

TUGAS AKHIR - CM234734

Perbandingan Sebaran Sedimen dan Morfologi Menggunakan *Angular Response Analysis* dan *Bathymetry Position Index* pada Zona Semburan dan Non-Semburan Gas

Raka Pediansyah Miharsa Lukito

NRP 5016221074

Dosen Pembimbing

Irena Hana Hariyanto, S.T., M.T.

NIP 2022199812024

Dr. Marina C. G. Frederik

NIP 196703281998012001

Program Studi S-1 Teknik Geomatika

Departemen Teknik Geomatika

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2026



TUGAS AKHIR - CM234734

**Perbandingan Sebaran Sedimen dan Morfologi
Menggunakan *Angular Response Analysis* dan
Bathymetry Position Index pada Zona Semburan
dan Non-Semburan Gas**

Raka Pediansyah Miharsa Lukito

NRP 5016221074

Dosen Pembimbing

Irena Hana Hariyanto, S.T., M.T.

NIP 2022199812024

Dr. Marina C. G. Frederik

NIP 196703281998012001

Program Studi S-1 Teknik Geomatika

Departemen Teknik Geomatika

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2026



FINAL PROJECT - CM234734

Comparison of Sediment Distribution and Morphology Using Angular Response Analysis and Bathymetric Position Index in Eruption and Non-Eruption Gas Zones

Raka Pediansyah Miharsa Lukito

NRP 5016221074

Advisor

Irena Hana Hariyanto, S.T., M.T.

NIP 2022199812024

Dr. Marina C. G. Frederik

NIP 196703281998012001

Undergraduate Program of Geomatics Engineering

Department of Geomatics Engineering

Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2026

LEMBAR PENGESAHAN

Perbandingan Sebaran Sedimen dan Morfologi Menggunakan *Angular Response Analysis* dan *Bathymetry Position Index* pada Zona Semburan dan Non-Semburan Gas

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Geomatika
Departemen Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **Raka Pediansyah Miharsa Lukito**

NRP. 5016221074

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Irena Hana Hariyanto, S.T., M.T.
NIP. 2022199812024

Pembimbing

2. Dr. Marina C. G. Frederik
NIP. 196703281998012001

Ko-Pembimbing



3. Dr. Khomsin, S.T., M.T.
NIP. 197507052000121001

Penguji

4. Dr. Muhammad Aldila Syariz, S.T., M.S., Ph.D.
NIP. 2022199211023

Penguji

5. Candida Aulia De Silva Nusantara, S.T., M.T.
NIP. 199508282024061001

Penguji

SURABAYA

Juli, 2026

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

APPROVAL SHEET

Comparison of Sediment Distribution and Morphology Using Angular Response Analysis and Bathymetric Position Index in Eruption and Non-Eruption Gas Zones

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements

For obtaining a bachelor's degree of engineering at

Undergraduate study program of Geomatics Engineering

Department of Geomatics Engineering

Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **Raka Pediansyah Miharsa Lukito**

NRP. 5016221074

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Irena Hana Hariyanto, S.T., M.T.
NIP. 2022199812024

Advisor

2. Dr. Marina C. G. Frederik
NIP. 196703281998012001

Co-Advisor



3. Dr. Khomsin, S.T., M.T.
NIP. 197507052000121001

Examiner

4. Dr. Muhammad Aldila Syariz, S.T., M.S., Ph.D.
NIP. 2022199211023

Examiner

5. Candida Aulia De Silva Nusantara, S.T., M.T.
NIP. 199508282024061001

Examiner

SURABAYA

July, 2026

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Raka Pediansyah Miharsa Lukito / 5016221074
Program studi : Teknik Geomatika
Dosen Pembimbing / NIP : Irena Hana Hariyanto, S.T., M.T. / 2022199812024
Dr. Marina C. G. Frederik / 196703281998012001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Perbandingan Sebaran Sedimen dan Morfologi Menggunakan *Angular Response Analysis* dan *Bathymetry Position Index* pada Zona Semburan dan Non-Semburan Gas” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 6 Juli 2026

