesia. Damage often occurs in coral reef ecosystems due to natural and artificial factors. Damage to coral reefs due to artificial factors can occur due to sedimentation and environmental pollution, while due to natural factors can be caused by the rise and fall of sea surface temperatures. Mass coral bleaching occurred in Indonesia in 2016, including in the waters of PLTU Paiton due to the El Nino Phenomenon in 2016. The increase in sea surface temperature that causes coral bleaching in the waters of PLTU Paiton does not only come from global warming, but there is also the influence of PLTU Paiton activity. Remote sensing technology has been verified as a useful tool for monitoring natural resources, one of which is coral reefs. Detection of coral reef bleaching using remote sensing technology wants to describe coral bleaching monitoring using satellite images that have been corrected in order to get results that can present a field picture.

The research was carried out from June 2021 to November 2021 with the primary data used from the Sentinel-2 Multi Spectral Imagery (MSI) satellite imagery for the detection of suspected coral bleaching points and the Landsat-8 Surface Reflectance (SR) satellite image for the distribution of surface temperature values. sea in the period 2016 – 2020. Processing of coral bleaching detection data using the lyzhenga algorithm for correction of water depths and utilizing spectrum values to detect suspected coral bleaching points with values for healthy corals of $0.05 - 0.1 \text{ sr}^{-1}$ and bleached corals of $0.13 - 0.15 \text{ sr}^{-1}$. In Situ data in this study are sea surface temperature data at several observation points in the Paiton PLTU area in 2020 and coral monitoring data from 2016 - 2020 at 5 observation locations, namely Binor, Lighthouse, Water Intake, West Water Discharge and East Water Discharge.

The distribution of coral bleaching in the waters of the PLTU Paiton Probolinggo in July in the 2016 – 2020 period was detected dominantly at points far from the outlet where the hot water comes out from the PLTU, while the area near the outlet, namely Water Discharge, was detected very little, with the suspected coral bleaching being the largest. located in 2016 with an area of 1.7 Ha which was influenced by the El-Nino phenomenon that occurred in the mid-2015 to mid-2016 period which caused higher sea surface temperatures in 2016. The results of in situ SST measurements in 2020 and the average SST distribution of images in 2016 - 2020 show that the SST in the waters of PLTU Paiton, especially at the outlet where the waste heat discharges is still below the Environmental Quality Standards (EQS), which is 33.9°C , so that the heat released is still below the specified quality standard.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan dengan baik laporan skripsi dengan judul “Deteksi *Coral Reef Bleaching* Menggunakan Citra Satelit Multisensor Resolusi Menengah Di Perairan PLTU Paiton, Probolinggo” sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar sarjana kelautan di Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Brawijaya, Malang.

Laporan skripsi ini diharapkan dapat menjadi pertimbangan pihak yang terkait untuk melaksanakan penelitian dan penyusunan laporan skripsi ini. Laporan skripsi ini juga diharapkan dapat menjadi pegangan dalam penelitian selanjutnya sekaligus menambah wawasan ataupun gambaran dan informasi mengenai deteksi *coral bleaching* di wilayah Paiton, Probolinggo. Penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan laporan ini. Oleh karena itu, saya berharap kepada berbagai pihak untuk dapat memberikan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk menjadikan laporan ini lebih baik.

Malang, 23 Desember 2021



Lucia Astuti
NIM. 175080600111002

DAFTAR ISI

Halaman

PERNYATAAN ORISINALITAS i

IDENTITAS TIM PENGUJI ii

UCAPAN TERIMA KASIH i

RINGKASAN ii

SUMMARY iii

KATA PENGANTAR iv

DAFTAR ISI v

DAFTAR TABEL vii

DAFTAR GAMBAR viii

BAB I. PENDAHULUAN 1

 1.1 Latar Belakang 1

 1.2 Perumusan Masalah 3

 1.3 Tujuan 3

 1.4 Manfaat 4

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA 5

 2.1 Terumbu Karang 5

 2.2 Pemutihan Terumbu Karang 5

 2.3 PLTU Paiton 6

 2.4 Suhu Permukaan Laut 7

 2.5 Penginderaan Jauh 8

 2.6 Pemetaan Pemutihan Terumbu Karang 9

 2.7 Citra Satelit 10

 2.7.1 Sentinel 2 11

 2.7.2 Landsat 8 12

 2.8 Algoritma Lyzenga 13

 2.9 Penelitian Terdahulu 15

BAB III. METODE PENELITIAN 16

 3.1 Tempat, Waktu/Jadwal Pelaksanaan 16

 3.2 Alat dan Bahan Penelitian 18

 3.2.1 Alat dan Bahan Pengolahan Data 18

 3.3 Prosedur Penelitian 19

 3.4 Metode Pengolahan Data 21

 3.4.1 Google Earth Engine (GEE) 21

 3.4.2 Pengolahan Citra Sentinel 2A MSI 21

 3.4.3 Pengolahan Citra Landsat 8 SR 22



3.4.4	Data Primer	23
3.4.5	Data <i>Coral Reef Watch</i> NOAA.....	24
3.4.6	Analisa.....	24
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....		25
4.1	Kondisi Umum Wilayah Kajian	25
4.1.1	Binor	26
4.1.2	<i>Water Intake</i>	27
4.1.3	<i>Water Discharge</i> Timur	27
4.1.4	<i>Water Discharge</i> Barat	28
4.1.5	Mercusuar	29
4.2	Sebaran Pemutihan Karang Berdasarkan CRW NOAA.....	30
4.3	Hasil Nilai Spektral Citra Sentinel-2.....	34
4.4	Pemetaan Pemutihan Karang dan SPL.....	37
4.4.1	Peta Pemutihan Karang Tahun 2016.....	37
4.4.2	Peta Pemutihan Karang Tahun 2017.....	40
4.4.3	Peta Pemutihan Karang Tahun 2018.....	42
4.4.4	Peta Pemutihan Karang Tahun 2019.....	44
4.4.5	Peta Pemutihan Karang Tahun 2020.....	47
4.5	Pengaruh Fenomena El Nino terhadap Pemutihan Karang.....	49
4.6	Pengaruh Aktivitas PLTU Paiton terhadap Suhu Perairan.....	52
4.7	Adaptasi Terumbu Karang terhadap Peningkatan Suhu PLTU Paiton.....	55
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN.....		57
5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	58
DAFTAR PUSTAKA.....		60
LAMPIRAN		63
Lampiran 1.	Dokumentasi Terumbu Karang Lokasi Binor	63
Lampiran 2.	Dokumentasi Terumbu Karang Lokasi Mercusuar.....	64
Lampiran 3.	Dokumentasi Terumbu Karang Lokasi <i>Water Intake</i>	65
Lampiran 4.	Dokumentasi Terumbu Karang Lokasi <i>Water Discharge</i> Barat.....	66
Lampiran 5.	Dokumentasi Terumbu Karang Lokasi <i>Water Discharge</i> Timur.....	67
Lampiran 6.	<i>Script</i> Deteksi <i>Coral Bleaching</i> <i>Google Earth Engine</i>	68
Lampiran 7.	<i>Script</i> SPL <i>Mapping</i> <i>Google Earth Engine</i>	70



DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 1. <i>Band</i> Sentinel-2 Pemetaan Terumbu Karang.....	12
Tabel 2. Spesifikasi Kanal-kanal Spektral Sensor Pencitra LDCM (Landsat 8) ..	13
Tabel 3. Titik Koordinat Stasiun.....	17
Tabel 4. Alat Pengolahan Data.....	18
Tabel 5. Bahan Pengolahan Data.....	19
Tabel 6. <i>Stress Level Bleaching</i>	33
Tabel 7. Luas Pemutihan Karang pada Tahun 2016 - 2020.....	50



DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 1. Peta Wilayah Kajian Penelitian	16
Gambar 2. Skema Prosedur Penelitian.....	20
Gambar 3. Gambaran umum kondisi terumbu karang di lokasi Binor	27
Gambar 4. Gambaran umum kondisi terumbu karang di lokasi <i>water intake</i>	27
Gambar 5. Gambaran umum kondisi terumbu karang di lokasi <i>water discharge</i> timur	28
Gambar 6. Gambaran umum kondisi terumbu karang di lokasi <i>water discharge</i> barat.....	29
Gambar 7. Gambaran umum kondisi terumbu karang di lokasi Mercusuar	29
Gambar 8. CRW NOAA <i>Daily Global 5km Satellite Version 3</i>	32
Gambar 9. Grafik <i>Stress Level of Coral Reef Bleaching</i>	34
Gambar 10. Sebaran pemutihan karang dan SPL tahun 2016.....	37
Gambar 11. Anomali Suhu. (a) Mei 2016, (b) Juli 2016	38
Gambar 12. Pemutihan Karang di titik WD	39
Gambar 13. Karang-karang bercabang yang mengalami pemutihan (<i>bleaching</i>) pada tahun 2016 dan mampu melakukan <i>recovery</i> pada tahun 2017 – 2020. ...	39
Gambar 14. Sebaran pemutihan karang dan SPL tahun 2017.....	40
Gambar 15. Anomali Suhu Juli 2017	41
Gambar 16. Sebaran pemutihan karang dan SPL tahun 2018.....	42
Gambar 17. Anomali Suhu Juli 2018	43
Gambar 18. Sebaran pemutihan karang dan SPL tahun 2019.....	44
Gambar 19. Anomali Suhu Juli 2019	45
Gambar 20. Sebaran TSS Area WD PLTU Paiton.....	46
Gambar 21. Sebaran pemutihan karang dan SPL tahun 2020.....	47
Gambar 22. Anomali Suhu Juli 2020	48
Gambar 23. Nilai Spektral Lyzenga	35
Gambar 24. Anomali suhu	49
Gambar 25. Grafik Pengaruh Pemanasan Global Terhadap Luas Pemutihan Karang.....	51
Gambar 26. Titik <i>sampling</i> pengambilan suhu air laut.....	52
Gambar 27. Grafik Sebaran SPL <i>In Situ</i> dan Citra Tahun 2020.....	53
Gambar 28. Bentuk Adaptasi Karang di <i>Water Discharge</i>	56

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah negara yang berbentuk kepulauan dengan 70% wilayahnya merupakan lautan (Arini, 2013). Indonesia memiliki sumberdaya alam pesisir dan laut yang melimpah, termasuk sumberdaya terumbu karang (*Global Journal of Science Frontier Research*, 2018) dengan 15% luasan terumbu karang dari seluruh lautan di bumi. Terumbu karang yang terbentang luas di Indonesia mampu melindungi garis pantai kepulauan Indonesia dari aktivitas faktor fisika air laut, seperti gelombang dan arus (Aulia & Sari, 2020.), maka dari itu terumbu karang memiliki peran yang sangat penting dalam melindungi pulau Indonesia.

Karang adalah kumpulan hewan yang berasal dari ordo *Scleractinia* yang menghasilkan kapur, sedangkan terumbu karang adalah kumpulan dari hewan karang yang bersimbiosis dengan *zooxanthellae* yang menghasilkan kalsium karbonat atau kapur. Ekosistem terumbu karang merupakan kumpulan spesies yang saling berinteraksi dengan lingkungan fisik yang terbentuk akibat interaksi antara karang dan *zooxanthellae* (*Global Journal of Science Frontier Research*, 2018). Kerusakan sering terjadi pada ekosistem terumbu karang akibat dari faktor alami dan buatan. Kerusakan terumbu karang akibat faktor buatan dapat terjadi karena sedimentasi dan pencemaran lingkungan, sedangkan akibat faktor alami dapat disebabkan oleh naik-turunnya suhu permukaan laut (SPL) (Rudi, 2012).

Menurut data *Coral Reef Watch NOAA* (2016), pada tahun 2016 di Indonesia terjadi peristiwa pemutihan karang massal di beberapa daerah tertentu yang salah satunya yaitu daerah Probolinggo, tepatnya di Perairan PLTU Paiton. Pengaruh terbesar terjadinya pemutihan karang pada periode *mass bleaching event* adalah kenaikan suhu air laut akibat pemanasan global dan adanya fenomena *El Nino*

pada pertengahan 2015 – pertengahan 2016 (Prasetya *et al.*, 2019). Naiknya suhu permukaan laut yang menyebabkan terjadinya pemutihan karang di Perairan PLTU Paiton tidak hanya berasal dari pemanasan global, tetapi terdapat juga pengaruh dari aktivitas PLTU Paiton.

Di wilayah Probolinggo, terdapat terumbu karang di sepanjang pesisir desa Bhinor dan area sekitar PLTU Paiton yang mana termasuk dalam wilayah kerja PT. Pembangkitan Jawa-Bali (PJB) UP Paiton 1 dan UP Paiton 2. Pengoperasian suatu instalasi pembangkit listrik, seperti PLTU Paiton, umumnya menggunakan air laut sebagai pendingin. Air laut yang berfungsi sebagai pendingin ini dibuang kembali ke laut dengan temperatur yang tinggi. Naiknya suhu temperatur air laut akibat dari proses pembangkit listrik seperti pembuangan air limbah bahang di *cooling channel* di sekitar Perairan PLTU Paiton dapat menghasilkan efluen air panas yang akan menyebabkan meningkatnya suhu permukaan laut dan terjadinya pemutihan karang di perairan tersebut.

Teknologi penginderaan jauh telah diverifikasi sebagai alat yang berguna untuk melakukan pemantauan sumberdaya alam, seperti mangrove, terumbu karang, lamun dan lain-lain. Teknologi penginderaan jauh semakin berkembang seiring dengan diluncurkannya teknologi satelit yang menyediakan data citra satelit terkait dengan informasi permukaan bumi. Citra satelit yang berkembang sampai saat ini salah satunya yaitu citra satelit Sentinel-2. Citra satelit Sentinel-2 menggabungkan beberapa fitur unggulan untuk pemantauan terumbu karang. Sentinel-2 memiliki *blue-band* yang dapat meningkatkan koreksi atmosfer dan memungkinkan pencitraan perairan dangkal di terumbu karang dengan resolusi spasial yang lebih baik yaitu 10 m. Metode deteksi perubahan atau *monitoring* sangat penting dalam beberapa aplikasi terumbu, seperti deteksi pemutihan terumbu karang (Xu *et al.*, 2021).

1.2 Perumusan Masalah

Adapun perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana sebaran pemutihan karang pada tahun 2016 - 2020 di Perairan PLTU Paiton yang diperoleh dari citra satelit multisensor?
2. Bagaimana perubahan luasan pemutihan karang yang terjadi pada tahun 2016 - 2020 di Perairan PLTU Paiton yang diperoleh dari citra satelit multisensor?
3. Bagaimana aktivitas di PLTU Paiton dapat mempengaruhi peningkatan suhu permukaan laut di Perairan PLTU Paiton?

1.3 Tujuan

Berdasarkan perumusan masalah yang telah dikemukakan, tujuan yang akan dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui sebaran pemutihan karang di Perairan PLTU Paiton pada tahun 2016 – 2020 yang diperoleh dari citra satelit multisensor.
2. Mengetahui perubahan luasan daerah yang mengalami pemutihan karang di Perairan PLTU Paiton pada tahun 2016 – 2020 yang diperoleh dari citra satelit multisensor.
3. Mengetahui pengaruh aktivitas di PLTU Paiton terhadap peningkatan suhu permukaan laut di Perairan PLTU Paiton.

1.4 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Memberikan informasi mengenai pengaruh suhu air laut akibat aktivitas di PLTU Paiton terhadap kondisi terumbu karang dan metode pengolahan data citra satelit dalam deteksi pemutihan terumbu karang dan suhu permukaan laut.
2. Meningkatkan pengetahuan mengenai pentingnya penerapan teknologi yaitu penginderaan jauh dalam pemetaan pemutihan terumbu karang di Perairan PLTU Paiton, Probolinggo.



BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Terumbu Karang

Terumbu karang merupakan sekumpulan hewan karang yang membentuk struktur terumbu di dasar perairan. Struktur terumbu karang yang dibentuk berasal dari deposit kalsium karbonat atau CaCO_3 yang telah dihasilkan oleh hewan karang. Terumbu karang memiliki banyak manfaat ekonomi, seperti bertambahnya stok ikan karang, untuk aktivitas pariwisata menyelam dan juga berfungsi sebagai pelindung ekosistem pesisir. Terumbu karang rentan mengalami kerusakan yang disebabkan oleh faktor lingkungan, seperti sedimentasi dan pencemaran lingkungan. Kerusakan terumbu karang juga dapat disebabkan oleh naik atau turunnya suhu permukaan laut (SPL). Peristiwa dari kerusakan terumbu karang yang sering terjadi akibat naiknya suhu permukaan laut melebihi normalnya yaitu pemutihan karang atau *coral bleaching* (Aulia & Sari, 2020).

Ekosistem utama di muka bumi yang tercipta secara alami dan merupakan ekosistem khas daerah tropis yang penyebarannya berada di wilayah Indo-Pasifik Barat adalah terumbu karang. Penyebaran terumbu karang di daerah tropis dikontrol oleh faktor suhu dan sirkulasi permukaan air. Terumbu karang memiliki beberapa manfaat seperti perannya sebagai habitat dari banyak organisme di laut yang memiliki nilai tinggi, sebagai penghasil *income* yang tinggi dibidang turisme, perikanan dan juga sebagai pelindung pesisir dengan menyediakan *barrier* gelombang alami untuk melindungi pantai (Rudi, 2005).

2.2 Pemutihan Terumbu Karang

Pemutihan terumbu karang atau *coral bleaching* merupakan kerusakan yang dialami terumbu karang ketika hubungan simbiosis antara karang dan algae endosimbion yang ada pada karang. Pemutihan karang dapat berdampak pada

kematian karang dan kehancuran ekosistem terumbu karang. Terumbu karang yang mengalami stres dan tekanan dari lingkungan dapat menyebabkan terjadinya pemutihan. Salah satu penyebab terjadinya pemutihan terumbu karang adalah naiknya suhu air laut melebihi normal dalam waktu yang lama. Peristiwa pemutihan terumbu karang menandakan bahwa kondisi lingkungan kehidupan karang sedang tidak baik, akibatnya banyak spesies karang yang mengalami *stress* (Aulia & Sari, 2020).

Pemutihan terumbu karang terjadi akibat pemanasan global yang menyebabkan naiknya suhu permukaan laut melebihi normalnya. Pemanasan global merupakan salah satu ancaman utama bagi terumbu karang. Pemutihan karang menyebabkan karang yang tertekan mengeluarkan alga simbiosisnya, meningkatkan kemungkinan morbiditas dan mortalitas karang selanjutnya (Xu *et al.*, 2021). Kerusakan karang akibat pemutihan juga dapat berdampak pada warna karang, yaitu warna yang memudar dan memutih. Karang yang mengalami pemudaran warna terjadi akibat konsentrasi pigmen hasil fotosintesis *zooxanthellae* pada polip karang mengalami pengurangan, sehingga warna karang akan memutih (Fachrurrozie & Patria, 2012).

2.3 PLTU Paiton

Peristiwa pemutihan karang massal tahun 2010 di Pantai Utara Jawa Timur ternyata terdeteksi di wilayah PLTU Paiton dan Pasir Putih. Di perairan PLTU Paiton terdapat karang yang memutih melebihi 5,15% - 16,48% (Muzaki & Saptarini, 2012). PT. Pembangkitan Jawa-Bali (PJB) Unit Pembangkitan (UP) Paiton adalah perusahaan yang bergerak dalam bidang Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), dimana dalam aktivitasnya membutuhkan batu bara sebagai bahan pembangkit listrik, dan terdapat juga aktivitas pembongkaran batu. Aktivitas dari pembongkaran batu bara dan penimbunan batu bara yang dilakukan oleh

PLTU Paiton dapat menyebabkan meningkatnya suhu permukaan laut, terutama di daerah *Water Discharge* dan *Water Intake* yang merupakan tempat dimana terdapat sistem pendingin yang beroperasi selama operasional pembangkit listrik dan menyebabkan meningkatnya suhu air laut (Laporan *Monitoring* PJB Paiton, 2020).