Mengetahui,

Dosen Pembimbing



Irena Hana Hariyanto, S.T., M.T.
NIP. 2022199812024

Dosen Pembimbing



Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat yang diterbitkan oleh Badan Penyelenggara Sertifikasi Elektronik (BPSERT) yang dapat diverifikasi dengan melakukan scan QR Code

Dr. Marina C. G. Frederik
NRP. 196703281998012001

Mahasiswa



Raka Pediansyah Miharsa Lukito
NRP. 5016221074

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Raka Pediansyah Miharsa Lukito / 5016221074
Department : Teknik Geomatika
Advisor / NIP : Irena Hana Hariyanto, S.T., M.T. / 2022199812024
Dr. Marina C. G. Frederik / 196703281998012001

hereby declare that the Final Project with the title of “Comparison of Sediment Distribution and Morphology Using Angular Response Analysis and Bathymetric Position Index in Eruption and Non-Eruption Gas Zones” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 6 Juli 2026

Acknowledge,

Advisor,



Irena Hana Hariyanto, S.T., M.T.
NIP. 2022199812024

Co-Advisor,



Dr. Marina C. G. Frederik
NRP. 196703281998012001

Student,



Raka Pediansyah Miharsa Lukito
NRP. 5016221074

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ABSTRAK

Perbandingan Sebaran Sedimen dan Morfologi Menggunakan *Angular Response Analysis* dan *Bathymetry Position Index* pada Zona Semburan dan Non-Semburan Gas

Nama Mahasiswa / NRP : Raka Pediansyah Miharsa Lukito / 5016221074
Departemen : Teknik Geomatika FTSPK - ITS
Dosen Pembimbing : Irena Hana Hariyanto, S.T., M.T. / 2022199812024
Dr. Marina C. G. Frederik / 196703281998012001

Abstrak

Aktivitas semburan gas bawah laut merupakan proses geologi aktif yang dapat membentuk morfologi khas dan memengaruhi karakteristik sedimen dasar laut. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan morfologi dasar laut dan sebaran sedimen antara zona semburan dan non-semburan gas di perairan Cekungan Weh, Aceh. Data primer berupa *raw data* MBES Kongsberg EM304 yang diakuisisi pada Mei 2024 diolah menggunakan *Bathymetric Position Index* (BPI) untuk klasifikasi struktur morfologi, serta *Angular Response Analysis* (ARA) untuk klasifikasi sedimen berdasarkan pola respons sudut intensitas *backscatter*. Uji korelasi *Pearson* digunakan untuk mengkuantifikasi hubungan antara intensitas *backscatter* dengan ukuran butir sedimen. Hasil penelitian menunjukkan perbedaan morfologi yang signifikan. Fitur utama Area semburan teridentifikasi sebagai *Submarine Ridge* pada kedalaman 58 m hingga 2.318 m dengan nilai *slope* mencapai $>45^\circ$ dan *rugosity* maksimum 0,3. Sedangkan, fitur utama area non-semburan teridentifikasi sebagai *Seamount* pada kedalaman 1.854 m hingga 3.528 m. Klasifikasi sedimen menggunakan ARA menghasilkan tiga kelas pada area semburan (batuan, pasir, dan lanau) dan dua kelas pada area non-semburan (batuan dan pasir), dengan *Overall Accuracy* 86,7% dan nilai *Cohen's Kappa* 0,444. Korelasi *backscatter*-phi Wentworth menunjukkan hubungan negatif kuat pada area semburan ($R^2 = 0,603$; $r = -0,777$) dan sangat kuat pada area non-semburan ($R^2 = 0,761$; $r = -0,872$). Hal tersebut mengonfirmasi bahwa aktivitas gas melemahkan hubungan antara akustik dengan sedimen. Integrasi BPI dan ARA terbukti efektif untuk pemetaan laut dalam, meskipun kinerja ARA menurun pada morfologi yang kompleks.

Kata kunci: *Multibeam Echosounder; Angular Response Analysis; Bathymetric Position Index; Morfologi bawah laut; Klasifikasi sedimen dasar laut.*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ABSTRACT

Comparison of Sediment Distribution and Morphology Using Angular Response Analysis and Bathymetric Position Index in Eruption and Non-Eruption Gas Zones

Student Name / NRP : Raka Pediansyah Miharsa Lukito / 5016221074
Department : Geomatics Engineering FTSPK - ITS
Advisor : Irena Hana Hariyanto, S.T., M.T. / 2022199812024
Dr. Marina C. G. Frederik / 196703281998012001

Abstract

Submarine gas is an active geological process that shapes distinctive seafloor morphology and alters sediment characteristics. This study aims to compare seafloor morphology and sediment distribution between potential and non-potential gas zones in the Weh Basin, Aceh. Raw data from a Kongsberg EM304 *Multibeam Echosounder* (MBES), acquired in May 2024, were processed using Bathymetric Position Index (BPI) for morphological structure classification and Angular Response Analysis (ARA) for acoustic-based sediment classification. Pearson correlation analysis was applied to quantify the relationship between *backscatter* intensity and sediment grain size. Results reveal significant morphological contrasts between the two zones. The Gas area was identified as a Submarine Ridge at depths of -58 m to $-2,318$ m, with *slopes* exceeding 45° and a maximum rugosity of 0.3, while the non-gas area was classified as a Seamount at depths between $-1,854$ m and $-3,528$ m. ARA sediment classification identified three classes in the gas zone (rock, sand, and silt) and two classes in the non-gas zone (rock and sand), achieving an overall accuracy of 86.7% and a Cohen's Kappa of 0.444. *Backscatter*–Wentworth phi correlation analysis yielded a strong negative relationship in the seepage zone ($R^2 = 0.603$; $r = -0.777$) and a very strong negative relationship in the non-seepage zone ($R^2 = 0.761$; $r = -0.872$), confirming that gas activity distorts the acoustic–sediment relationship. These findings demonstrate that integrating BPI and ARA is effective for deep-sea mapping, while underscoring the limitations of ARA under complex topographic conditions.

Keywords: *Multibeam Echosounder; Angular Response Analysis; Bathymetric Position Index; Submarine gas seepage; Seafloor sediment classification.*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur Penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan rahmat-Nya, Penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Perbandingan Sebaran Sedimen dan Morfologi Menggunakan *Angular Response Analysis* dan *Bathymetry Position Index* pada Zona Semburan dan Non-Semburan Gas”. Laporan tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Teknik Geomatika, Departemen Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, Penulis mendapat bimbingan, arahan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga penulis yang senantiasa memberikan doa, serta memberikan motivasi dalam penyelesaian tugas akhir ini.
2. Ibu Irena Hana Hariyanto, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing, atas bimbingan, arahan, dan masukan yang diberikan selama proses penelitian dan penyusunan laporan ini.
3. Ibu Dr. Marina C. G. Frederik dari PRLD-BRIN selaku dosen ko-pembimbing, atas diskusi ilmiah dan saran konstruktif yang sangat membantu dalam pengembangan analisis penelitian
4. Bapak Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D., Bapak Dr. Khomsin, S.T., M.T., Bapak Dr. Muhammad Aldila Syariz, S.T., M.S., Ph.D., dan Bapak Candida Aulia De Silva Nusantara, S.T., M.T. selaku dosen Laboratorium Geomarin, atas dukungan fasilitas laboratorium serta kritik dan saran yang turut memperkaya proses penelitian dalam penyusunan tugas akhir ini.
5. Bapak Adam Budi Nugroho, S.T., dari BRIN yang turut mendampingi proses bimbingan bersama Ibu Marina C. G. Frederik dan memberikan masukan teknis yang sangat membantu dalam proses analisis data penelitian ini.
6. Bapak M. Luthfi Aziz, S.T., dari PRTM-BRIN yang melalui koordinasi bersama Ibu Marina C. G. Frederik telah membantu menyediakan akses data ekspedisi BRIN dengan OCEANX yang menjadi data primer dalam penelitian ini.
7. Teman-teman MasYallah yang telah menjadi sahabat dalam memberikan dukungan, cerita, canda, dan tawa selama masa studi dan proses pengerjaan tugas akhir ini.
8. Teman-teman Angkatan G24, atas kebersamaan, dukungan, dan semangat yang selalu hadir selama masa studi dan proses pengerjaan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih memiliki keterbatasan dan jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan ke depannya. Penulis berharap hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan ilmu hidroakustik kelautan, khususnya dalam pemetaan sedimen dan morfologi dasar laut di perairan Indonesia.