Suhu dari pembuangan limbah panas yang berasal dari pembangkit listrik biasanya berkisar 8-12 °C lebih tinggi dibandingkan suhu air lingkungan alami.

Pada perairan pesisir tropis, suhu maksimum yang dihasilkan dari pembuangan limbah dapat mencapai 42 °C, meskipun pada umumnya hanya mencapai 35-38

°C. Fluktuasi musiman dan diurnal yang terdapat di beberapa daerah memiliki pengaruh terhadap siklus suhu musiman alami dan siklus operasi atau aktivitas dari pembangkit listrik itu sendiri (Langford, 2001).

2.4 Suhu Permukaan Laut

Kehidupan organisme baik di daratan maupun di perairan sangat dipengaruhi oleh faktor utama yaitu suhu. Setiap organisme hidup mempunyai Batasan-batasan suhu tertentu dalam menyesuaikan dengan lingkungannya masing-masing, sehingga suhu sangat mempengaruhi aktivitas metabolisme dan perkembangbiakan suatu organisme. Suhu permukaan laut adalah salah satu parameter dalam oseanografi yang dapat berubah-ubah yang dapat dideteksi oleh satelit lingkungan dan cuaca. Sensor satelit yang bekerja dalam pengukuran suhu permukaan laut yaitu berada pada spektrum inframerah termal. Pengukuran suhu permukaan laut juga dapat dilakukan secara langsung untuk mendapatkan nilai yang lebih valid lagi menggunakan alat pengukur suhu seperti CTD (*Conductivity Temperature Depth*) dan sebagainya (Wicaksono *et al.*, 2010).

Suhu Permukaan Laut (SPL) merupakan faktor penting dalam pengaturan atau pengendalian cuaca dan iklim yang ada di Indonesia. Perubahan cuaca

ataupun iklim ditandai dengan peningkatan temperature secara global, diikuti dengan suhu permukaan laut yang juga mengalami peningkatan. Perubahan suhu permukaan laut mempengaruhi perubahan *Intertropical Convergence Zone* (ITCZ) yang dapat menyebabkan perubahan musim dari musim normalnya. Suhu permukaan laut dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti gelombang, arus, Gerakan konveksi, divergensi, *upwelling*, dan pencairan ataupun pembekuan es di daerah kutub (Habibie & Nuraini, 2014).

2.5 Penginderaan Jauh

Penginderaan jauh merupakan teknologi yang memiliki cakupan luas dari beberapa bidang, seperti pertanian hingga perkotaan, geosains untuk penanggulangan bencana dan keperluan untuk pemetaan sumberdaya alam. Teknologi penginderaan jauh dapat digunakan untuk perencanaan dan pengelolaan sumber daya alam di laut dan pesisir, seperti mangrove, lamun, terumbu karang. Teknologi penginderaan jauh telah diverifikasi sebagai alat yang berguna untuk memantau terumbu karang. Data penginderaan jauh dengan resolusi spasial dan spektral yang tinggi akan membantu dalam pemetaan habitat bentik secara cukup rinci dengan akurasi yang lebih tinggi. Dalam 40 tahun terakhir, instrumen satelit yang digunakan untuk aplikasi terumbu karang telah berkembang secara signifikan dari generasi ke generasi (Xu *et al.*, 2021).

Penginderaan jauh merupakan teknologi yang digunakan untuk memperoleh informasi mengenai permukaan bumi, baik darat maupun laut dan atmosfer dari jarak yang jauh. Kebanyakan penginderaan jauh satelit menggunakan salah satu dari dua jenis sensor yaitu pasif dan aktif. Sensor pasif mendeteksi radiasi alam yang dipancarkan atau dipantulkan oleh suatu objek, sedangkan sensor aktif memancarkan energi untuk memindai objek, kemudian mendeteksi dan mengukur radiasi yang dipantulkan atau dipantulkan kembali dari target. Teknik

penginderaan jauh satelit dapat, bergantung pada karakteristik orbit *platform*, pengukuran berkelanjutan dan terkini dengan cakupan wilayah yang luas. Teknik penginderaan jauh mengandalkan observasi in-situ untuk pengembangan dan validasi algoritma (Tang *et al.*, 2009).

2.6 Pemetaan Pemutihan Terumbu Karang

Pemetaan pemutihan terumbu karang dilakukan untuk memantau dan mendeteksi karang yang telah mengalami kerusakan yaitu pemutihan karang akibat kenaikan suhu permukaan laut melebihi normalnya. Pemetaan pemutihan karang lebih efisien dilakukan karena dapat menghemat waktu dan biaya dibandingkan pengamatan secara langsung di lapangan. Data penginderaan jauh dengan resolusi spasial dan spektral yang tinggi akan membantu dalam pemetaan pemutihan terumbu karang secara cukup rinci dengan akurasi yang lebih tinggi. Penginderaan jauh terumbu karang dapat meningkat dengan munculnya misi Copernicus Sentinel-2. Mirip dengan Landsat 8, satelit ini memiliki kanal (*band*) biru yang dapat meningkatkan koreksi atmosfer dan memungkinkan pencitraan perairan dangkal di terumbu karang, tetapi dengan resolusi spasial yang lebih halus yaitu 10 m. Sentinel-2 memiliki periode cakupan yang singkat yaitu Kembali ke zona pesisir setiap lima hari, sehingga memfasilitasi penggunaan rangkaian waktu atau metode deteksi perubahan yang sangat penting dalam beberapa aplikasi terumbu, seperti deteksi pemutihan terumbu karang (Xu *et al.*, 2021).

Teknologi penginderaan jauh dimasa sekarang sangatlah dibutuhkan untuk melakukan pemantauan sumberdaya alam di darat maupun laut. Pemantauan kerusakan sumberdaya alam perlu dilakukan untuk mengetahui seberapa besar kerusakan yang terjadi akibat faktor alam maupun buatan terhadap sumberdaya alam seperti karang, yaitu diperlukannya pemetaan untuk mendeteksi pemutihan karang. Pemetaan untuk deteksi pemutihan karang lebih direkomendasikan untuk

menggunakan citra satelit Sentinel-2. Sentinel-2 memiliki 5 kanal (*band*) yang secara konsisten mengungguli SPOT-4 dan Landsat ETM+. Kemampuan untuk mendeteksi pemutihan di air dangkal dapat dilakukan menggunakan citra Sentinel-2, tetapi dengan jangkauan kedalaman yang terbatas yakni 0 – 10 meter (Hedley *et al.*, 2012).

2.7 Citra Satelit

Data penginderaan jauh satelit merupakan salah satu data yang didapatkan untuk memperoleh fenomena alam di permukaan bumi yang didapat melalui perangkat media atau sensor yang terdapat pada pesawat atau satelit. Data penginderaan jauh tersebut disebut dengan satelit sumber alam. Data yang didapat dari citra satelit tersebut adalah fenomena-fenomena alam yang terjadi di permukaan bumi, seperti kondisi permukiman atau urban, kerusakan hutan, pengembangan pertanian, kelautan dan sebagainya. Kemampuan dan keunggulan dalam menghasilkan ataupun memetakan gambarnya tergantung dari setiap karakteristik satelitnya, seperti resolusi spasial dan resolusi temporalnya (Suwargana, 2013).

Data citra satelit merupakan salah satu informasi dasar yang dapat menggambarkan suatu lokasi kawasan, seperti kawasan terdeforestasi, vegetasi yang sehat dan sebagainya. Penginderaan jauh satelit memiliki kemampuan yang sinoptik, multitemporal, dan multi-spektral, selain itu dapat secara efektif memberikan informasi yang dapat dipercaya dalam penggambarannya (Farid Muhsoni, 2018). Karakteristik utama citra (*image*) dalam penginderaan jauh yaitu adanya rentang kanal (*band*), adanya panjang gelombang elektromagnetik (*electromagnet wavelength*) yang dimilikinya.

2.7.1 Sentinel 2

Citra satelit memiliki kemampuan untuk memperoleh informasi permukaan bumi, dimana memiliki hasil yang bervariasi mulai dari citra dengan resolusi spasial dan resolusi spektral yang rendah hingga tinggi. Jenis citra satelit yang telah berkembang sampai saat ini salah satunya adalah citra satelit Sentinel-2. Citra satelit Sentinel-2 termasuk dalam citra satelit yang gratis dan saat ini menjadi alternatif baru dalam memperoleh informasi permukaan bumi dikarenakan mudah didapatkan. Citra Sentinel-2 memiliki kualitas data citra yang mempunyai resolusi spasial yang lebih baik yaitu $10 \times 10 \text{ m}^2$ setiap pikselnya, jika dibandingkan dengan citra *open source*, seperti citra Landsat yang hanya memiliki resolusi spasial $30 \times 30 \text{ m}^2$ setiap pikselnya (Mastu *et al.*, 2018).

Pemutihan karang telah dilakukan pemantauan menggunakan sensor satelit multispektral, seperti Landsat TM 30-m dan IKONOS 4-m, namun demikian potensi dari sensor 10-m Sentinel-2 (S2), yang diluncurkan oleh *European Space Agency* (ESA) dan digunakan untuk memetakan terumbu karang tropis dangkal, termasuk pemutihan karang terbukti menghasilkan peta yang lebih baik dibandingkan citra satelit Landsat dan IKONOS. Sentinel-2 multispektral memberikan informasi dengan resolusi spasial tinggi yaitu 10 m dan resolusi temporal yaitu 10 hari (Collin *et al.*, 2018). Pemetaan terumbu karang menggunakan citra satelit Sentinel-2 digunakan beberapa spektrum dari empat *band* dari Sentinel-2 (Tabel 1).

Tabel 1. *Band Sentinel-2* Pemetaan Terumbu Karang

<i>Band Number</i>	<i>Central Wavelength</i>	<i>Bandwidth</i>
2	490	65
3	560	35
4	665	30
8	842	115

Sumber : (Collin *et al.*, 2018)

2.7.2 Landsat 8

Sejak tahun 1972, citra multispektral telah banyak diluncurkan, dari sensor Sistem Pemindai Multispektral (MSS, Landsat-1/2/3), Thematic Mapper (TM, Landsat-4/5) dan Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+, Landsat-7), kemudian Landsat-8 OLI yang merupakan citra satelit dengan resolusi menengah yang diluncurkan pada 11 Februari 2013. Satelit pemantauan bumi ini memiliki dua sensor yaitu sensor *Operational Land Imager* (OLI) dan *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Kedua sensor ini menyediakan resolusi spasial 30 meter (*visible*, NIR, SWIR), 100 meter (*thermal*), dan 15 meter (pankromatik). Landsat-8 OLI berada dalam datum *World Geodetic System* (WGS84) dalam format GeoTIFF dan diproyeksikan menggunakan sistem *Universal Transverse Mercator* (Du *et al.*, 2014).

Landsat 8 merupakan salah satu satelit terbaru yang dapat menghasilkan data citra satelit untuk penginderaan jauh dalam pengolahannya, citra satelit bisa dilakukan pengolahan menggunakan algoritma atau persamaan. Citra ini mempunyai beberapa sensor *onboard operational land imager* (OLI) dan *thermal infrared sensor* (TIRS) dengan jumlah banyaknya kanal 11, dimana setiap kanal tersebut, 9 kanal (band 1-9) berada pada OLI dan (band 10-11) berada pada TIRS



(Andana, 2015). Berikut ini merupakan spesifikasi tiap kanal pada citra Landsat 8 (Tabel 2).

Tabel 2. Spesifikasi Kanal-kanal Spektral Sensor Pencitra LDCM (Landsat 8)

Band	Panjang Gelombang (mikrometer)	Resolusi (meter)
<i>Band 1 – Coastal aerosol</i>	0.43 – 0.45	30
<i>Band 2 – Blue</i>	0.45 – 0.51	30
<i>Band 3 – Green</i>	0.53 – 0.59	30
<i>Band 4 – Red</i>	0.64 – 0.67	30
<i>Band 5 – Near Infrared (NIR)</i>	0.85 – 0.88	30
<i>Band 6 – SWIR 1</i>	1.57 – 1.65	30
<i>Band 7 – SWIR 2</i>	2.11 – 2.29	30
<i>Band 8 – Panchromatic</i>	0.50 – 0.68	15
<i>Band 9 – Cirrus</i>	1.36 – 1.38	30
<i>Band 10 – Thermal Infrared (TIRS) 1</i>	10.60 – 11.19	100
<i>Band 11 – Thermal Infrared (TIRS) 2</i>	11.50 – 12.51	100

Sumber: (Andana, 2015)

2.8 Algoritma Lyzenga

Algoritma Lyzenga merupakan salah satu metode yang telah diterapkan dan dikembangkan untuk memperoleh informasi bentuk akuatik pesisir. Klasifikasi citra yang menerapkan algoritma Lyzenga menunjukkan visibilitas objek air *baseline* yang lebih mudah dikenali menggunakan *Depth Invariant Index (DII)*. Metode Lyzenga telah banyak terdapat di penelitian-penelitian untuk memetakan material dasar penutup dasar perairan dangkal. Algoritma Lyzenga digunakan untuk mendapatkan citra yang memberikan tampilan yang lebih jelas dari gambar tipe

dasar perairan. Penerapan algoritma Lyzenga yaitu dengan mencari koefisien atenuasi akuatik (k_i/k_j) terlebih dahulu untuk diketahui nilainya, kemudian algoritma diterapkan dalam proses mendapatkan citra baru (Thalib *et al.*, 2018).

Algoritma Lyzenga atau yang disebut juga *Depth-Invariant Index* (DII) merupakan metode pendekatan yang dilakukan untuk mengetahui informasi mengenai kondisi dan fenomena yang ada di bawah permukaan air. Pendekatan yang dilakukan yaitu menggabungkan logaritma natural dua kanal dari sinar tampak, kemudian akan didapat citra baru yang memperlihatkan dasar perairan yang informatif. Algoritma Lyzenga memiliki fungsi yaitu mereduksi pengaruh kolom perairan terhadap kedalaman tertentu dikarenakan citra satelit tidak dapat mengamati pantulan dasar perairan yang dipengaruhi oleh serapan dan hamburan yang ada pada lapisan permukaan air (Irawan *et al.*, 2017).

Pemetaan perairan dangkal seperti pemetaan sebaran terumbu karang dapat dilakukan dengan menajamkan citra dengan menggunakan algoritma lyzenga yang dapat dilihat pada persamaan (1), (2) dan (3).

$$Y = (\ln \text{band1}) + \left(\frac{K_i}{K_j}\right) \times \ln \text{band2} \dots (1)$$

Y = citra hasil ekstraksi dasar perairan

Band 1 = nilai reflektansi kanal biru

Band 2 = nilai reflektansi kanal hijau

K_i/K_j = nilai koefisien atenuasi

dimana:

$$\frac{K_i}{K_j} = \alpha + (\alpha + 1)^{1/2} \dots (2)$$

dimana:

$$\alpha = \frac{(\text{varian band 1} - \text{varian band 2})}{(2 \times \text{covarian band 1 dan band 2})} \dots (3)$$

Varian = nilai ragam dari nilai digital

Covarian = nilai koefisien keragaman dari nilai digital



α = variable varians dan kovarians

2.9 Penelitian Terdahulu

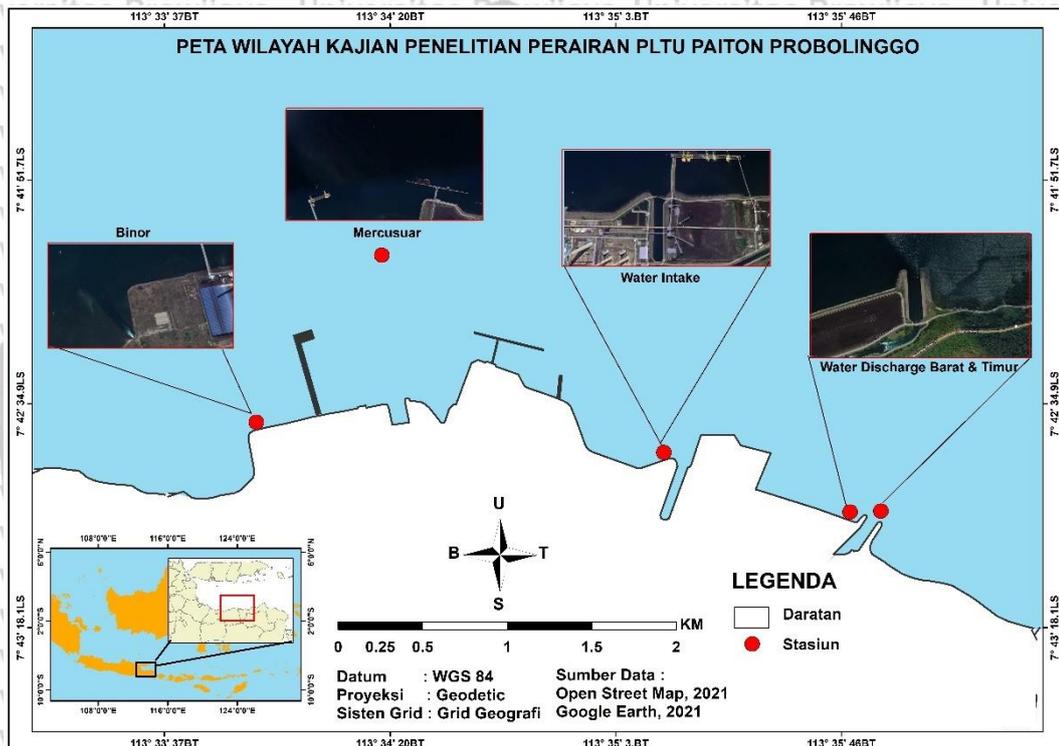
Penelitian terdahulu digunakan sebagai acuan untuk melakukan penelitian skripsi. Penelitian pertama yang menjadi dasar acuan penelitian ini berasal dari jurnal dengan penulis *Xu et al.*, 2021 dengan judul penelitian yaitu *Detection of Coral Reef Bleaching Based on Sentinel-2 Multi-Temporal Imagery: Simulation and Case Study* dengan metode penelitian kuantitatif menggunakan pendekatan *Depth Invariant Index* (DII) dan spektrum citra Sentinel-2 untuk mendeteksi area yang mengalami pemutihan dalam kurun waktu 2015 – 2016 yang berlokasi di *Great Barrier Reef*, Australia. Hasil penelitian tersebut adalah peta area pemutihan karang dan analisis perubahannya dalam kurun waktu 2 tahun (2015 – 2016) di *Great Barrief Reef*, Australia.

Penelitian kedua yang juga menjadi acuan dalam penelitian ini berasal dari jurnal dengan penulis *Jaelani et al.*, 2016 dengan judul penelitian *Studi Pemetaan Pemutihan Terumbu Karang Dengan Citra Resolusi Tinggi (Studi Kasus: Perairan PLTU Paiton Probolinggo)* dengan metode penelitian kuantitatif menggunakan pendekatan penginderaan jauh dan data lapangan untuk mengidentifikasi *spot* dugaan karang yang mengalami pemutihan pada saat *mass bleaching event* yang terjadi pada tahun 2010. Hasil penelitian tersebut adalah peta area pemutihan karang dan luasan total pemutihan karang pada tahun 2010 di Perairan PLTU Paiton, Probolinggo.

BAB III. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat, Waktu/Jadwal Pelaksanaan

Penelitian ini mengkaji perairan Probolinggo, khususnya Wilayah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton (Gambar 1) dengan waktu penelitian yaitu pada bulan Juli 2016-2020.



Sumber Peta Dasar: *Open Streetmap*, 2021.

Gambar 1. Peta Wilayah Kajian Penelitian

Terdapat 5 stasiun pengamatan *spot coral reef bleaching* di Perairan PLTU Paiton yaitu Binor, Mercusuar, *Water Intake*, *Water Discharge Barat* dan *Water Discharge Timur*. Faktor pemilihan 5 stasiun pengamatan di PLTU Paiton ini yaitu karena suhu perairan yang cenderung tinggi, terutama di sekitar *Water Discharge Barat* dan *Water Discharge Timur* dengan kedalaman 2-5 meter, dimana terumbu karang dapat tetap hidup, walaupun terdapat juga yang mengalami kerusakan yaitu adanya beberapa *spot* pemutihan karang (Jaelani & Afifi, 2016). Faktor dalam

pemilihan stasiun Binor karena lokasi Binor lebih sedikit terpengaruh oleh massa air bersuhu tinggi dari kanal *Water Discharge* karena area nya berada di barat dengan kedalaman 0-3 meter, sedangkan stasiun pengamatan *Water Intake* dipilih karena merupakan tempat masuknya air laut yang digunakan sebagai pendingin dan pengaruh air bahang nya lebih banyak karna lebih dekat dari *outlet cannal* dengan kedalaman 3-8 meter. Faktor pemilihan stasiun terutama di dekat Mercusuar karena stasiun ini termasuk dalam perairan bebas yang tidak terkena pengaruh dari massa air bersuhu tinggi dari *outlet cannal* dan stasiun Mercusuar juga memiliki kedalaman terumbu karang terdalam yakni 6-12 meter, sehingga terdapat keragaman kedalaman dari kedalaman terdangkal sampai terdalam dengan koordinat lokasi stasiun pengamatan (Tabel 3).

Tabel 3. Titik Koordinat Stasiun

Stasiun	Garis Bujur	Garis Lintang
Binor	113° 33' 54 BT	7° 42' 38.5 LS
Mercusuar	113° 35' 12 BT	7° 42' 44.3 LS
<i>Water Intake</i>	113° 35' 48 BT	-7° 42' 55.8 LS
<i>Water Discharge</i> Timur	113° 35' 54 BT	-7° 42' 55.6 LS
<i>Water Discharge</i> Barat	113° 34' 18 BT	7° 42' 6.31 LS



3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Berikut ini merupakan sub-bab mengenai alat dan bahan yang digunakan dalam menunjang pelaksanaan penelitian. Alat dan bahan berikut ini merupakan alat dan bahan yang digunakan dalam pengolahan data.

3.2.1 Alat dan Bahan Pengolahan Data

Alat dan bahan (Tabel 4 & Tabel 5) digunakan pada tahapan pengolahan data penelitian.

Tabel 4. Alat Pengolahan Data

No	Nama Alat	Spesifikasi	Fungsi
1	Laptop	Acer Aspire 3 A314-41-983D	Melakukan pengolahan data penelitian serta penyusunan laporan skripsi.
2	Microsoft Word	Microsoft Office 2016	Perangkat lunak untuk menyusun laporan skripsi
3	Microsoft Excel	Microsoft Office 2016	Perangkat lunak untuk melakukan perhitungan statistik data penelitian
4	ArcMap	ArcGIS version 10.3	Membuat peta lokasi dan peta hasil penelitian.

Tabel 5. Bahan Pengolahan Data

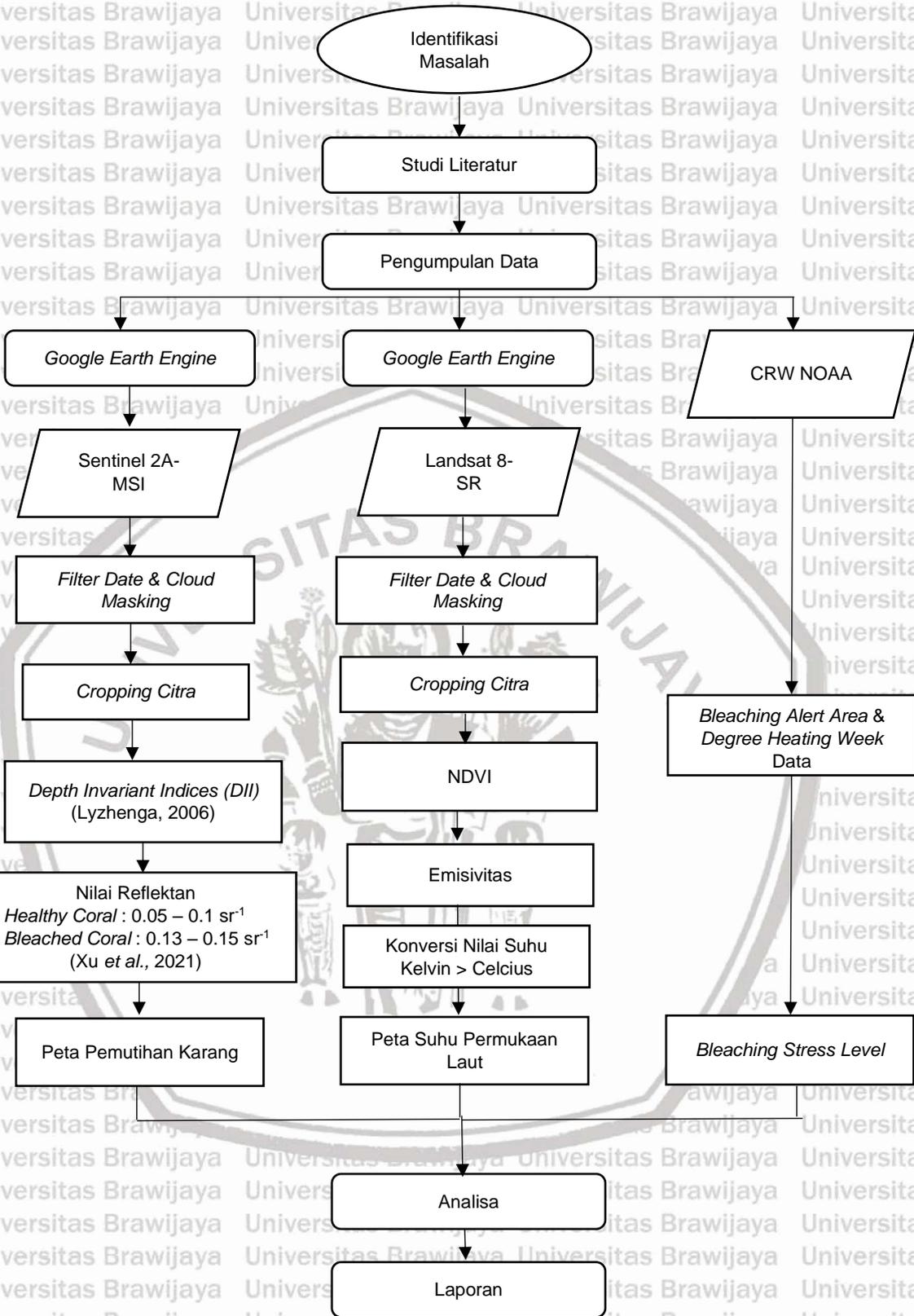
No	Nama Bahan	Spesifikasi	Fungsi
1	Sentinel 2A <i>Multispectral Imagery</i>	Level 1C, Resolusi: 10 meter	Untuk pengolahan data sekunder serta penyusunan laporan skripsi.
2	Landsat 8	<i>Surface Reflectance</i>	Untuk pengolahan data sekunder serta penyusunan laporan skripsi.
3	<i>Open Street Map</i>	Kabupaten Probolinggo, Skala: 1:25.000	Data Rupa Bumi Indonesia yang digunakan untuk pembuatan peta

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan melalui pendekatan visual yaitu penginderaan jauh dengan dilakukannya pengolahan data citra satelit.

Penelitian diawali dengan mengidentifikasi masalah dimana masalah yang dikaji yaitu mengenai deteksi pemutihan karang menggunakan teknik penginderaan jauh, serta studi literatur sebagai perbandingan atau referensi dari penelitian sebelumnya. Tahapan skema prosedur (Gambar 2) dalam melakukan penelitian.





Gambar 2. Skema Prosedur Penelitian

3.4 Metode Pengolahan Data

Metode pengolahan data hanya menggunakan data primer yaitu data berdasarkan citra satelit Sentinel-2 dan Landsat 8. Pengunduhan data primer disesuaikan yaitu pada tanggal 16 Juli pada periode tahun 2016 – 2020.

Pengolahan data citra satelit dilakukan menggunakan pendekatan visual yaitu penginderaan jauh dengan menggunakan citra Sentinel 2 MSI dan citra Landsat 8

SR yang diolah menggunakan *platform Google Earth Engine (GEE)*.

3.4.1 Google Earth Engine (GEE)

Google Earth Engine (GEE) adalah sebuah *platform* berbasis *cloud* untuk menganalisa data geospasial terutama data raster. Keuntungan menggunakan GEE antara lain, dapat dengan mudah mengolah citra tanpa mengunduh terlebih dahulu, GEE tidak memerlukan komputer dengan spesifikasi tinggi karena *processing data* berjalan secara *cloud* dan paralel di *server* Google dan GEE memiliki banyak algoritma data *processing* yang cukup banyak dan terus disempurnakan oleh *Google Engineer* dan diuji oleh komunitas, sehingga algoritma tersebut menjadi semakin baik dan teruji.

3.4.2 Pengolahan Citra Sentinel 2A MSI

Pengolahan data citra Sentinel 2 MSI di *google earth engine* dimulai dengan tahapan *pre-processing* yang terdiri dari pemilihan citra satelit yang digunakan, yaitu Sentinel 2 MSI Level 2A dan memilih tanggal perekaman. Tahapan setelahnya yaitu melakukan *masking* terhadap awan agar citra lebih jelas dan gangguan awan hilang. Tahapan selanjutnya yaitu *cropping* citra sesuai dengan area yang dikaji. Tahapan berikutnya yaitu dilakukan transformasi citra untuk mengetahui indeks kedalaman menggunakan metode *Depth Invariant Indices (DII)* dengan acuan metode Lyzenga (Lyzenga, 2006). Proses pengolahan data citra Sentinel 2 MSI menghasilkan peta pemutihan karang. Proses DII menggunakan

metode Lyzenga dan didasarkan pada pemahaman bahwa redaman pantulan mendekati eksponensial terbalik dengan kedalaman air yang dapat dilihat pada persamaan (6).

$$\text{Kedalaman} - \text{index invariant } ij = \ln(R_i) - (K_i / K_j) \ln \dots \quad (6)$$

Dimana R_i dan R_j masing-masing adalah reflektansi dari band i dan j . K_i / K_j adalah koefisien atenuasi rasio. Untuk substrat unik (pasir), K_i / K_j adalah gradien dari garis regresi yang dihasilkan oleh $\ln(R_i)$ dan $\ln(R_j)$ pada berbagai kedalaman. Band 2 dan 3 dari Sentinel-2 dipilih untuk menghitung DII.

Algoritma Lyzenga diterapkan untuk melakukan koreksi kolom air. Hal ini bertujuan agar efek kedalaman air menghilang dan bisa dilakukan proses selanjutnya yaitu proses klasifikasi. Proses klasifikasi dilakukan untuk mengidentifikasi spot dugaan terjadinya karang yang mengalami pemutihan dan selanjutnya dilakukan proses analisa pemetaan pemutihan terumbu karang.

Pengkoreksian kolom perairan menggunakan metode *Depth Invariant Index* (DII) menghasilkan nilai reflektan yang sudah terkoreksi kedalaman atau diasumsikan kedalaman perairan sudah tidak mempengaruhi besarnya nilai reflektan yang dihasilkan oleh citra Sentinel-2. Besar nilai reflektan yang digunakan untuk mendeteksi *healthy coral* yaitu sebesar $0.05 - 0.1 \text{ steradian}^{-1} \text{ (sr}^{-1})$ dan *bleached coral* sebesar $0.13 - 0.15 \text{ steradian}^{-1} \text{ (sr}^{-1})$ (Xu et al., 2021).

3.4.3 Pengolahan Citra Landsat 8 SR

Pengolahan data citra Landsat 8 *Surface Reflectance* di *google earth engine* dimulai dengan tahapan *pre-processing* yang terdiri dari pemilihan citra satelit yang digunakan, yaitu Landsat 8 *Surface Reflectance*, selanjutnya akan muncul beberapa tanggal perekaman. Tahapan selanjutnya yaitu memilih tanggal perekaman citra yang memiliki *cloud cover* terkecil agar *noise* tidak banyak.

Tahapan selanjutnya yaitu *cropping citra* sesuai dengan area yang dikaji. Tahapan

berikutnya yaitu menghitung spektral *thermal (brightness temperature)* pada band 10 dengan resolusi yang sudah di *resampled* menjadi 30 meter. Tahapan selanjutnya yaitu menghitung NDVI (*Normal Difference Vegetation Index*) untuk menghitung biomasa atau kondisi vegetasi di bawah laut dengan persamaan (7).

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \dots (7)$$

Dimana NIR adalah reflektan kanal *Near Infrared* dan R adalah reflektan kanal merah. Tahapan berikutnya yaitu mendapatkan nilai SPL dengan mengetahui nilai emisivitasnya dengan persamaan (8).

$$\varepsilon = mPv + n \dots (8)$$

Dimana ε adalah emisivitas, m dan n memiliki nilai 0.004 dan 0.986, sedangkan Pv adalah nilai proposional vegetasi berdasarkan NDVI. Selanjutnya yaitu merubah satuan suhu Kelvin menjadi Celcius dengan persamaan (9).

$$(Tb / (1 + (0.00115 * (Tb / 1.438)) * \log(Ep))) - 273.15 \dots (9)$$

Dimana Tb adalah *thermal band 10*, Ep adalah nilai emisi dari perhitungan suhu (kelvin). Tahapan terakhir yaitu melakukan *export* peta suhu permukaan laut yang telah terdapat nilai suhunya.

3.4.4 Data Primer

Penelitian ini didukung oleh data primer yaitu data citra satelit Sentinel 2 untuk sebaran pemutihan karang, Landsat 8 untuk suhu permukaan laut dan data *real time* dari *Coral Reef Watch* NOAA sebagai bahan pendukung penelitian. PT. PJB Paiton, di masa *pandemic* ini melarang untuk datangnya mahasiswa PKL ataupun penelitian, sehingga data untuk penelitian ini terbatas, dengan data primer penelitian ini adalah data yang bersumber dari citra satelit. Akan tetapi, terdapat data yang disediakan dari PT. PJB seperti data hasil *monitoring* karang dan suhu permukaan laut di beberapa titik pengamatan.

3.4.5 Data Coral Reef Watch NOAA

Data Coral Reef Watch NOAA dibutuhkan untuk memantau anomali SST global, yang dapat menghasilkan peta 'HotSpots' pemutihan karang hampir *real-time* dengan resolusi 0,5 derajat (50 km) yang sekarang telah mengalami pembaruan dengan resolusi 5 km. Anomali *HotSpot* dijumlahkan untuk memperkirakan *degree heat week* (DHW) untuk memprediksi pemutihan. DHW mengukur akumulasi tekanan panas yang dialami oleh karang dan menjumlahkan HotSpot 1°C atau lebih besar selama periode 12 minggu. *Bleaching Alert Area* (BAA) maksimum 7 hari mengidentifikasi area dimana tekanan panas pemutihan memenuhi atau melampaui tingkat yang telah ditentukan, berdasarkan nilai *HotSpot* dan DHW selama periode waktu tujuh hari terakhir (Liu et al., 2017). Data CRW NOAA memiliki resolusi sangat jauh, sehingga fokus pengamatan pada penelitian ini adalah Perairan Probolinggo.

3.4.6 Analisa

Metode analisa yang digunakan pada penelitian ini adalah analisa deskriptif. Analisa deskriptif mendeskripsikan mengenai kondisi lapangan yang sesungguhnya dengan menganalisis hasil dari pengolahan data dengan menyajikan data dalam bentuk tabel, diagram ataupun grafik. Analisis data dalam penelitian ini kurang lebih secara keseluruhan menggunakan data citra satelit. Hal ini dikarenakan keterbatasan data lapang, karena dari pihak PT. PJB masih terdapat larangan untuk melakukan penelitian secara langsung disana. Analisis hasil data yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu mengenai nilai spektral pemutihan karang, karang hidup, *stress level bleaching* dan luas pemutihan karang di tahun 2016-2020, menganalisis kondisi terumbu karang di 5 stasiun, serta keterkaitan pemutihan karang dan suhu permukaan laut di Perairan PLTU Paiton.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Umum Wilayah Kajian

Secara geografis, Perairan dan Pesisir PLTU Paiton terletak di Desa Bhinor, Paiton, Kabupaten Probolinggo dengan luas area kurang lebih 750 Ha dan termasuk dalam perairan Selat Madura. Berdasarkan letak geografis tersebut, faktor hidrooseanografi perairan Selat Madura seperti gelombang, arus dan pasang surut sangat mempengaruhi Perairan Paiton. Karakteristik perairan Selat Madura yaitu perairan yang tenang, tinggi gelombang dan frekuensi yang relatif rendah dan panjang gelombang yang pendek. Perairan Paiton termasuk perairan yang tertutup, sehingga pola gelombang sangat dipengaruhi oleh bangkitan angin (Laporan *Monitoring* PJB Paiton, 2020).

PT. Pembangkitan Jawa-Bali (PT. PJB) adalah sebuah anak perusahaan dari PLN BUMN yang terletak di Perairan dan Pesisir Paiton, yang merupakan produsen listrik yang menyuplai kebutuhan listrik di Banten, DKI Jakarta, Jawa Barat, Yogyakarta, Jawa Timur dan Bali. PT. Pembangkitan Jawa-Bali (PT. PJB) memiliki 2 unit perusahaan yaitu UP Paiton 1 dan UP Paiton 2, dimana *Cooling Water Intake* berada di UP Paiton 1 dan *Cooling Water Discharge* berada di UP Paiton 2.

Kondisi suhu perairan di sekitar PLTU Paiton dipengaruhi oleh air bahang yang keluar dari sistem pendingin yaitu *Canal Cooling Water Discharge*. Sistem kerja pendingin di PLTU Paiton yaitu air laut dengan suhu 28 °C - 29 °C masuk melalui *Canal Cooling Water Intake* yang berfungsi untuk mendinginkan uap yang keluar dari turbin uap yang telah di kondensasikan dalam kondensor. Selanjutnya, air laut tersebut dibersihkan dengan sistem pendingin yang kemudian disirkulasikan oleh pompa air pendingin dan dikembalikan ke laut melalui *Canal*

Cooling Water Discharge. *Water discharge* ini mengeluarkan limbah yaitu air bahang dengan suhu diatas 34 °C yang kemudian bercampur dengan suhu air laut.

Suhu tinggi yang keluar dari *Canal Water Discharge* dapat mempengaruhi transparansi air sehingga dapat menyebabkan sedimentasi perairan di wilayah PLTU Paiton tersebut (Laporan *Monitoring* PJB Paiton, 2020).

Perairan PLTU Paiton di sekitar wilayah kerja UP Paiton 1 dan UP Paiton 2 memiliki terumbu karang di sepanjang area PLTU Paiton tersebut sampai dengan pesisir Desa Binor, Kecamatan Paiton, Probolinggo. Pada studi ini, pengamatan kondisi terumbu karang dilakukan di area sekitar kanal *Water Intake*, kanal *Water Discharge*, sekitar area Desa Bhinor (Kecamatan Paiton, Probolinggo) dan Mercusuar. Gugusan terumbu karang di perairan sekitar PLTU Paiton termasuk dalam formasi terumbu karang tepi (*fringing reef*), dengan pengecualian pada area Mercusuar yang merupakan terumbu karang datar (*patch reef*). PLTU Paiton dikelilingi oleh terumbu karang dengan kedalaman yang berbeda-beda dengan kisaran 2-15 meter, bahkan ada juga kedalaman yang berada lebih dari 10 meter.

4.1.1 Binor

Terumbu karang di Binor (BI) termasuk formasi terumbu karang tepi (*fringing reef*) yang membentang pada zona intertidal dan subtidal pada kedalaman antara 0-3 meter, dengan substrat dasar berupa pasir halus hingga kasar. Lokasi pengamatan Binor terletak paling jauh dari kanal *water discharge* PLTU Paiton 2 dan lebih kecil kemungkinan terpapar oleh limbah air bahang bersuhu tinggi.