Surabaya, Juli 2026

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
APPROVAL SHEET	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
STATEMENT OF ORIGINALITY	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	3
1.5.1 Manfaat Teoritis	3
1.5.2 Manfaat Praktis.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	5
2.2 Sedimen Dasar Laut.....	10
2.2.1 Skala Wentworth	10
2.2.2 Skala Phi (ϕ) Krumbien.....	11
2.3 Karakteristik Morfologi Dasar Laut	12
2.4 <i>Multibeam Echosounder</i>	14
2.5 <i>Backscatter</i>	15
2.5.1 Koreksi <i>Backscatter</i>	16
2.5.2 Mosaik <i>Backscatter</i>	16
2.6 <i>Bathymetry Position Index</i>	17
2.7 <i>Angular Response Analysis (ARA)</i>	20
2.8 Uji Validasi.....	22
2.8.1 <i>Confusion Matrix</i>	22
2.8.2 Regresi Linier	23
2.8.3 Koefisien Determinasi	24
2.8.4 Korelasi <i>Pearson</i>	24
BAB III METODOLOGI.....	25
3.1 Lokasi Penelitian	25
3.2 Bahan dan peralatan yang digunakan	26
3.2.1 Data.....	26
3.2.2 Peralatan	26
3.3 Tahapan Pelaksanaan Penelitian.....	27
3.4 Tahapan pengolahan Data	28
3.4.1 Tahap Pengolahan Batimetri	31
3.4.2 Tahap Pengolahan Parameter Klasifikasi Morfologi.....	33
3.4.3 Tahap pengolahan <i>Backscatter</i>	37

BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1	Hasil	41
4.1.1	Parameter Kuantitatif Morfologi.....	41
4.1.2	Klasifikasi Struktur Morfologi.....	47
4.1.3	Intensitas <i>Backscatter</i>	48
4.1.4	Klasifikasi Sedimen	49
4.1.5	Uji Validasi Klasifikasi Sedimen.....	50
4.1.6	Korelasi Intensitas <i>Backscatter</i> dengan Jenis Sedimen.....	50
4.2	Pembahasan.....	51
4.2.1	Karakteristik Morfologi	51
4.2.2	Struktur dan Fitur Bawah Laut.....	55
4.2.3	Variasi <i>Backscatter</i> dan Sebaran Sedimen.....	64
4.2.4	Evaluasi Akurasi Klasifikasi Sedimen.....	69
4.2.5	Keterkaitan Sebaran Sedimen dengan Kondisi Morfologi.....	73
4.2.6	Korelasi Intensitas <i>Backscatter</i> dengan Jenis Sedimen.....	76
4.2.7	Faktor Penyebab Perbedaan Morfologi dan Sebaran Sedimen antara Area Semburan dan Non-Semburan.....	78
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN.....	81
5.1	Kesimpulan	81
5.2	Saran.....	82
DAFTAR PUSTAKA		83
LAMPIRAN		89
BIODATA PENULIS		97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Contoh Jenis Sedimen Dasar Laut	10
Gambar 2.2 Pancaran Gelombang MBES.....	14
Gambar 2.3 Perekaman Data MBES.....	15
Gambar 2.4 Contoh Mosaik Backscatter	17
Gambar 2.5 Ilustrasi Angular Response Curve.....	20
Gambar 2.6 Confusion Matrix	22
Gambar 3.1 Lokasi Penelitian.....	25
Gambar 3.2 Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian Tugas Akhir	27
Gambar 3.3 Diagram Alir Pengolahan Data (A).....	29
Gambar 3.4 Diagram Alir Pengolahan Data (B).....	30
Gambar 3.5 Kernel 3x3.....	33
Gambar 4.1 Peta Batimetri Area Semburan.....	41
Gambar 4.2 Peta Batimetri Area Non-Semburan.....	42
Gambar 4.3 Peta Slope Area Semburan.....	42
Gambar 4.4 Peta Slope Area Non-Semburan.....	43
Gambar 4.5 Peta Aspect Area Semburan.....	43
Gambar 4.6 Peta Aspect Area Non-Semburan.....	44
Gambar 4.7 Peta Curvature Area Semburan.....	44
Gambar 4.8 Peta Curvature Area Non-Semburan.....	45
Gambar 4.9 Peta Convergence Index Area Semburan.....	45
Gambar 4.10 Peta Convergence Index Area Non-Semburan	46
Gambar 4.11 Peta Rugosity Area Semburan	46
Gambar 4.12 Peta Rugosity Area Non-Semburan	47
Gambar 4.13 Peta Klasifikasi Struktur Morfologi Area Semburan	47
Gambar 4.14 Peta Klasifikasi Struktur Morfologi Area Non-Semburan.....	48
Gambar 4.15 Peta Backscatter Area Semburan	48
Gambar 4.16 Peta Backscatter Area Non-Semburan.....	49
Gambar 4.17 Peta Klasifikasi Sedimen Area Semburan.....	49
Gambar 4.18 Peta Klasifikasi Sedimen Area Non-Semburan	50
Gambar 4.19 Korelasi Jenis Sedimen dengan Intensitas Backscatter pada Area Semburan	51
Gambar 4.20 Korelasi Jenis Sedimen dengan Intensitas Backscatter pada Area Non-Semburan.....	51
Gambar 4.21 Orientasi Aspect pada Area Semburan	53
Gambar 4.22 Orientasi Aspect pada Area Non-Semburan	54
Gambar 4.23 Garis Profil Pada Area Semburan	56
Gambar 4.24 Visualisasi 3D Submarine Ridge	57
Gambar 4.25 Visualisasi 3D Slope	58
Gambar 4.26 Visualisasi 3D Spur.....	58
Gambar 4.27 Pola Patahan Pada Slope (A), Curvature (B), dan CI (C)	59
Gambar 4.28 Visualisasi 3D Segmen Patahan.....	59
Gambar 4.29 Garis Profil Pada Area Non-Semburan.....	61
Gambar 4.30 Visualisasi 3D Seamount	61