Gambaran umum kondisi terumbu karang di lokasi Binor (Gambar 3).



Gambar 3. Gambaran umum kondisi terumbu karang di lokasi Binor
Sumber: Laporan *Monitoring* PJB Paiton, 2020

4.1.2 *Water Intake*

Terumbu karang di *water intake* terdapat di kedalaman 3 meter dan 8 meter yang merupakan hasil dari penempelan (*recruitment*) karang pada blok-blok beton yang ditenggelamkan ke laut. Blok beton tersebut merupakan material reklamasi dan penahan gelombang laut saat awal pembangunan PLTU Paiton. Seiring dengan waktu, larva karang yang bersifat planktonik menggunakan blok beton sebagai substrat/media penempelan dan pada akhirnya membentuk terumbu karang di lokasi tersebut. Gambaran umum kondisi terumbu karang di lokasi *water intake* (Gambar 4).

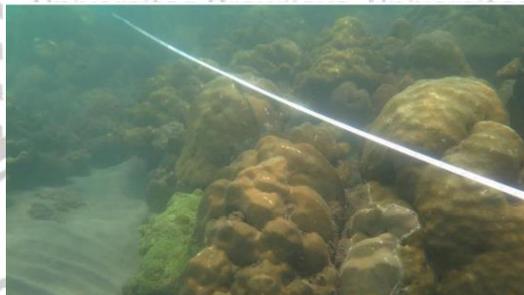


Gambar 4. Gambaran umum kondisi terumbu karang di lokasi *water intake*
Sumber: Laporan *Monitoring* PJB Paiton, 2020

4.1.3 *Water Discharge Timur*

Tipe terumbu karang di lokasi *water discharge* sama dengan sebagian besar terumbu karang di *water intake* yang juga tumbuh diatas blok-blok beton material reklamasi. Tingkat sedimentasi di area *water discharge* tergolong cukup tinggi dan

memiliki suhu perairan yang cukup tinggi dikarenakan posisi lokasi yang berdekatan dengan kanal pembuangan air bahang. Kedua faktor tersebut dapat mempengaruhi pertumbuhan karang. Akan tetapi, kedua faktor tersebut masih dapat ditoleransi oleh koloni karang dan berhasil beradaptasi di perairan sekitar *water discharge*. Gambaran umum kondisi terumbu karang di lokasi *water discharge* timur (Gambar 5).



Gambar 5. Gambaran umum kondisi terumbu karang di lokasi *water discharge* timur
Sumber: Laporan Monitoring PJB Paiton, 2020

4.1.4 *Water Discharge* Barat

Tipikal tipe terumbu karang di lokasi barat kanal *water discharge* barat (WD.W) serupa dengan lokasi WI dan WD.W. Secara teori, stasiun WD.W seharusnya memiliki kondisi karang yang kurang baik dikarenakan mendapat cekaman panas yang paling intens, mengingat posisinya yang berada dekat dengan kanal *water discharge*. Akan tetapi, berdasarkan studi ini, stasiun WD.W termasuk dalam lokasi pemantauan yang memiliki kondisi terumbu karang terbaik setelah stasiun MR (Mercusuar) dan *water intake*. Kondisi demikian menunjukkan bahwa cekaman suhu tinggi masih dapat ditoleransi oleh karang-karang yang ada di sekitar *water discharge*, akibat dari percampuran massa air panas dari *water discharge* dengan massa air laut yang lebih dingin. Gambaran umum kondisi terumbu karang di lokasi *water discharge* barat (Gambar 6).



Gambar 6. Gambaran umum kondisi terumbu karang di lokasi *water discharge* barat
 Sumber: Laporan *Monitoring PJB Paiton*, 2020

4.1.5 Mercusuar

Lokasi Mercusuar memiliki tipe terumbu yang berbeda bila dibandingkan dengan lokasi-lokasi lain. Pada lokasi ini, terumbu karang tumbuh diatas semacam gosong pasir dikarenakan tipe karang di lokasi ini adalah *patch reef* atau terumbu karang datar pada kedalaman 4-12 meter. Substrat dasar berupa pasir kasar dengan campuran pasir dan lumpur (*silt*). Kondisi perairan di lokasi ini memiliki perairan yang lebih jernih dan arus yang lebih kuat dibandingkan lokasi lainnya.

Gambaran umum kondisi terumbu karang di lokasi Mercusuar (Gambar 7).

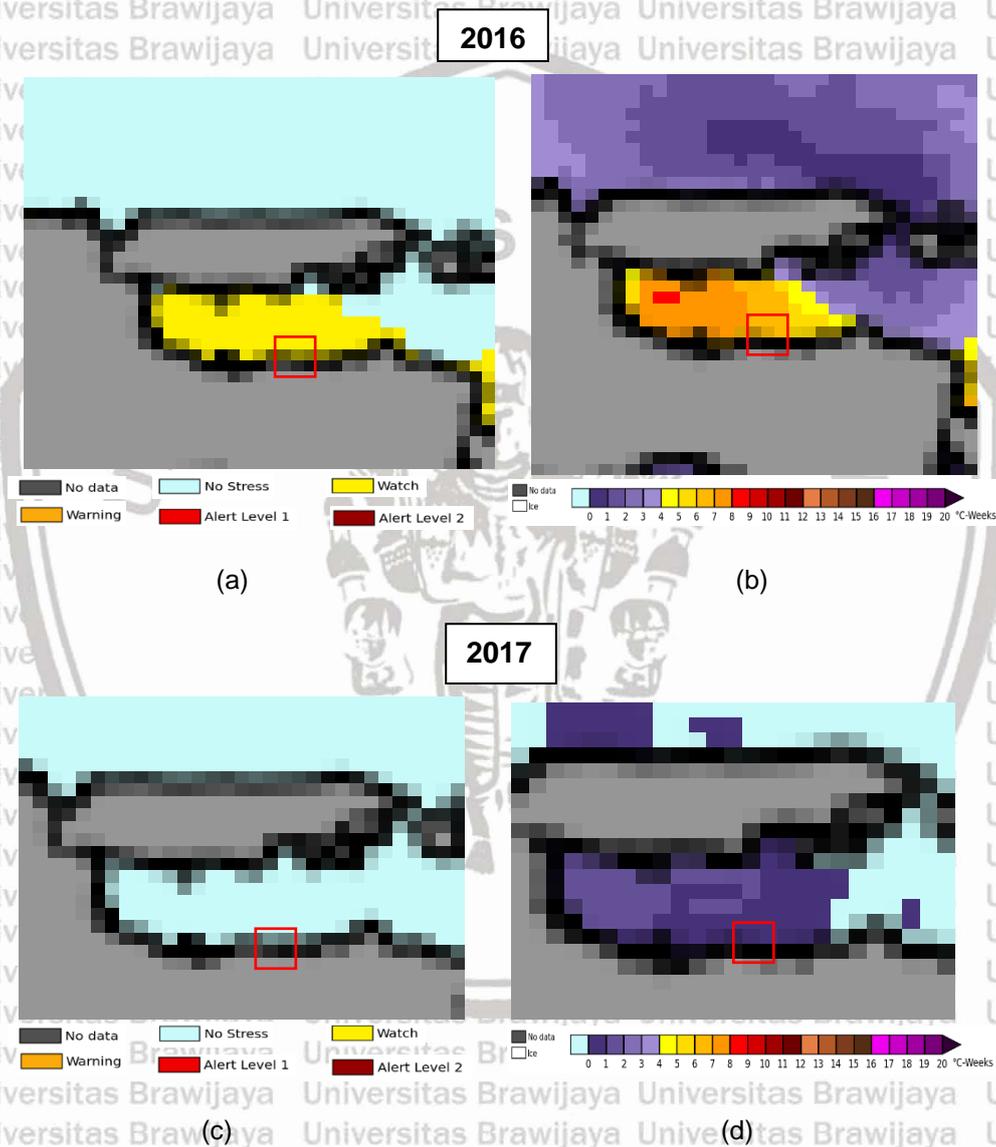


Gambar 7. Gambaran umum kondisi terumbu karang di lokasi Mercusuar
 Sumber: Laporan *Monitoring PJB Paiton*, 2020

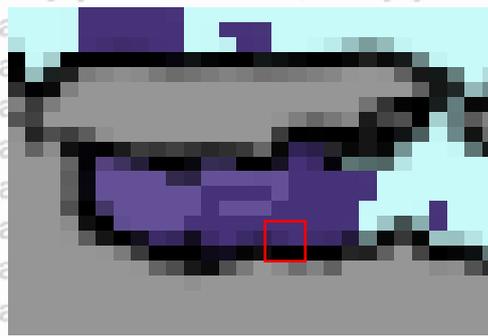
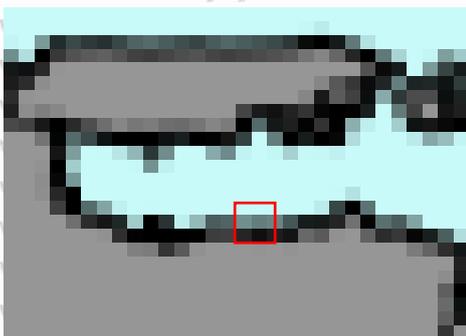
4.2 Sebaran Pemutihan Karang Berdasarkan CRW NOAA

Hasil sebaran *Bleaching Alert Area* (BAA) dan indeks pemutihan karang yaitu *Degree Heating Week* (DHW) yang menggunakan data sensor satelit (*advanced very high resolution radiometer*, AVHRR) pada tahun 2016 – 2020

(Gambar 8) yaitu pada tanggal 16 Juli untuk menunjukkan sebaran area pemutihan dan indeks pemutihan karang.



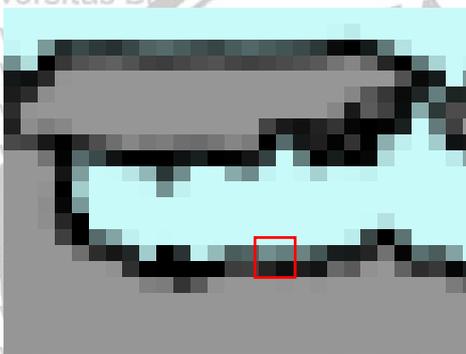
2018



(e)

(f)

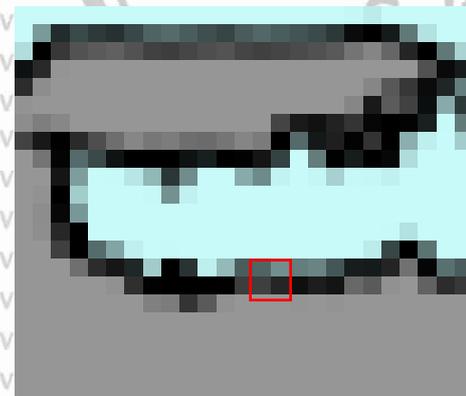
2019



(g)

(h)

2020



(i)

(j)



Gambar 8. CRW NOAA *Daily Global 5km Satellite Version 3*. (a) *Bleaching Alert Area 7-day maximum 2016*; (b) *Degree Heating Week 2016*; (c) *Bleaching Alert Area 7-day maximum 2017*; (d) *Degree Heating Week 2017*; (e) *Bleaching Alert Area 7-day maksimum 2018*; (f) *Degree Heating Week 2018*; (g) *Bleaching Alert Area 7-day maksimum 2019*; (h) *Degree Heating Week 2019*; (i) *Bleaching Alert Area 7-day maksimum 2020*; (j) *Degree Heating Week 2020*;

Sumber: Coral Reef Watch NOAA, 2021

Berdasarkan data dari CRW NOAA mengenai BAA dan DHW di Perairan Probolinggo, pada tahun 2016 diketahui bahwa *stress level* yang didapatkan dari *Bleaching Alert Area* (BAA) dalam maksimum 7 hari masuk dalam kategori *Watch*.

Kategori ini dapat diartikan bahwa area tersebut masuk dalam pantauan karena terdapat indikasi terjadinya *bleaching*. Akan tetapi, perlu dilihat juga melalui indeks pemutihan karang yaitu *Degree Heating Week* (DHW). Nilai DHW di Perairan Probolinggo pada bulan 16 Juli 2016 berkisar antara 7- 8°C-weeks yang mana masuk dalam kategori *Alert Level 1* yang artinya memungkinkan terjadinya *bleaching* yang signifikan.

Pada tahun 2017, *stress level* dari BAA menunjukkan bahwa Perairan Probolinggo tidak terdapat *bleaching* sama sekali dalam waktu maksimum 7 hari, atau *No Stress Level*, sedangkan Indeks DHW nya memiliki kisaran nilai yaitu 1-2°C-weeks yang mana masuk dalam kategori *Warning*, yang artinya memungkinkan terjadinya *bleaching*.

Pada tahun 2018, *stress level* dari BAA menunjukkan bahwa Perairan Probolinggo masuk dalam kategori *No Stress Level* atau tidak terdapat *bleaching* sama sekali dalam waktu maksimum 7 hari. Nilai indeks DHW pada tahun 2018 sama seperti pada tahun 2017 yaitu 1-2°C-weeks yang mana masuk dalam kategori *Warning*.

Pada tahun 2019, *stress level* dari BAA sama seperti pada tahun 2018 yaitu menunjukkan bahwa Perairan Probolinggo masuk dalam kategori *No Stress Level* atau tidak terdapat *bleaching* sama sekali dalam waktu maksimum 7 hari. Nilai

indeks DHW pada tahun 2019 memiliki kisaran lebih tinggi dari tahun sebelumnya yaitu 2-3°C-weeks yang mana masuk dalam kategori *Warning*.

Pada tahun 2020, *stress level* dari BAA juga menunjukkan bahwa Perairan Probolinggo masuk dalam kategori *No Stress Level* atau tidak terdapat *bleaching* sama sekali dalam waktu maksimum 7 hari. Nilai indeks DHW pada tahun 2020 memiliki kisaran yang cukup tinggi yaitu 6-7°C-weeks yang mana masuk dalam kategori *Alert Level 1* yang artinya memungkinkan terjadinya *bleaching* yang signifikan. *Stress Level Bleaching* (Tabel 6) menunjukkan tingkatan *bleaching*, serta definisinya.

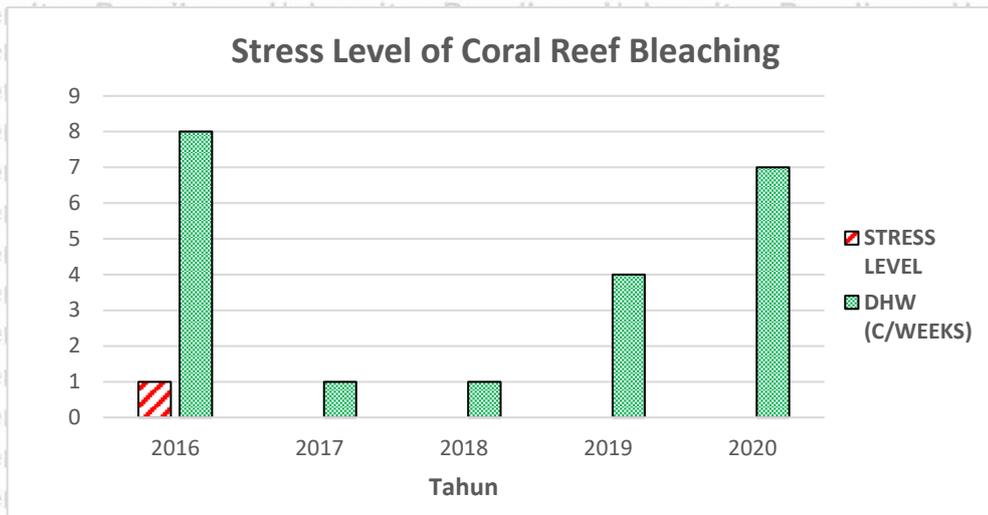
Tabel 6. *Stress Level Bleaching*

Stress Level	Definition	Potential Bleaching Intensity
0	No Stress	No Bleaching
1	Bleaching Watch	No Bleaching
2	Bleaching Warning ($0 < DHW < 4$)	Possible Bleaching
3	Bleaching Alert Level 1 ($4 \leq DHW < 8$)	Bleaching Likely
4	Bleaching Alert Level 2 ($8 \leq DHW$)	Mortality Likely

Sumber: https://coralreefwatch.noaa.gov/product/5km/index_5km_baa-max-7d.php

Grafik *Stress Level* (Gambar 9) hasil *Bleaching Alert Area* (BAA) dan indeks pemutihan karang yaitu *Degree Heating Week* (DHW) menggunakan data sensor satelit (*advanced very high resolution radiometer*, AVHRR) pada 16 Juli Tahun 2016 – 2020.





Gambar 9. Grafik *Stress Level of Coral Reef Bleaching*

Berdasarkan grafik, *stress level* pada karang hanya terjadi di 16 Juli 2016 dengan kategori *Bleaching Watch*. Kategori ini menandakan bahwa area Perairan Probolinggo termasuk dalam pantauan karena terdapat indikasi terjadinya *bleaching*. Secara keseluruhan, pada tahun 2016 – 2020, indeks pemutihan karang yaitu nilai DHW yang berkisar antara 4 - 8°C-weeks sebagian besar mempengaruhi peningkatan *stress level* pada karang, sedangkan nilai DHW < 4°C-weeks masih masuk dalam kategori *stress level* yaitu *No Stress* atau tidak terjadinya pemutihan karang, yang artinya pada kisaran nilai tersebut tidak mempengaruhi peningkatan *stress level* pada karang.

4.3 Hasil Nilai Spektral Citra Sentinel-2

Reflektansi spektral campuran Band 2 dan Band 3 melalui koreksi kedalaman DII (*Depth Invariant Index*) yang terdapat pada piksel Sentinel-2 (Gambar 17) berdasarkan 2 kategori karang yaitu *Healthy Coral* dengan kisaran nilai spektral 0.05 – 0.1 *steradian*⁻¹ atau *sr*⁻¹ dan *Bleached Coral* dengan kisaran nilai spektral 0.13 – 0.15 *steradian*⁻¹ atau *sr*⁻¹ (Xu *et al.*, 2021).



Gambar 10. Nilai Spektral Lyzenga. (a) Nilai Spektral 2016; (b) Nilai Spektral 2017; (c) Nilai Spektral 2018; (d) Nilai Spektral 2019; (e) Nilai Spektral 2020;

Hasil koreksi kedalaman menggunakan *Depth Invariant Index* (DII) didapatkan nilai spektral citra Sentinel 2 MSI Sensor dari tahun 2016 – 2020 yang berkisar antara 0.05 – 0.15 sr^{-1} , dengan nilai spektral tertinggi adalah 0.15 sr^{-1} dan yang terendah adalah 0.05 sr^{-1} .

Penelitian ini memiliki fokus utama pada sebaran pemutihan karang dan karang hidup, sehingga nilai spektral yang ditampilkan hanya pada kisaran $0.05 - 0.15 \text{ sr}^{-1}$, yang mana karang hidup berada pada spektrum $0.05 - 0.1 \text{ sr}^{-1}$ dan pemutihan karang berada pada nilai spektral $0.13 - 0.15 \text{ sr}^{-1}$, berdasarkan acuan jurnal Xu *et. al* (2021). Panjang gelombang yang digunakan pada nilai spektral ini berasal dari *band 2* (458 – 523 nm) dan *band hijau* (543 – 578 nm). Nilai rendah pada panjang gelombang biru dan hijau sebagian besar merupakan hasil penyerapan oleh fotosintesis dan fotoprotektif (Nurdin *et al.*, 2012).

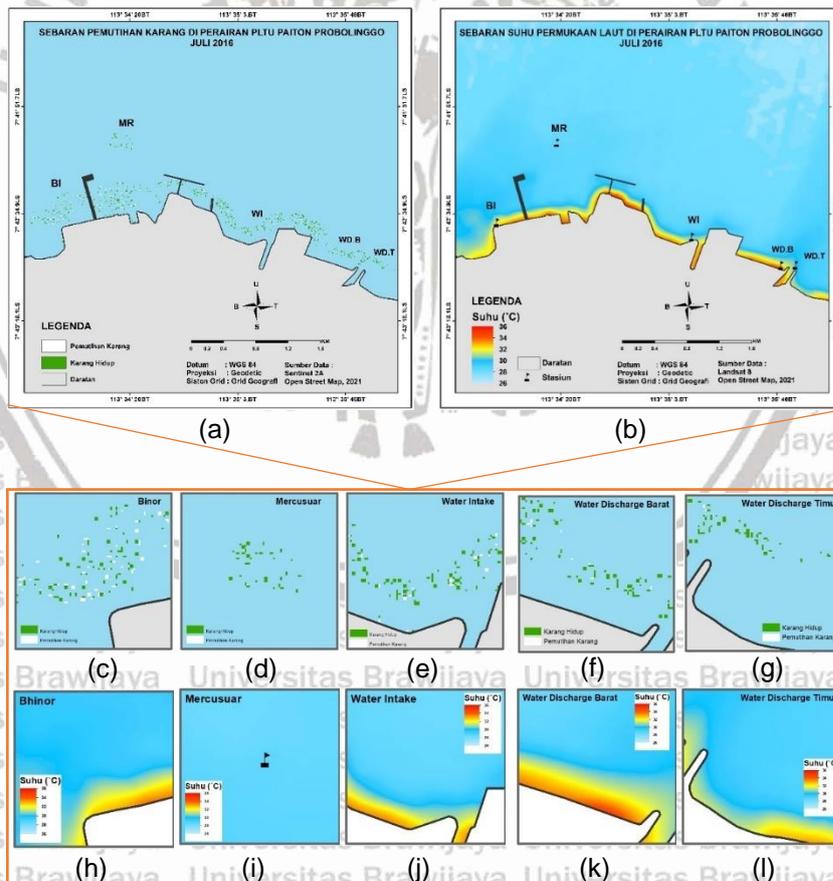
Hasil nilai spektral yang dihasilkan dari Sentinel-2 MSI Sensor belum bisa dikatakan mewakili objek sebenarnya di lapang. Berdasarkan acuan jurnal Xu *et al.*, (2021), hasil pengukuran nilai spektral dengan data *in situ* dan dilakukan koreksi kedalaman DII, nilai spektral yang berada pada karang hidup berkisar antara $0.05 - 0.1 \text{ sr}^{-1}$ dan karang yang memutih $0.13 - 0.15 \text{ sr}^{-1}$ dengan lokasi pengamatan di *Lizard Island* yang berada di sebelah utara *Great Barrier Reef*. Oleh karena perbedaan geografis antara lokasi penelitian dan acuan penelitian, terdapat beberapa kemungkinan kurang akuratnya hasil nilai spektral yang dapat mempengaruhi hasil deteksi pemutihan karang, seperti suhu permukaan laut dan kedalaman perairan. Suhu perairan dapat mempengaruhi pancaran spektral suatu objek di perairan yang berpengaruh terhadap resolusi radiometrik suatu citra (Oktaviani & Johan, 2016). Kedalaman perairan juga dapat mempengaruhi keakuratan data citra satelit, dikarenakan kondisi pasang yang dapat mempengaruhi kedalaman perairan yang artinya kedalaman akan lebih tinggi. Hal ini mempengaruhi resolusi spasial citra sentinel 2 MSI Sensor yang dapat menembus kedalaman 10 meter dengan menggunakan *band 2* dan *band 3*. Ketika perairan sedang dalam keadaan pasang, otomatis citra satelit tidak akan beroperasi maksimal dan dapat memungkinkan tidak menembus sampai kedalaman dimana terumbu karang berada.

4.4 Pemetaan Pemutihan Karang dan SPL

Pengolahan peta sebaran pemutihan karang menggunakan citra satelit Sentinel-2 dengan spektral untuk karang hidup ($0.05 - 0.01 \text{ steradian}^{-1}$ atau sr^{-1}) dan untuk pemutihan karang ($0.13 - 0.15 \text{ steradian}^{-1}$ atau sr^{-1}) dengan menggunakan metode DII (*depth invariant index*) menunjukkan hasil sebaran dugaan pemutihan karang di beberapa titik pengamatan. Data citra satelit Sentinel-2 yang diambil memiliki akuisisi yaitu pada 16 Juli dalam periode tahun 2016 - 2020.

4.4.1 Peta Pemutihan Karang Tahun 2016

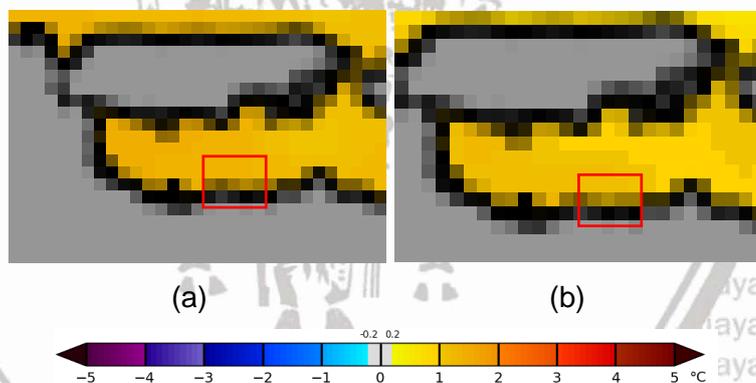
Hasil sebaran pemutihan karang citra Sentinel-2 dan sebaran suhu permukaan laut citra satelit Landsat-8 (Gambar 10) pada titik pengamatan bulan Juli 2016.



Gambar 11. Sebaran pemutihan karang dan SPL tahun 2016. (a) Tampilan keseluruhan sebaran pemutihan karang; (b) Tampilan keseluruhan sebaran SPL; (c) Titik BI; (d) Titik MR; (e) Titik WI; (f) Titik WD.B; (g) Titik WD.T; (h) Titik BI; (i) Titik MR; (j) Titik WI; (k) Titik WD.B; (l) Titik WD.T

Berdasarkan hasil pengolahan peta sebaran pemutihan karang pada 16 Juli 2016 menunjukkan bahwa titik dugaan pemutihan karang terdapat di 4 lokasi pengamatan, kecuali lokasi Mercusuar. Pada lokasi Binor terdapat banyak titik dugaan pemutihan karang dengan nilai SPL berkisar antara 29 - 30 °C. Pada lokasi Mercusuar tidak terlihat pemutihan karang, hanya terdeteksi karang hidup dengan nilai SPL berkisar antara 28-29 °C. Pada lokasi *Water Intake* terlihat titik dugaan pemutihan karang dengan nilai SPL berkisar antara 29 - 32 °C. Pada lokasi *Water Discharge* Barat dan *Water Discharge* Timur terdapat lokasi dugaan pemutihan karang, walaupun pada WD.T hanya sedikit yang terlihat, dengan kisaran nilai SPL pada WD.B yaitu 29 - 33 °C dan WD.T yaitu 29 - 32 °C.

Faktor utama yang mempengaruhi terjadinya pemutihan karang pada bulan Juli tahun 2016 adalah dampak fenomena super *El Nino* yang berlangsung di Indonesia dari bulan Juli 2015 – Mei 2016 yang menyebabkan terjadinya anomali suhu yaitu meningkatnya suhu perairan melebihi suhu normalnya



Gambar 12. Anomali Suhu. (a) Mei 2016, (b) Juli 2016

Berdasarkan *Coral Reef Watch* NOAA, 2016 (Gambar 11), anomali suhu di Perairan Probolinggo yang terjadi saat fenomena *El Nino* yaitu pada bulan Mei 2016 lebih besar dibandingkan saat periode pasca *El Nino*, yang mana terjadi 2 bulan setelahnya yaitu pada bulan Juli 2016 dengan kisaran pada bulan Mei 2016 sebesar 1.5 – 2.2 °C dan mengalami penurunan pada bulan Juli 2016 dengan

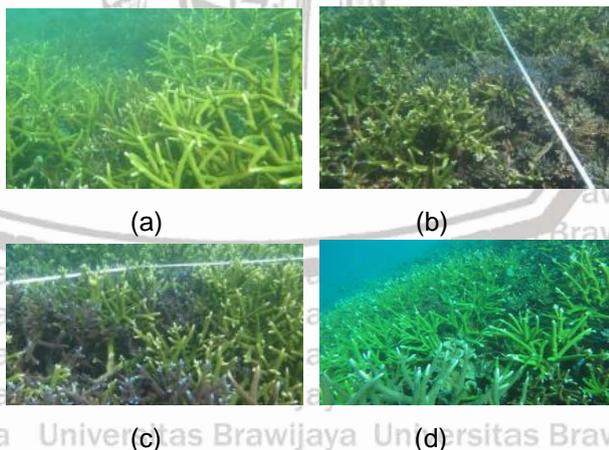
anomali suhu sebesar 1.3 C. Hal ini membuktikan bahwa pada bulan Juli masih terdapat anomali suhu pasca terjadinya *El Nino* yang sedang mengalami penurunan menuju fase normal.

Menurut Laporan *Monitoring PJB*, Paiton (2020), pada bulan Juli 2016 di lokasi studi dijumpai banyak koloni karang yang mengalami pemutihan secara massal. Karang yang mengalami pemutihan di lokasi studi tidak semua mengalami kematian, karena banyak pemutihan karang yang berhasil memperoleh kembali endosimbiotiknya atau berhasil melakukan *recovery*. Pemutihan karang terjadi di beberapa lokasi studi, seperti pada titik lokasi *Water Discharge* (Gambar 12).



Gambar 13. Pemutihan Karang di titik WD
Sumber: Laporan *Monitoring PJB* Paiton, 2020

Pada pemantauan periode tahun 2016 hingga 2020 ini, sebagian besar koloni-koloni karang yang sebelumnya mengalami pemutihan di *Water Discharge* telah berhasil melakukan *recovery* atau pulih kembali (Gambar 13).

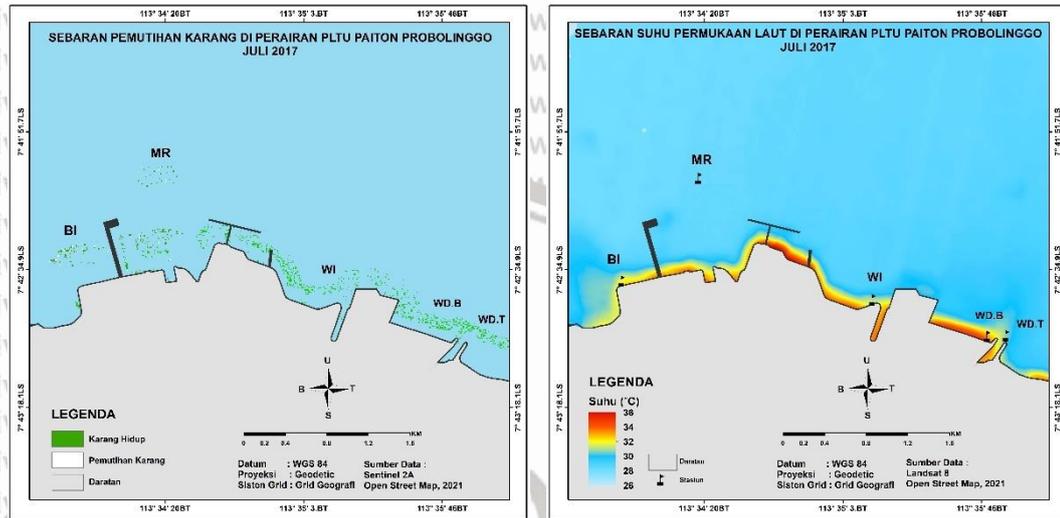


Gambar 14. Karang-karang bercabang yang mengalami pemutihan (*bleaching*) pada tahun 2016 dan mampu melakukan *recovery* pada tahun 2017 – 2020. (a) 2017; (b) 2018; (c) 2019; (d) 2020

Sumber: Laporan *Monitoring PJB* Paiton, 2020

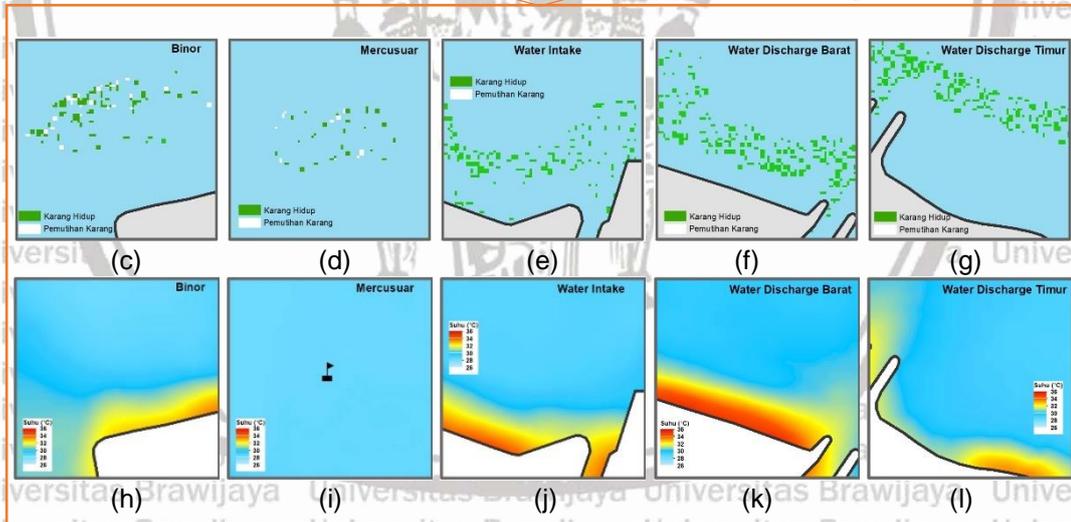
4.4.2 Peta Pemutihan Karang Tahun 2017

Hasil sebaran pemutihan karang citra Sentinel-2 dan sebaran suhu permukaan laut citra satelit Landsat-8 (Gambar 14) pada titik pengamatan bulan Juli 2017.



(a)

(b)



(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

(i)

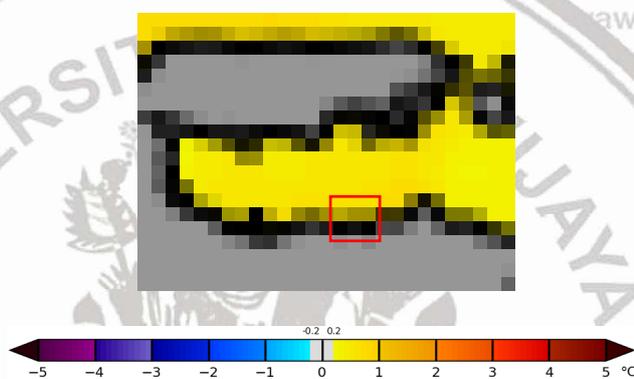
(j)

(k)

(l)

Gambar 15. Sebaran pemutihan karang dan SPL tahun 2017. (a) Tampilan keseluruhan sebaran pemutihan karang; (b) Tampilan keseluruhan sebaran SPL; (c) Titik BI; (d) Titik MR; (e) Titik WI; (f) Titik WD.B; (g) Titik WD.T; (h) Titik BI; (i) Titik MR; (j) Titik WI; (k) Titik WD.B; (l) Titik WD.T

Berdasarkan hasil pengolahan peta sebaran pemutihan karang pada 16 Juli 2017 menunjukkan bahwa titik dugaan adanya pemutihan karang terdapat di 2 lokasi pengamatan yaitu Binor dan Mercusuar. Titik dugaan pemutihan karang pada lokasi Binor memiliki kisaran nilai SPL antara 29 - 30 °C, sedangkan Pada lokasi Mercusuar terdapat beberapa titik dugaan pemutihan karang dengan kisaran nilai SPL antara 28-29 °C. Pada lokasi *Water Intake*, *Water Discharge* Barat dan *Water Discharge* Timur tidak terdapat titik dugaan pemutihan karang, walaupun kisaran nilai SPL 3 lokasi tersebut cukup besar, yaitu lokasi WI dan WD.B dengan suhu 28 - 34 °C dan lokasi WD.T yaitu 29 - 32 °C.

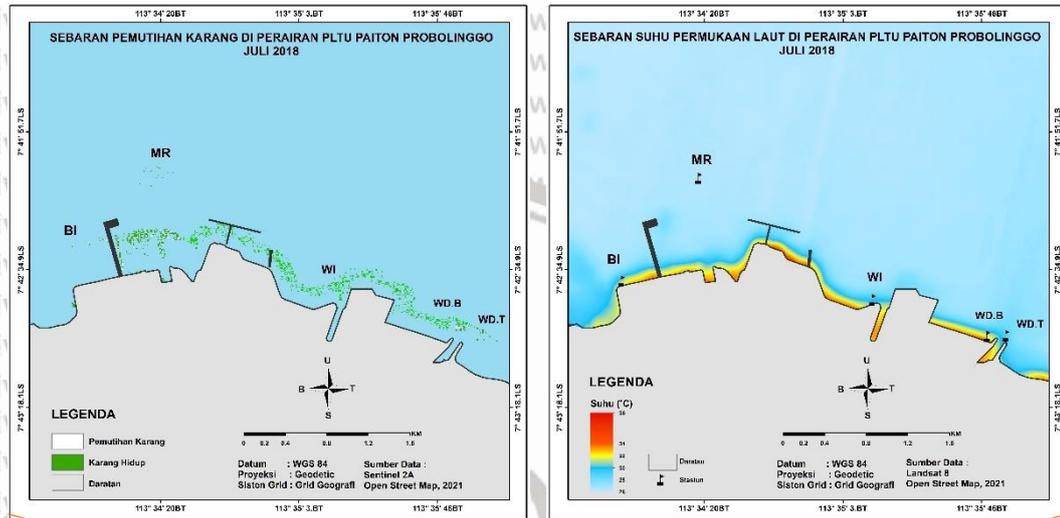


Gambar 16. Anomali Suhu Juli 2017

Berdasarkan *Coral Reef Watch* NOAA, (2017) (Gambar 15), anomali suhu yang terjadi di Perairan Probolinggo pada bulan Juli 2017 memiliki nilai sebesar 1 °C, dimana terjadi kenaikan suhu permukaan laut akibat pemanasan global sebesar 1 °C, sehingga dapat terjadi indikasi pemutihan karang di perairan tersebut.

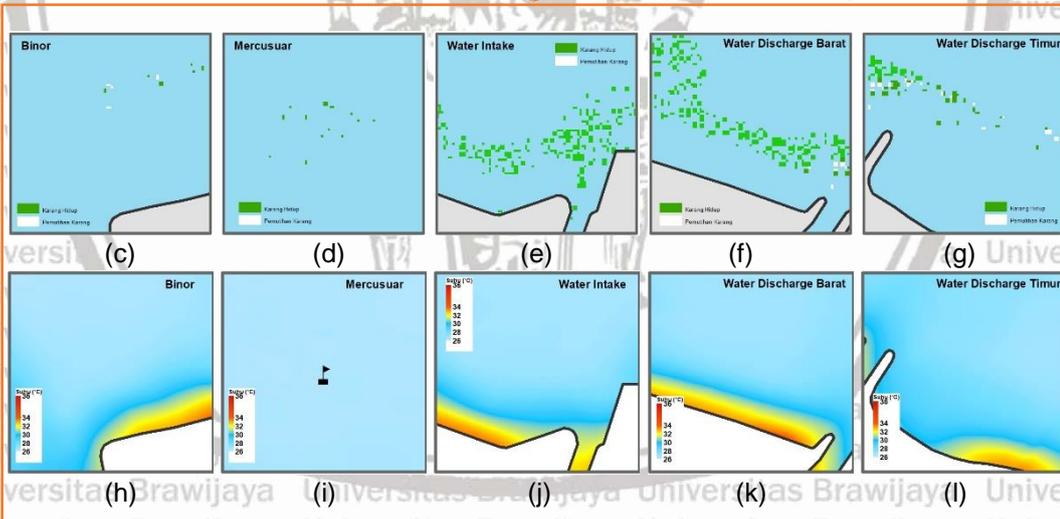
4.4.3 Peta Pemutihan Karang Tahun 2018

Hasil sebaran pemutihan karang citra Sentinel-2 dan sebaran suhu permukaan laut citra satelit Landsat-8 (Gambar 16) pada titik pengamatan bulan Juli 2018.