Gambar 4.31 Perbedaan Knoll dan Hill.....	62
Gambar 4.32 Visualisasi Model 3D Knoll	63
Gambar 4.33 Visualisasi Model 3D Abysall Plain.....	63
Gambar 4.34 Visualisasi Model 3D Apron	64
Gambar 4.35 Karaktersitik Sedimen pada Area Semburan	65
Gambar 4.36 Karaktersitik Sedimen pada Area Non-Semburan.....	67
Gambar 4.37 Titik Foto ROV	70
Gambar 4.38 Ovelay Titik Foto ROV dengan Klasifikasi Struktur Morfologi.....	73

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
Tabel 2.2 Klasifikasi Sedimen Berdasarkan Skala Wentworth (1922).....	11
Tabel 2.3 Diagram Skala Wentworth dan Krumbien.....	12
Tabel 2.4 Fitur Morfologi Berdasarkan GEBCO	13
Tabel 2.5 Skema Klasifikasi BPI.....	18
Tabel 2. 6 Interpretasi nilai Cohen Kappa	23
Tabel 2.7 Interpretasi Koefisien Determinasi	24
Tabel 2.8 Interpretasi Korelasi Pearson.....	24
Tabel 3.1 Skema Klasifikasi Lundblad	34
Tabel 4.1 Hasil Uji Validasi Sedimen.....	50
Tabel 4.2 Perbandingan Parameter Kuantitatif Morfologi.....	52
Tabel 4.3 Perbedaan Knoll dan Hill.....	62
Tabel 4. 4 Perbandingan Intensitas Backscatter dan jenis Sedimen	68
Tabel 4.5 Perbandingan Data Foto Sedimen dengan ARA.....	70
Tabel 4.6 Data Jenis Sedimen, Kedalaman, Slope, dan Struktur Morfologi BPI pada Setiap Titik Foto ROV	73

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

Bab ini merupakan kerangka awal penelitian yang menjadi dasar penelitian ini. Pada Pendahuluan berisikan latar belakang yang menjelaskan urgensi penelitian terkait fenomena semburan gas bawah laut dan pengaruhnya terhadap karakteristik sedimen dan morfologi dasar laut, rumusan masalah yang merumuskan pertanyaan-pertanyaan ilmiah yang ingin dijawab, batasan masalah yang menentukan ruang lingkup penelitian agar lebih terarah, tujuan penelitian yang merincikan capaian yang ingin diperoleh, serta manfaat penelitian yang menguraikan kontribusi penelitian ini baik secara teoritis maupun praktis.