(a)

(b)



(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

(i)

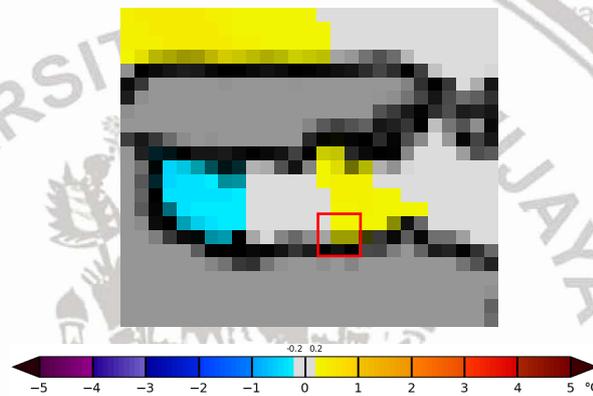
(j)

(k)

(l)

Gambar 17. Sebaran pemutihan karang dan SPL tahun 2018. (a) Tampilan keseluruhan sebaran pemutihan karang; (b) Tampilan keseluruhan sebaran SPL; (c) Titik BI; (d) Titik MR; (e) Titik WI; (f) Titik WD.B; (g) Titik WD.T; (h) Titik BI; (i) Titik MR; (j) Titik WI; (k) Titik WD.B; (l) Titik WD.T

Berdasarkan hasil pengolahan peta sebaran pemutihan karang pada 16 Juli 2018 menunjukkan bahwa titik dugaan adanya pemutihan karang terdapat di 3 lokasi pengamatan yaitu Binor, *Water Discharge* Barat dan *Water Discharge* Timur. Titik dugaan pemutihan karang pada lokasi Binor memiliki kisaran nilai SPL antara 28 - 29 °C, pada lokasi WD.B dengan kisaran suhu 30 – 32 °C dan pada lokasi WD.T berkisar antara 28 - 31 °C. Pada lokasi Mercusuar dan *Water Intake* tidak terdapat titik dugaan pemutihan karang dengan kisaran SPL Mercusuar yaitu 26 - 27 °C dan *Water Intake* dengan SPL yang cukup besar yaitu 28 - 33 °C tetapi tidak terdapat titik dugaan pemutihan karang.

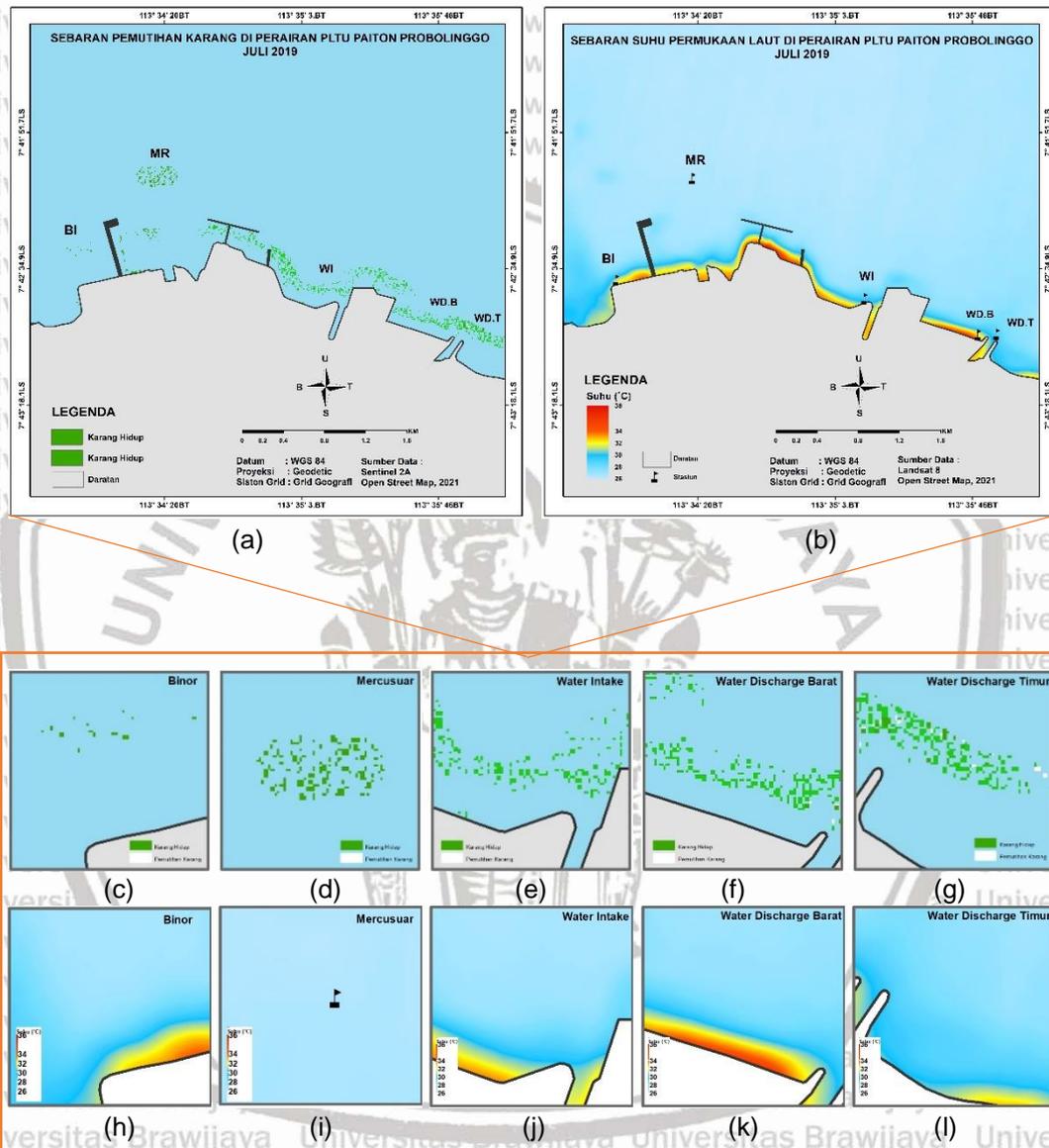


Gambar 18. Anomali Suhu Juli 2018

Berdasarkan *Coral Reef Watch* NOAA, (2018) (Gambar 17), anomali suhu yang terjadi di Perairan Probolinggo pada bulan Juli 2018 memiliki nilai sebesar 1 °C, dimana terjadi kenaikan suhu permukaan laut akibat pemanasan global sebesar 1 °C, sehingga dapat terjadi indikasi pemutihan karang di perairan tersebut.

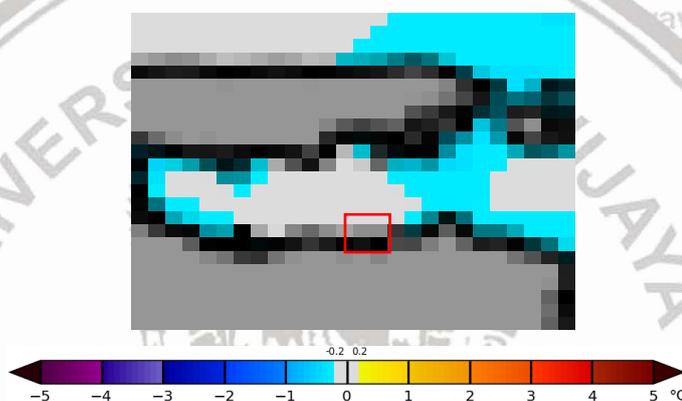
4.4.4 Peta Pemutihan Karang Tahun 2019

Hasil sebaran pemutihan karang citra Sentinel-2 dan sebaran suhu permukaan laut citra satelit Landsat-8 (Gambar 18) pada titik pengamatan bulan Juli 2019.



Gambar 19. Sebaran pemutihan karang dan SPL tahun 2019. (a) Tampilan keseluruhan sebaran pemutihan karang; (b) Tampilan keseluruhan sebaran SPL; (c) Titik BI; (d) Titik MR; (e) Titik WI; (f) Titik WD.B; (g) Titik WD.T; (h) Titik BI; (i) Titik MR; (j) Titik WI; (k) Titik WD.B; (l) Titik WD.T

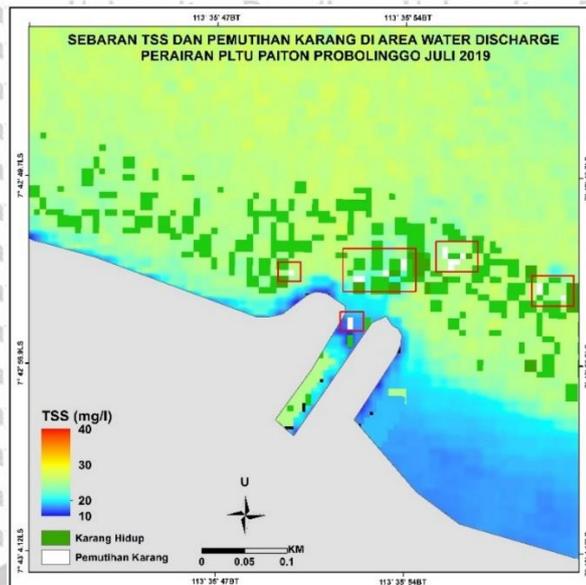
Berdasarkan hasil pengolahan peta sebaran pemutihan karang menunjukkan bahwa titik dugaan adanya pemutihan karang pada 16 Juli 2019 sangatlah sedikit yaitu hanya terdapat di 2 lokasi pengamatan yaitu *Water Discharge* Barat dan *Water Discharge* Timur. Titik dugaan pemutihan karang pada lokasi WD.B memiliki kisaran suhu 29 – 32 °C dan pada lokasi WD.T berkisar antara 28 - 31 °C. Pada lokasi Binor, Mercusuar dan *Water Intake* tidak terdapat titik dugaan pemutihan karang dengan kisaran SPL Binor 26 - 28 °C, Mercusuar 26 - 27 °C dan *Water Intake* dengan SPL yang cukup besar yaitu 27 - 33 °C tetapi tidak terdapat titik dugaan pemutihan karang.



Gambar 20. Anomali Suhu Juli 2019

Berdasarkan *Coral Reef Watch* NOAA (2019) (Gambar 19), anomali suhu yang terjadi di Perairan Probolinggo pada bulan Juli 2019 memiliki nilai sebesar 0 °C, dimana tidak terjadi kenaikan suhu permukaan laut atau suhu permukaan laut masih pada kisaran normalnya, sehingga kecil kemungkinan terjadi pemutihan karang di Perairan Probolinggo.

Faktor lingkungan selain naiknya suhu permukaan laut yang dapat menyebabkan karang stress adalah perubahan lingkungan hidupnya seperti terjadinya sedimentasi yang cukup tinggi yang terjadi di perairan.

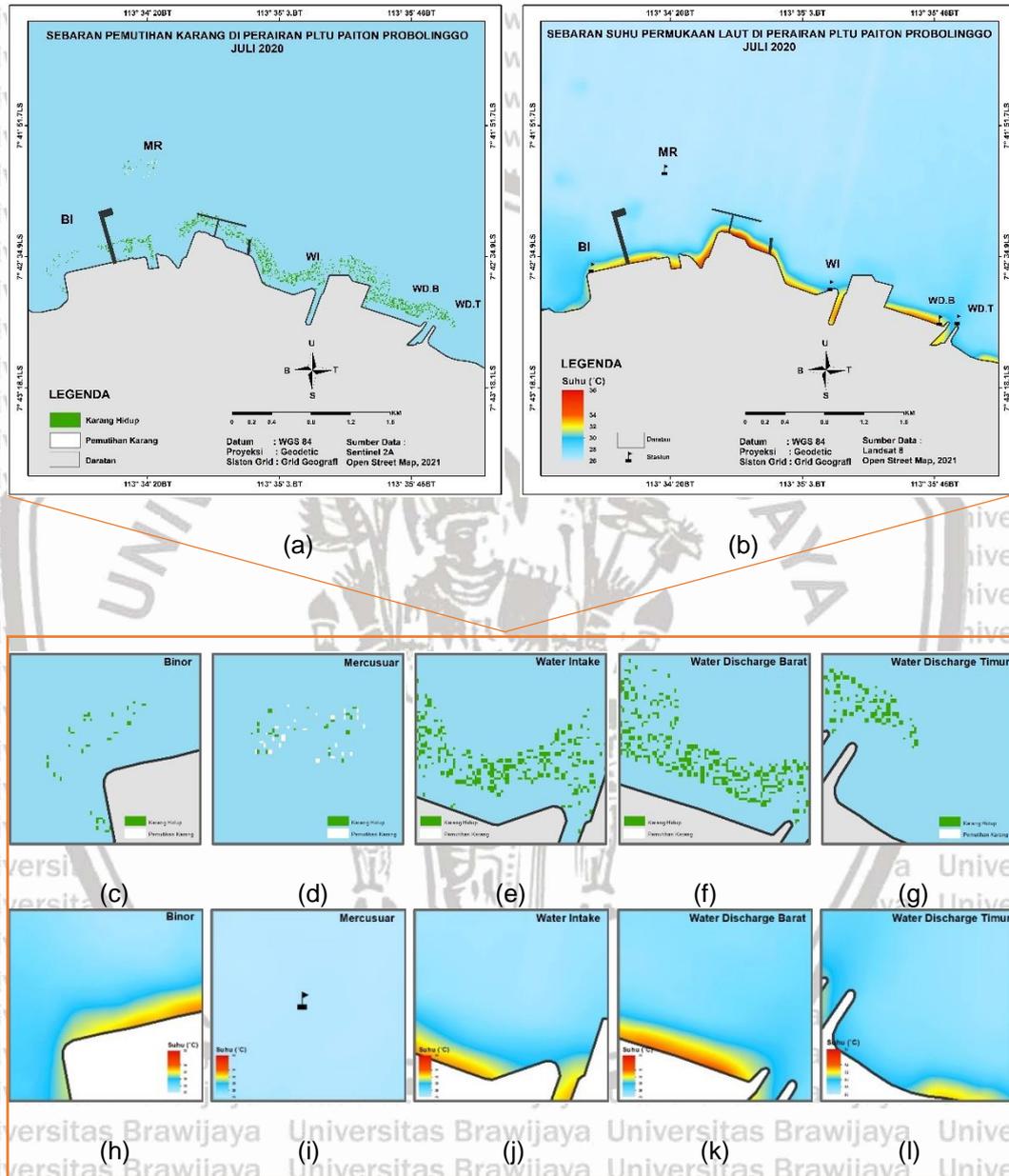


Gambar 21. Sebaran TSS Area WD PLTU Paiton

Berdasarkan hasil pengolahan data (Gambar 20), sebaran pemutihan karang di Perairan PLTU Paiton, Probolinggo pada Juli tahun 2019 dipengaruhi juga oleh faktor lingkungannya yaitu sedimentasi yang cukup tinggi. Nilai kisaran sedimentasi yang terdapat di titik dugaan pemutihan karang memiliki kisaran nilai 23 – 34 mg/l. Berdasarkan Kemen LH No. 51 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Laut menyebutkan bahwa kadar optimum padatan tersuspensi (TSS) untuk pertumbuhan karang adalah 20 mg/l, sehingga dapat diartikan pemutihan karang di area PLTU Paiton, tepatnya di area tempat keluarnya limbah bahang air panas juga dipengaruhi oleh faktor lingkungannya yaitu sedimentasi yang cukup tinggi dan melebihi batas optimum karang tumbuh. Sedimentasi yang terjadi di area WD disebabkan oleh keluarnya limbah buangan air panas yang mempengaruhi transparansi air sehingga menyebabkan sedimentasi perairan di wilayah PLTU Paiton.

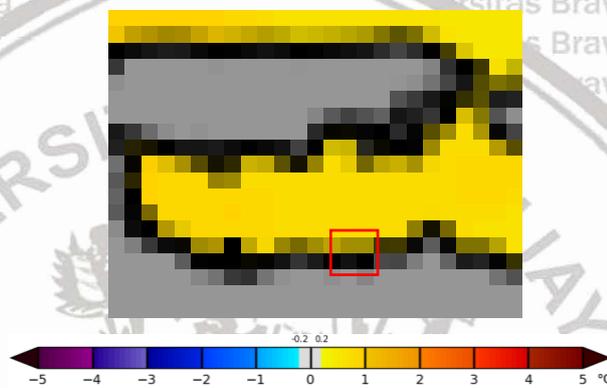
4.4.5 Peta Pemutihan Karang Tahun 2020

Hasil sebaran pemutihan karang citra Sentinel-2 dan sebaran suhu permukaan laut citra satelit Landsat-8 (Gambar 21) pada titik pengamatan bulan Juli 2020.



Gambar 22. Sebaran pemutihan karang dan SPL tahun 2020. (a) Tampilan keseluruhan sebaran pemutihan karang; (b) Tampilan keseluruhan sebaran SPL; (c) Titik BI; (d) Titik MR; (e) Titik WI; (f) Titik WD.B; (g) Titik WD.T; (h) Titik BI; (i) Titik MR; (j) Titik WI; (k) Titik WD.B; (l) Titik WD.T

Berdasarkan hasil pengolahan peta sebaran pemutihan karang menunjukkan bahwa titik dugaan adanya pemutihan karang pada 16 Juli 2020 hanya terdapat di 1 lokasi pengamatan yaitu Mercusuar. Titik dugaan pemutihan karang pada lokasi tersebut memiliki kisaran suhu yang rendah yaitu 27 – 28 °C. Pada lokasi Binor, *Water Intake*, *Water Discharge* Barat dan Timur tidak terdapat titik dugaan pemutihan karang dengan kisaran SPL Binor 30 - 32 °C, lokasi WI dan WD. B memiliki kisaran suhu yang cukup tinggi yaitu 29 - 33 °C, akan tetapi tidak terdapat titik dugaan pemutihan karang dan lokasi WD.T memiliki kisaran SPL 28 - 30 °C.

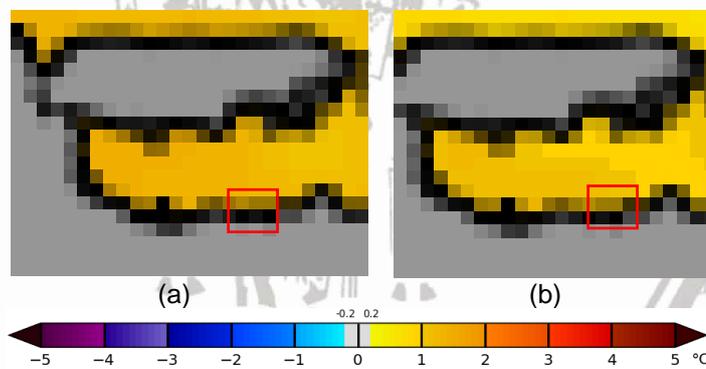


Gambar 23. Anomali Suhu Juli 2020

Berdasarkan *Coral Reef Watch* NOAA (2020) (Gambar 22), anomali suhu yang terjadi di Perairan Probolinggo pada bulan Juli 2020 memiliki nilai sebesar 1 °C, dimana terjadi kenaikan suhu permukaan laut akibat pemanasan global sebesar 1 °C, sehingga dapat terjadi indikasi pemutihan karang di perairan tersebut.

4.5 Pengaruh Fenomena El Nino terhadap Pemutihan Karang

Faktor utama terjadinya pemutihan karang secara massal pada bulan Juli 2016 adalah naiknya suhu permukaan laut melebihi nilai optimum karang hidup dikarenakan pengaruh fenomena super *El Nino* pada pertengahan tahun 2015 – pertengahan tahun 2016. Menurut Nabilah et. al (2017), fenomena super *El Nino* terjadi pada tahun 2015 hingga tahun 2016, menyebabkan beberapa daerah di Indonesia mengalami kekeringan. Meskipun El-Nino telah berlalu, tampaknya anomali cuaca yang merupakan imbas dari pemanasan global (*global warming*) menyebabkan periode pergantian musim (dari musim penghujan ke musim kemarau dan sebaliknya) menjadi tidak jelas. Fenomena super *El Nino* berlangsung dari bulan Juli 2015 – Mei 2016 dengan rata-rata anomali suhu sebesar 2.65 °C (Gushchina et al., 2019). Perbandingan anomali suhu pada bulan Mei 2016 dan bulan Juli 2016 (Gambar 18) berdasarkan *Coral Reef Watch* NOAA mengalami penurunan pasca fenomena *El Nino*.



Gambar 24. Anomali suhu. (a) Mei 2016; (b) Juli 2016
Sumber: *Coral Reef Watch* NOAA, 2021

Berdasarkan anomali suhu yang terjadi saat fenomena *El Nino* yaitu pada bulan Mei 2016 lebih besar dibandingkan saat periode pasca *El Nino*, yang mana terjadi 2 bulan setelahnya yaitu pada bulan Juli 2016. Anomali suhu pada bulan Mei 2016 berkisar antara 1.5 – 2.2 °C, sedangkan pada bulan Juli 2016 mengalami penurunan yaitu berkisar antara 1 – 1.3 °C. Hal ini membuktikan bahwa pada bulan Juli masih terdapat anomali suhu pasca terjadinya *El Nino* yang sedang

mengalami penurunan menuju fase normal.

Fenomena *El Nino* yang menyebabkan terjadinya anomali suhu pada bulan Juli 2016 juga berpengaruh terhadap terjadinya pemutihan karang dikarenakan kenaikan suhu diatas normal. Hasil perhitungan dari luasan pemutihan karang berdasarkan deteksi pemutihan karang menggunakan spektral dari citra Sentinel-2 MSI Sensor (Tabel 7) diketahui untuk membandingkan luas pemutihan karang selama periode tahun 2016 – 2020.

Tabel 7. Luas Pemutihan Karang pada Tahun 2016 - 2020

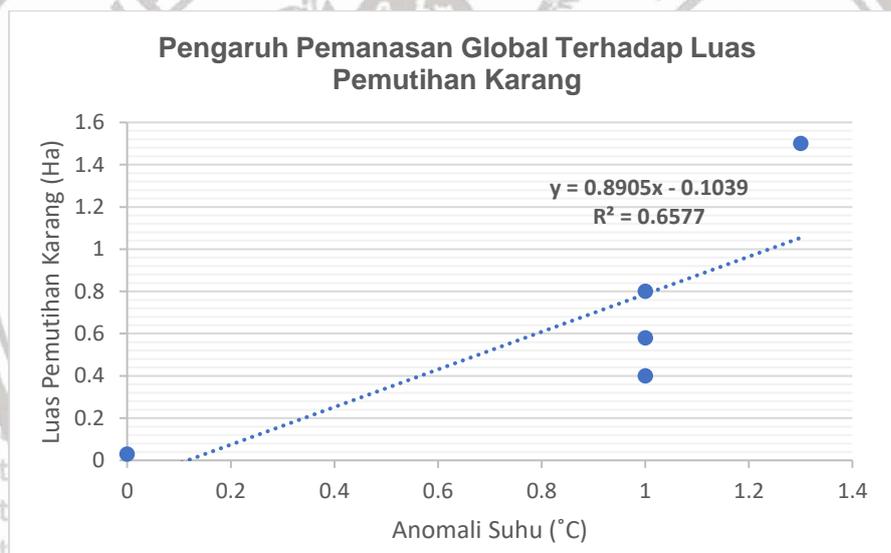
Tahun Pengamatan	Luas Pemutihan (Ha)
2016	1.5
2017	0.8
2018	0.58
2019	0.03
2020	0.4

Berdasarkan hasil perhitungan luas pemutihan karang pada 16 Juli dalam periode tahun 2016 – 2020 didapatkan bahwa luas pemutihan tertinggi berada di tahun 2016 dengan luas 1.5 Ha. Menurut Laporan *Monitoring PJB Paiton* (2020), pada Juli 2016 *mass coral bleaching* tidak hanya terjadi di perairan sekitar PLTU Paiton saja, namun hampir merata di seluruh daerah terumbu karang di pesisir utara Jawa Timur, misalnya di kawasan Pasir Putih Situbondo dan area Taman Nasional Baluran, Situbondo. Hal ini dikarenakan adanya efek anomali suhu pasca *El Nino* yang mempengaruhi terjadinya pemutihan karang.



Pada periode 2017 -2019 luas pemutihan karang menurun secara signifikan di setiap tahunnya. Pada tahun 2020 luas pemutihan karang mengalami kenaikan sebesar 0.37 Ha, menjadi 0.4 Ha. Faktor utama terjadinya *coral bleaching* adalah peningkatan suhu permukaan laut. Peningkatan dari suhu air laut sampai saat ini telah mencapai kedalaman sebesar 3.000 m sejak tahun 1961. Faktor meningkatnya suhu permukaan air laut adalah pemanasan global (Syaifulah, 2018).

Faktor naiknya suhu permukaan laut akibat pemanasan global menjadi ancaman terbesar terhadap terjadinya pemutihan karang. Data anomali suhu dari CRW NOAA dan data luasan pemutihan karang (Gambar 25) diketahui untuk mendapatkan persamaan regresi linear sederhana.



Gambar 25. Grafik Pengaruh Pemanasan Global Terhadap Luas Pemutihan Karang

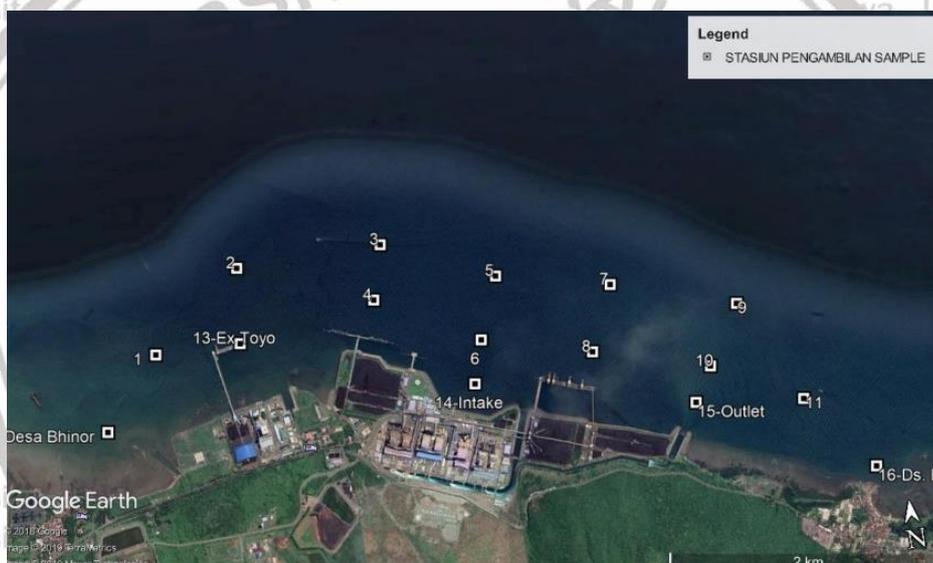
Berdasarkan hasil pengolahan data regresi linear sederhana dari pengaruh anomali pemanasan global terhadap luasan pemutihan karang dalam kurun waktu 2016-2020 (Gambar 19) didapatkan bahwa terdapat pengaruh dari kedua variabel dengan hubungan yang masuk dalam kategori kuat yang dapat dilihat dari nilai koefisien determinasinya yaitu sebesar 0.65. Nilai koefisien determinasi tersebut memiliki arti bahwa pengaruh anomali akibat pemanasan global (variabel x)

terhadap luas pemutihan karang (variabel y) adalah 65%, sisanya merupakan pengaruh dari faktor lain.

4.6 Pengaruh Aktivitas PLTU Paiton terhadap Suhu Perairan

Permasalahan utama kegiatan PLTU adalah suhu air buangan dari sistem pendingin yang jauh lebih tinggi dari suhu perairan di sekitarnya. Umumnya suhu air buangan dari sistem air pendingin dapat mencapai 40 °C, sementara suhu perairan di sekitarnya hanya sekitar 30 °C (Wibowo & Asvaliantina, 2018).

Pengambilan *sampling* suhu terdiri dari 16 titik (Gambar 26) yang memiliki kriteria yaitu *Inlet* PT PJB UP. Paiton, *Outlet* PT PJB UP. Paiton dan Perairan bebas area operasional.



Gambar 26. Titik *sampling* pengambilan suhu air laut
Sumber: Google Earth, 2020

Pengukuran kualitas perairan suhu permukaan laut ini dilaksanakan pada tanggal 16 Juli 2020 oleh tim *monitoring* lingkungan PT PJB UP. Paiton. Hasil pengukuran suhu permukaan laut *in situ* dan dibandingkan dengan hasil pengukuran melalui citra Landsat-8 *Surface Reflectance* yang menggunakan rata-rata nilai suhu dari tahun 2016 – 2020 (Gambar 27) memiliki hasil yang tidak berbeda jauh.



Gambar 27. Grafik Sebaran SPL *In Situ* dan Citra Tahun 2020

Berdasarkan hasil sebaran SPL *In Situ* dan rata-rata SPL citra tahun 2016 – 2020 pada *inlet*, *outlet* dan perairan sekitarnya menunjukkan bahwa suhu air bahang yang keluar dari *outlet* masih relatif di bawah kisaran bila dibandingkan dengan suhu air buangan umumnya yaitu dapat mencapai 40 °C. Suhu permukaan laut yang didapat dari pengukuran *in situ* berkisar antara 30.8 °C – 33.9 °C, sedangkan berdasarkan citra berkisar antara 30.2 °C - 33°C. Nilai tertinggi terukur pada *outlet* air pendingin yaitu pada stasiun 16 dengan suhu *in situ* mencapai 33.9 °C dan suhu citra yaitu 33 °C. Jika dibandingkan dengan KepMenLH No.04.5.03 Tahun 2015 tentang Izin Pembuangan Air Limbah ke Laut, PT PJB PLTU Paiton Unit 1 dan 2 pada baku mutu limbah air pendingin (bahang) dengan kadar maksimum suhu yang diizinkan adalah 40°C, yang menunjukkan air bahang yang dikeluarkan masih dibawah baku mutu yang ditetapkan.

Proses pemindahan panas (*heat transport*) dari limbah air panas atau bahang dengan suhu yang lebih tinggi masuk ke badan perairan menyebabkan suhu air laut ikut mengalami peningkatan. Area yang terkena pengaruh air bahang ini dibatasi oleh volume air panas dan kecepatan arus lingkungan disekitarnya.

Akan tetapi, arah arus yang membawa air dipengaruhi juga oleh arus pasang surut



dan menyebabkan total area yang terpengaruhi air bahang akan menjadi lebih besar daripada yang terlihat pertama kali (Mukhtasor, 2007).

Masuknya panas ke dalam badan air dikelompokkan menjadi dua zona, yakni badan air yang dekat dengan sumber buangan (*near-field*) pada penelitian ini terdapat pada stasiun WD.B dan WD.T dan jauh dari sumber buangan (*far-field*) pada stasiun WI, Binor dan Mercusuar. Pada zona pertama yakni stasiun WD.B dan WD.T buangan bahang (*heated discharge*) diencerkan oleh adanya turbulen (*discharge-induced turbulence*) pada kisaran suhu yang terbilang relatif tinggi dari stasiun lainnya 33.8-33.9 °C.

Pada zona kedua yang luas, distribusi bahang diatur oleh proses konveksi dengan adanya arus (*convection by ambient currents*), difusi karena adanya turbulen dan adanya pertukaran panas melalui permukaan laut, dimana zona kedua ini berada pada stasiun WI, Binor dan Mercusuar dengan kisaran suhu yang berturut-turut semakin rendah 33.3 °C, 32.6 °C, 32.9 °C. Hal ini menunjukkan proses difusi limbah bahang, dengan pergerakan partikel cair yang memiliki konsentrasi tinggi ke bagian yang memiliki konsentrasi rendah. Perpindahan limbah bahang dari mulut kanal *outlet* dimana penampang area lebih kecil menuju ke penampang yang lebih luas yaitu menuju perairan juga dapat memperbesar kecepatan proses difusi.

Pada area sekitar *Water Intake* yaitu pada stasiun 5, 6, 14, nilai rata-rata suhu pengukuran *in situ* pada tahun 2020 adalah 31.6 °C dan suhu citra 29.8 °C, dimana suhu di area WI masih dalam suhu alami permukaan laut, yang menurut (Nontji, 2002), suhu permukaan di perairan Indonesia pada umumnya berkisar antara 28-32 °C, sedangkan nilai suhu pada kanal *Water Discharge* atau *outlet* relatif tinggi dan menurun seiring menjauhi sumber buangan.

4.7 Adaptasi Terumbu Karang terhadap Peningkatan Suhu PLTU Paiton

Suhu permukaan laut di sekitar stasiun yang terdapat *outlet canal* seperti *Water Discharge* Barat dan *Water Discharge* Timur memiliki suhu yang tinggi dikarenakan tempat pembuangan air bahang. Secara teori, stasiun WD seharusnya memiliki persentase tutupan karang hidup terendah karena mendapatkan cekaman panas yang paling intens, mengingat posisinya yang berada dekat dengan kanal *Water Discharge*. Akan tetapi, berdasarkan studi ini, stasiun WD termasuk dalam lokasi pemantauan yang memiliki kondisi terumbu karang terbaik setelah stasiun MR (Mercusuar) dan WI (*Water Intake*). Kondisi sedemikian menunjukkan bahwa cekaman suhu tinggi masih dapat ditoleransi oleh karang-karang yang ada (Laporan *Monitoring* PJB Paiton, 2020).

Pada titik lokasi pengamatan yaitu di sekitar *Water Discharge* atau *outlet canal* yang dominan suhunya lebih tinggi dari area lainnya, terumbu karang di perairan tersebut telah berhasil beradaptasi. Adaptasi karang terhadap peningkatan suhu permukaan laut yang cukup signifikan di sekitar *outlet canal* ditandai dengan bentuk karang di daerah tersebut. Berdasarkan Laporan *Monitoring* PJB, Paiton (2020), bentuk karang dominan yang hidup di *outlet canal* atau *water discharge* adalah karang *massive* dan *submassive* (Gambar 28).



Gambar 28. Bentuk Adaptasi Karang di *Water Discharge*. (a) Karang *Massive*; (b) Karang *Submassive*.

Koloni-koloni karang *massive* (CM) dan *submassive* merupakan karang yang memiliki kemampuan untuk bertahan dan menangkal *stress* yang tinggi (Muzaky Luthfi, 2016). Jenis karang tersebut umumnya dominan pada perairan dangkal atau area dengan tingkat *stress* yang cukup tinggi, misalnya *stress* karena suhu yang tinggi.

Berdasarkan spesies karang, spesies *Acropora* lebih rentan terkena *bleaching* dibandingkan spesies lainnya. Pada tahun 2016, terjadi *mass bleaching event* dikarenakan fenomena *El Nino* dan rata-rata karang yang terdampak adalah *Acropora Branching* dan *Coral Branching*. Spesies karang di PLTU Paiton, Probolinggo seperti, *Acropora aspera* lebih rentan terkena dampak pemutihan karang dibandingkan spesies karang *Porites Lutea* yang termasuk dalam karang *massive*.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengolahan data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Sebaran pemutihan karang di Perairan PLTU Paiton Probolinggo pada bulan Juli di periode tahun 2016 – 2020 yang terdeteksi menggunakan spektrum citra Sentinel 2 dominan di titik yang jauh dari *outlet* tempat keluarnya air bahang dari PLTU, sedangkan area dekat *outlet* yaitu *Water Discharge* sangat sedikit terdeteksi dugaan pemutihan karang. Spesies karang seperti, *Acropora aspera* lebih rentan terkena dampak pemutihan karang dibandingkan spesies karang *Porites Lutea*. Hal ini dikarenakan terumbu karang di area WD.B dan WD.T dapat beradaptasi dengan suhu air bahang yang cukup tinggi, dapat dilihat dari tipe karang dominannya yaitu karang *massive* dan karang *submassive*.
2. Luas pemutihan karang di Perairan PLTU Paiton Probolinggo pada bulan Juli di periode tahun 2016 – 2020 yang terdeteksi menggunakan spektrum citra Sentinel 2 mengalami penurunan yang signifikan setiap tahunnya, kecuali pada tahun 2020 yang sempat mengalami kenaikan sebesar 0.37 Ha, menjadi 0.4 Ha. Luas pemutihan karang terbesar berada di tahun 2016 dengan luas 1.5 Ha. Hal ini dipengaruhi oleh adanya fenomena El-Nino yang terjadi pada periode pertengahan 2015 hingga pertengahan 2016 yang menyebabkan suhu permukaan laut lebih tinggi pada tahun 2016.
3. Kegiatan PLTU Paiton yang mempengaruhi naiknya suhu permukaan laut adalah saat aktivitas pembuangan limbah air bahang yang panas menuju

perairan. Sebaran SPL *in situ* pada tahun 2020 dan sebaran SPL rata-rata citra pada tahun 2016 – 2020 menunjukkan bahwa SPL di perairan PLTU Paiton, khususnya pada *outlet* tempat keluarnya limbah air bahang masih dibawah BML yaitu 33.9°C.

5.2 Saran

Keakurasian yang diketahui melalui nilai spektral citra satelit Sentinel 2, disarankan untuk melakukan uji akurasi dengan melakukan *groundcheck* titik duga terjadinya pemutihan karang. Dengan melakukan uji akurasi, akan diketahui apakah nilai spektral dari citra Sentinel-2 sudah akurat dan juga dapat mengetahui keakuratan dari koreksi kedalaman yang dilakukan.