1.1 Latar Belakang

Laut menutupi lebih dari 70 % permukaan bumi dan menjadi bagian penting dalam sistem bumi, termasuk pengaturan iklim global, penyimpanan karbon, dan penyediaan sumber daya alam (Hilmi dkk., 2023). Sebagai salah satu bagian penting dalam sistem bumi, laut menyimpan berbagai proses geologi aktif seperti aktivitas vulkanik bawah laut dan keluarnya fluida berupa gas dan cairan hidrotermal (Jakobsson dkk., 2020). Proses geologi aktif tidak hanya membentuk morfologi dasar laut, tetapi juga memengaruhi perubahan sedimen dasar laut yang menjadi proses alami dari berbagai kejadian geologis. Proses-proses ini secara langsung memengaruhi pembentukan variasi karakteristik sedimen di laut dalam. Variasi karakteristik sedimen dapat mencerminkan aktivitas geologi di sekitarnya, termasuk proses pelapukan, transportasi material, hingga akumulasi organik dan anorganik di dasar laut (Blott & Pye, 2001). Pola sebaran sedimen yang berbeda di tiap wilayah laut sering kali menjadi indikator adanya dinamika geologi dan oseanografi yang kompleks di bawah permukaan laut (H. Wang dkk., 2023).

Salah satu bentuk dinamika geologi bawah laut yang berperan dalam memengaruhi pola dan karakteristik sedimen adalah fenomena semburan gas bawah laut. Semburan gas terjadi akibat keluarnya gelembung gas dari bawah permukaan ke kolom air laut melalui rekahan atau jalur permeabel di dasar laut (Etiope dkk., 2019). Aktivitas ini sering berkaitan dengan kondisi geologi seperti rekahan tektonik, zona patahan aktif, atau sistem hidrotermal (Naudts dkk., 2008). Proses Semburan gas dapat membentuk morfologi khas di dasar laut seperti *pockmark*, *mud volcano*, dan endapan karbonat hasil presipitasi mineral dari fluida yang keluar (Judd & Hovland, 2007). Selain itu, proses ini juga dapat berpengaruh terhadap kondisi fisik dan kimia dari sedimen, termasuk peningkatan porositas, perubahan ukuran butir, hingga kandungan mineral seperti pirit atau kalsit yang terbentuk (Chang dkk., 2022).

Karakteristik sedimen dan morfologi dasar laut yang dipengaruhi oleh fenomena semburan gas bawah laut menjadi perhatian dalam berbagai penelitian laut dalam. Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa aktivitas semburan gas dapat membentuk fitur morfologi khas seperti *pockmark*, cekungan, dan struktur depresi, yang diikuti oleh perubahan karakteristik sedimen di sekitarnya, termasuk variasi ukuran butir dan tingkat kekasaran permukaan dasar laut (Judd & Hovland, 2007). Penelitian Schneider Von Deimling & Papenberg (2012) menunjukkan bahwa area yang dipengaruhi oleh semburan gas memiliki respons akustik yang berbeda dibandingkan area sekitarnya akibat perubahan sifat fisik sedimen dan keberadaan gas di bawah permukaan. Selain itu, Liu, dkk (2019) menunjukkan hubungan antara semburan gas dan perubahan granulometri sedimen di sekitar *pockmark* aktif. Meskipun penelitian terdahulu telah memanfaatkan teknologi survei dasar laut seperti *Multibeam Echosounder* (MBES) untuk pemetaan morfologi dan klasifikasi sedimen, namun beberapa penelitian tersebut masih belum sepenuhnya mengintegrasikan analisis intensitas *backscatter* dengan data batimetri untuk

membandingkan daerah semburan dan non-semburan gas secara komprehensif. Hal tersebut menunjukkan adanya kesenjangan penelitian terkait integrasi antara data *multibeam* untuk mengidentifikasi karakteristik sedimen dan morfologi pada daerah semburan gas khususnya di wilayah perairan Indonesia.