DAFTAR PUSTAKA

- Andana, E. K. (2015). Pengembangan data citra satelit landsat-8 untuk pemetaan area tanaman hortikultura dengan berbagai metode algoritma indeks vegetasi (studi kasus: kabupaten malang dan sekitarnya). 10.
- Arini, D. I. D. (2013). Potensi terumbu karang indonesia“tantangan dan upaya konservasinya.” 27.
- Aulia, Q. A., & Sari, N. W. P. (2020). Coral bleaching, karang hidup atau mati? 45, 10.
- Collin, A., Laporte, J., Koetz, B., Martin-Lauzer, F.-R., & Desnos, Y.-L. (2018). Mapping bathymetry, habitat, and potential bleaching of coral reefs using Sentinel-2. 17.
- Du, Z., Li, W., Zhou, D., Tian, L., Ling, F., Wang, H., Gui, Y., & Sun, B. (2014). Analysis of Landsat-8 OLI imagery for land surface water mapping. *Remote Sensing Letters*, 5(7), 672–681. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.960606>
- Fachrurrozie, A., & Patria, M. P. (2012). Pulau pari, kepulauan seribu. 2, 11.
- Farid Muhsoni, F. (2018). Comparison of different vegetation indices for assessing mangrove density using sentinel-2 imagery. *international journal of geomate*, 14(45). <https://doi.org/10.21660/2018.45.7177>
- Global Journal of Science Frontier Research. (2018). 35.
- Gushchina, D., Heimsch, F., Osipov, A., June, T., Rauf, A., Kreilein, H., Panferov, O., Olchev, A., & Knohl, A. (2019). Effects Of The 2015–2016 El Niño Event On energy and co2 fluxes of a tropical rainforest in central sulawesi, indonesia. *geography, environment, sustainability*, 12(2), 183–196. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-88>
- Habibie, M. N., & Nuraini, T. A. (2014). karakteristik dan tren perubahan suhu permukaan laut di indonesia periode 1982-2009. *jurnal meteorologi dan geofisika*, 15(1). <https://doi.org/10.31172/jmg.v15i1.171>
- Hedley, J., Roelfsema, C., Koetz, B., & Phinn, S. (2012). Capability of the Sentinel 2 mission for tropical coral reef mapping and coral bleaching detection. *Remote Sensing of Environment*, 120, 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.028>
- Irawan, J., Sasmito, B., & Suprayogi, A. (2017). *Jurnal Geodesi Undip*. 6, 6.
- Jaelani, L. M., & Afifi, Z. (2016). Study of coral bleaching mapping using high resolution images (A case study: The Water Area of PLTU Paiton Probolinggo). *Geoid*, 11(2), 144. <https://doi.org/10.12962/j24423998.v11i2.1258>
- Langford, T. E. L. (2001). Thermal Discharges And Pollution. In *Encyclopedia of Ocean Sciences* (pp. 2933–2940). Elsevier. <https://doi.org/10.1006/rwos.2001.0051>
- Laporan karang pjb paiton 1-2 2020 (Rev 01).pdf. (n.d.).
- Liu, G., Skirving, W. J., Geiger, E. F., Heron, S. F., Tirak, K. V., Strong, A. E., & Eakin, C. M. (2017). NOAA Coral Reef Watch’s 5km Satellite Coral Bleaching Heat Stress Monitoring Product Suite Version 3 and Four-Month Outlook Version 4. 32(1), 7.
- Lyzenga, D. R. (2006). Comparison of windsat brightness temperatures with two-scale model predictions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(3), 549–559. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.857082>

- Mastu, L. O. K., Nababan, B., & Panjaitan, J. P. (2018). Pemetaan habitat bentik berbasis objek menggunakan citra sentinel-2 di perairan pulau wangi-wangi kabupaten wakatobi. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 10(2), 381–396. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v10i2.21039>
- Mukhtasor, M. (2007). *Pencemaran Pesisir dan Laut (Vol. Xxv)*.
- Muzaky Luthfi, O. (2016). Coral reef conservation using coral garden initiative in sempu island. *Journal of Innovation and Applied Technology*, 2(1), 210–216. <https://doi.org/10.21776/ub.jiat.2016.002.01.7>
- Nabilah, F., Prasetyo, Y., & Sukmono, A. (2017). *Jurnal Geodesi Undip Oktober 2017*. 6, 11.
- NOAA, C. (2016). Retrieved November 10, 2016, from https://coralreefwatch.noaa.gov/product/5km/index_5km_baa-max-7d.php
- NOAA, C. (2017). Retrieved November 10, 2017, from https://coralreefwatch.noaa.gov/product/5km/index_5km_baa-max-7d.php
- NOAA, C. (2018). Retrieved November 10, 2018, from https://coralreefwatch.noaa.gov/product/5km/index_5km_baa-max-7d.php
- NOAA, C. (2019). Retrieved November 10, 2019, from https://coralreefwatch.noaa.gov/product/5km/index_5km_baa-max-7d.php
- NOAA, C. (2020). Retrieved November 10, 2020, from https://coralreefwatch.noaa.gov/product/5km/index_5km_baa-max-7d.php
- Nurdin et al. (2012) Spectral response of the coral rubble, living coral.
- Oktaviani, A., & Johan, Y. (2016). Perbandingan resolusi spasial, temporal dan radiometrik serta kendalanya. *jurnal enggano*, 1(2), 74–79. <https://doi.org/10.31186/jenggano.1.2.74-79>
- Prasetya, Y. E., Hidayat, A. R. T., & Dinanti, D. (2019). Village Development Index of Probolinggo Coastal Villages Case study: Bhinor Village, Paiton District. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 328, 012056. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/328/1/012056>
- Rudi (2012). *Pemutihan Karang di Perairan Laut Natuna Bagian Selatan*. Vol., 8, 2.
- Rudi, E. (2005). Kondisi Terumbu Karang di Perairan Sabang Nanggroe Aceh Darussalam setelah Tsunami. . . Vol., 10, 6.
- Statusofcoralreefsbeforeandaftermassbleachingevent2010incoastalwaterofPLTU Paiton.pdf. (n.d.).
- Suwargana, N. (2013). RESOLUSI SPASIAL, TEMPORAL DAN SPEKTRAL PADA CITRA SATELIT LANDSAT, SPOT DAN IKONOS. 1, 8.
- Syaifullah, M. Dj. (2018). Suhu Permukaan Laut Perairan Indonesia dan Hubungannya dengan Pemanasan Global. *Jurnal Segara*, 11(2). <https://doi.org/10.15578/segara.v11i2.7356>
- Tang, Q., Gao, H., Lu, H., & Lettenmaier, D. P. (2009). Remote sensing: Hydrology. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 33(4), 490–509. <https://doi.org/10.1177/0309133309346650>
- Thalib, M. S., Nurdin, N., & Aris, A. (2018). The Ability of Lyzenga's Algorithm for Seagrass Mapping using Sentinel-2A Imagery on Small Island, Spermonde Archipelago, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 165, 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/165/1/012028>
- Wibowo, M., & Asvaliantina, V. (2018). Kajian Dispersi Panas Akibat Air Limbah Rencana Pembangunan PLTU Kuala Tungkal—Provinsi Jambi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 19(1), 1. <https://doi.org/10.29122/jtl.v19i1.1736>
- Wicaksono, A., Muhsoni, F. F., & Fahrudin, A. (2010). Aplikasi data citra satelit noaa-17 untuk mengukur variasi suhu permukaan laut jawa. 3, 5.
- Xu, J., Zhao, J., Wang, F., Chen, Y., & Lee, Z. (2021). Detection of Coral Reef Bleaching Based on Sentinel-2 Multi-Temporal Imagery: Simulation and



LAMPIRAN

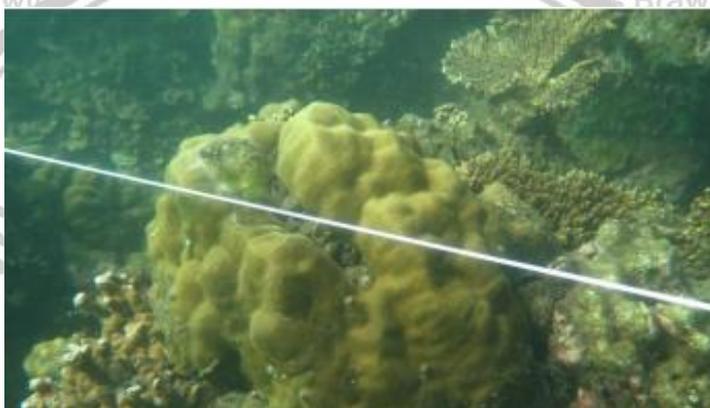
Lampiran 1. Dokumentasi Terumbu Karang Lokasi Binor



Lampiran 2. Dokumentasi Terumbu Karang Lokasi Mercusuar



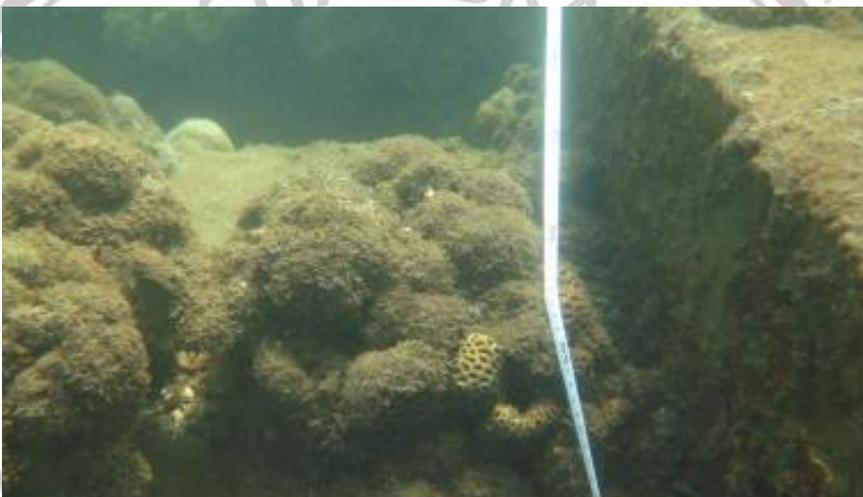
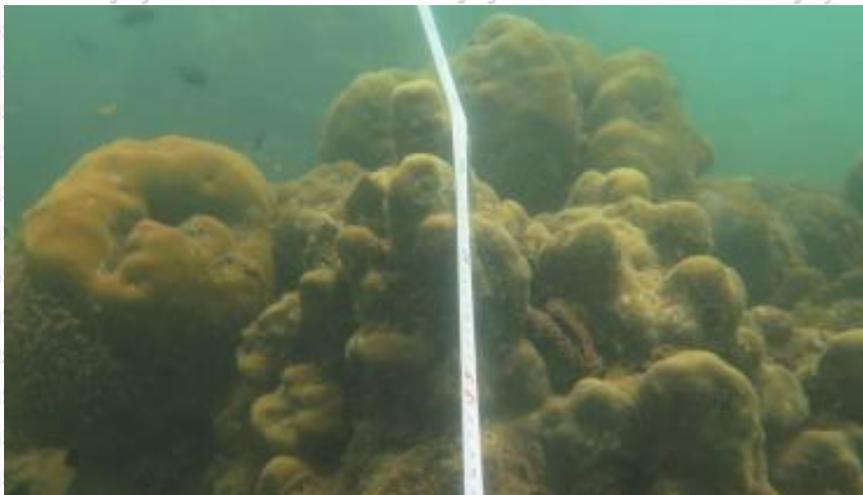
Lampiran 3. Dokumentasi Terumbu Karang Lokasi Water Intake



Lampiran 4. Dokumentasi Terumbu Karang Lokasi Water Discharge Barat



Lampiran 5. Dokumentasi Terumbu Karang Lokasi Water Discharge Timur



Lampiran 6. Script Deteksi Coral Bleaching Google Earth Engine

// Import dan memilih citra Sentinel 2A pada rentang waktu dan dan area beserta

```
cloud mask
function maskS2clouds(image) {
  var qa = image.select('QA60');

  var cloudBitMask = 1 << 10;
  var cirrusBitMask = 1 << 11;

  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0).and(
    qa.bitwiseAnd(cirrusBitMask).eq(0));

  return image.updateMask(mask).divide(10000)
    .select("B.*")
    .copyProperties(image, ["system:time_start"]);
}

var sr2ACol = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR')
  .filterDate('2020-01-01', '2020-12-06')
  .filterBounds(Area)
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20))
  .map(maskS2clouds)
  .median();
Map.centerObject(Area, 13.5);

Map.setCenter(113.58,-7.71);
Map.addLayer(sr2ACol.clip(Area), imageVisParam , 'RGB');

// Koreksi permukaan (Xij)
// Rerata nilai laut dalam

var image = sr2ACol.select('B1', 'B2', 'B3', 'B4', 'B8').clip(Area);

var extent = ee.Feature(lautdalam);
var deepAve = image.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  geometry: extent.geometry(),
  scale: 10,
  maxPixels: 1e9
});

print(deepAve);

// step 4.2 implementasi algoritma Xi = ln(laut dangkal - rerata laut dalam)
var X1cor = image.select(['B1']).subtract(0.0298).log().rename('X1');
var X2cor = image.select(['B2']).subtract(0.0288).log().rename('X2');
```

```

var X3cor = image.select(['B3']).subtract(0.0230).log().rename('X3');
var X4cor = image.select(['B4']).subtract(0.0130).log().rename('X4');

var Xij = X1cor.addBands(X2cor).addBands(X3cor).addBands(X4cor);

Map.addLayer(Xij, imageVisParam2, 'Image Koreksi Permukaan');

// Implementasi algoritma Yij
// Calculate ki/kj
var imgsand = Xij.clip(Sand);
var k23 = imgsand.select(['X2','X3'])
    .reduceRegion(ee.Reducer.linearRegression(1,1),
    imgsand.get('system:footprint'), 10);
print(k23);
var k24 = imgsand.select(['X2','X4'])
    .reduceRegion(ee.Reducer.linearRegression(1,1),
    imgsand.get('system:footprint'), 10);
print(k24);
var k34 = imgsand.select(['X3','X4'])
    .reduceRegion(ee.Reducer.linearRegression(1,1),
    imgsand.get('system:footprint'), 10);
print(k34);

// Calculate depth invariance index
var Y23 =
Xij.select(['X2']).subtract(Xij.select(['X3']).multiply(0.83393)).rename('Y23');
var Y24 =
Xij.select(['X2']).subtract(Xij.select(['X4']).multiply(0.80444)).rename('Y24');
var Y34 =
Xij.select(['X3']).subtract(Xij.select(['X4']).multiply(0.96498)).rename('Y34');

var Yij = Y23.addBands(Y24).addBands(Y34);

Map.addLayer(Yij, imageVisParam3, 'Indeks Kedalaman Yij');

// Export the image, specifying scale and region.
Export.image.toDrive({
  image: Y23,
  description: 'DII',
  scale: 7,
  region: Area,
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});

```

Lampiran 7. Script SPL Mapping Google Earth Engine

```
//Mencari image
var hasil = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR')
  .filterBounds(geometry)
  .filterDate('2015-01-01','2015-12-31')
  .filterMetadata('CLOUD_COVER', 'less_than', 5);
print(hasil);

//Vis params
var vizParams = {
  bands: ['B5', 'B6', 'B4'],
  min: 0,
  max: 4000,
  gamma: [1, 0.9, 1.1]
};

var vizParams2 = {
  bands: ['B4', 'B3', 'B2'],
  min: 0,
  max: 3000,
  gamma: 1.4,
};

//Load landsat 8 sr image
{
  var
    image =
    ee.Image('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR/LC08_118065_20151022').clip(geometry);
  print(image, 'image');
  Map.addLayer(image, vizParams2);
}

//Median (NDVI)
{
  var ndvi = image.normalizedDifference(['B5',
    'B4']).rename('NDVI').clip(geometry);
  var ndviParams = {min: -1, max: 1, palette: ['blue', 'white',
    'green']};
  print(ndvi,'ndvi');
  Map.addLayer(ndvi, ndviParams, 'ndvi');
}
```

```
//Select thermal band 10(with brightness temperature), no calculation
var thermal= image.select('B10').multiply(0.1).clip(geometry);
var b10Params = {min: 291.918, max: 302.382, palette: ['blue',
'white', 'green']};
Map.addLayer(thermal, b10Params, 'thermal');

// Find the min and max of NDVI
{
var min = ee.Number(ndvi.reduceRegion({
reducer: ee.Reducer.min(),

scale: 30,
maxPixels: 1e9
}).values().get(0));
print(min, 'min');

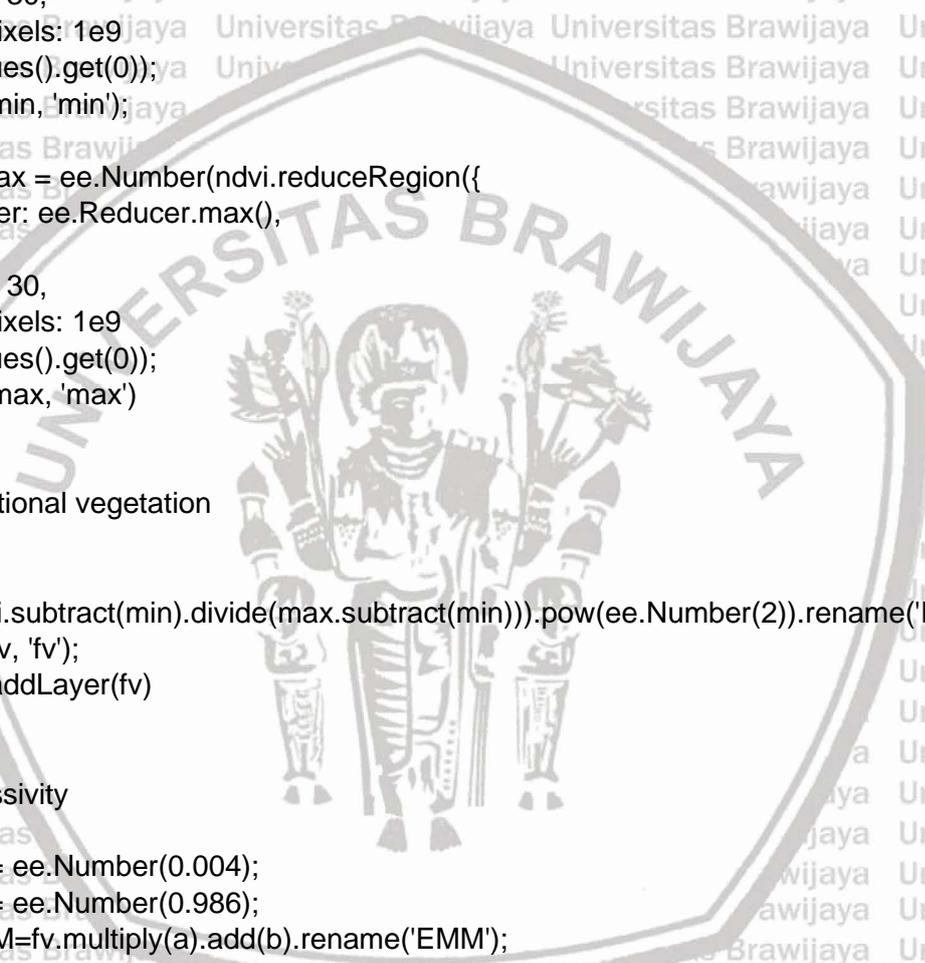
var max = ee.Number(ndvi.reduceRegion({
reducer: ee.Reducer.max(),

scale: 30,
maxPixels: 1e9
}).values().get(0));
print(max, 'max')
}

//Fractional vegetation
{
var
=(ndvi.subtract(min).divide(max.subtract(min))).pow(ee.Number(2)).rename('FV');
print(fv, 'fv');
Map.addLayer(fv)
}

//Emissivity
var a= ee.Number(0.004);
var b= ee.Number(0.986);
var EM=fv.multiply(a).add(b).rename('EMM');
var imageVisParam3 = {min: 0.9865619146722164, max:0.989699971371314};
Map.addLayer(EM, imageVisParam3, 'EMM');

//LST in Celsius Degree bring -273.15
//NB: In Kelvin don't bring -273.15
var SST = thermal.expression(
'Tb/(1 + (0.00115* (Tb / 1.438))*log(Ep)))-273.15', {
'Tb': thermal.select('B10'),
'Ep': EM.select('EMM')
}).rename('SST').clip(geometry);
```



```
//Min max LST
{
  var min = ee.Number(SST.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.min(),
    scale: 30,
    maxPixels: 1e9
  })).values().get(0);
  print(min, 'minLST');

  var max = ee.Number(SST.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.max(),
    scale: 30,
    maxPixels: 1e9
  })).values().get(0);
  print(max, 'maxLST')
}

Map.addLayer(SST, {min: 12.19726940544291, max:35.6701111498399, palette:
[
  '040274', '040281', '0502a3', '0502b8', '0502ce', '0502e6',
  '0602ff', '235cb1', '307ef3', '269db1', '30c8e2', '32d3ef',
  '3be285', '3ff38f', '86e26f', '3ae237', 'b5e22e', 'd6e21f',
  'fff705', 'ffd611', 'ffb613', 'ff8b13', 'ff6e08', 'ff500d',
  'ff0000', 'de0101', 'c21301', 'a71001', '911003'
]}, 'LST');

Export.image.toDrive({
  image: SST,
  description: 'SST',
  folder: "image EE",
  scale: 30,
  region: image,
  fileFormat: 'GeoTIFF',
  formatOptions: {
    cloudOptimized: true
  }
});
```