Salah satu cara untuk mengisi kesenjangan penelitian terdahulu adalah dengan mengintegrasikan data kedalaman dan intensitas *backscatter* yang dihasilkan oleh *Multibeam Echosounder* (MBES) untuk menjelaskan hubungan antara karakteristik sedimen, morfologi, dan aktivitas semburan gas bawah laut. Data kedalaman berfungsi untuk menggambarkan kondisi morfologi dasar laut, seperti adanya depresi, punggungan, atau struktur anomali yang terbentuk akibat aktivitas fluida di bawah permukaan. Sementara itu, nilai intensitas *backscatter* menggambarkan kekuatan energi pantulan gelombang akustik dari dasar laut yang dipengaruhi oleh sifat fisik sedimen seperti ukuran butir, kadar air, kekasaran permukaan, dan kepadatan sedimen (Lurton dkk., 2018). Hubungan antara kedua parameter ini menjadikan analisis *backscatter* sebagai pelengkap penting dalam interpretasi morfologi, karena variasi reflektivitas akustik dapat menunjukkan perbedaan jenis sedimen maupun adanya pengaruh gas di bawah permukaan. Integrasi antara data batimetri dan *backscatter* juga memberikan kemampuan untuk memetakan sebaran endapan secara lebih akurat, terutama di area yang memiliki kompleksitas geologi tinggi seperti zona semburan gas. Pendekatan ini tidak hanya memperkuat pemahaman terhadap dinamika sedimen bawah laut, tetapi juga mendukung pencapaian Sustainable Development Goals (SDGs) poin 14 (Life Below Water), yang menekankan pentingnya konservasi dan pemanfaatan berkelanjutan ekosistem laut. Dengan memahami pola endapan dan aktivitas geologi dasar laut, langkah mitigasi terhadap potensi bahaya geologi bawah laut serta pengelolaan sumber daya kelautan dapat dilakukan secara lebih terarah dan berkelanjutan.

Oleh karena itu, Penelitian ini berfokus pada perbandingan karakteristik sedimen dan morfologi di daerah semburan dan non-semburan gas bawah laut dengan memanfaatkan analisis intensitas *backscatter* dan data kedalaman MBES. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai *backscatter*, kondisi morfologi dasar laut, serta interpretasi jenis sedimen antara dua kondisi area yang berbeda. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi penting untuk memahami proses geologi bawah laut, potensi sumber daya sedimen, serta dampak lingkungan dari aktivitas semburan gas. Penelitian ini juga memiliki manfaat praktis untuk eksplorasi sumber daya kelautan dan mendukung pengelolaan wilayah perairan Indonesia berbasis hidroakustik. Dengan demikian, penelitian diharapkan memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode pemetaan endapan sedimen berbasis MBES yang efisien, akurat, dan mendukung pengelolaan laut berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian yang telah dijelaskan, terdapat batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana karakteristik morfologi dasar laut pada daerah semburan dan non-semburan gas bawah laut berdasarkan hasil pengukuran data kedalaman menggunakan *Multibeam Echosounder* (MBES)?
2. Bagaimana variasi intensitas *backscatter* yang dihasilkan oleh MBES pada daerah semburan dan non-semburan gas bawah laut?
3. Bagaimana korelasi antara intensitas *backscatter* dengan karakteristik sedimen pada daerah semburan dan non-semburan gas bawah laut?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini difokuskan untuk menganalisis karakteristik sedimen pada daerah semburan dan non-sembrun gas bawah laut dengan memanfaatkan data batimetri dan *backscatter* hasil pengukuran *Multibeam Echosounder* (MBES). Beberapa batasan yang ditetapkan agar penelitian lebih terarah dan sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dilakukan di perairan Cekungan Weh, Utara Pulau Weh, Provinsi Aceh. Ruang lingkup area penelitian dibatasi pada wilayah yang telah teridentifikasi memiliki fenomena semburan gas bawah laut dan area sekitarnya yang berfungsi sebagai pembanding (non-sembrun).
2. Klasifikasi morfologi dasar laut menggunakan Bathymetric Position Index (BPI) serta parameter kuantitatif morfologi, seperti *slope*, *aspect*, *general curvature*, *convergence index*, dan *rugosity* yang diturunkan dari *Digital Elevation Model* (DEM) batimetri dengan resolusi grid 25×25 meter.
3. Koreksi pasang surut tidak diterapkan karena area penelitian berada di laut dalam, sehingga fluktuasi muka air laut diasumsikan tidak berpengaruh signifikan terhadap akurasi nilai kedalaman.
4. Validasi klasifikasi sedimen menggunakan foto sedimen ROV sehingga hasil klasifikasi bersifat estimatif, mengingat interpretasi kelas sedimen dari foto masih bersifat subjektif dan tidak setara dengan hasil uji laboratorium.

1.4 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan, penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Menganalisis karakteristik morfologi dasar laut pada daerah semburan dan non-sembrun gas bawah laut berdasarkan hasil pengukuran data kedalaman yang diperoleh menggunakan *Multibeam Echosounder* (MBES).
2. Mengidentifikasi dan membandingkan variasi intensitas *backscatter* yang dihasilkan oleh MBES pada daerah semburan dan non-sembrun gas bawah laut untuk mengetahui pola reflektivitas akustik yang mencerminkan kondisi fisik sedimen.
3. Menganalisis hubungan antara intensitas *backscatter* dengan karakteristik sedimen pada daerah semburan dan non-sembrun gas bawah laut.

1.5 Manfaat

1.5.1 Manfaat Teoritis

Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu hidroakustik kelautan dan geomorfologi bawah laut dalam hal berikut:

1. Memperkuat pemahaman tentang hubungan antara aktivitas semburan gas bawah laut dengan perbedaan karakteristik morfologi dan sebaran sedimen dasar laut melalui pendekatan kuantitatif berbasis data MBES.
2. Memberikan kontribusi metodologis terhadap penerapan integrasi *Angular Response Analysis* (ARA) dan *Bathymetric Position Index* (BPI) secara bersamaan dalam satu studi komparatif antara zona semburan dan non-sembrun gas, yang sebelumnya masih terbatas pada wilayah perairan Indonesia.
3. Mengkaji potensi dan keterbatasan penerapan metode ARA pada area dengan morfologi kompleks, sehingga memberikan kontribusi terhadap

pengembangan metodologi klasifikasi sedimen berbasis MBES yang lebih adaptif terhadap variasi topografi dasar laut.

4. Memperkuat teori mengenai peran aktivitas geologi bawah laut, khususnya semburan gas dalam membentuk variasi karakteristik akustik dan distribusi material sedimen.

1.5.2 Manfaat Praktis

Penelitian ini juga memberikan manfaat praktis sebagai berikut:

1. Peta morfologi dan sebaran sedimen yang dihasilkan dapat mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan sumber daya kelautan berbasis spasial, termasuk penentuan zonasi pemanfaatan dan konservasi dasar laut di perairan Cekungan Weh.
2. Informasi mengenai zona patahan aktif, fitur morfologi khas di area semburan gas, dan pola sebaran sedimen dapat dimanfaatkan sebagai data pendukung awal dalam penilaian bahaya geologi bawah laut (geohazard assessment) dan eksplorasi potensi fluida bawah permukaan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menyajikan landasan teori dan kajian pustaka yang menjadi pendukung teoritis penelitian ini. Pembahasan diawali dengan ringkasan penelitian-penelitian terdahulu yang relevan sebagai bahan perbandingan dan identifikasi kesenjangan penelitian. Selanjutnya, bab ini menguraikan konsep-konsep teoritis yang mendasari penelitian ini, meliputi karakteristik sedimen dasar laut beserta sistem klasifikasinya menggunakan Skala Wentworth dan Skala Phi Krumbein, karakteristik morfologi dasar laut, prinsip kerja *Multibeam Echosounder* (MBES), konsep dan koreksi data *backscatter*, *Bathymetric Position Index* (BPI) sebagai metode klasifikasi morfologi, serta *Angular Response Analysis* (ARA) sebagai metode klasifikasi sedimen, dan diakhiri dengan penjelasan metode uji validasi yang digunakan dalam penelitian, meliputi *confusion matrix*, regresi linier, koefisien determinasi, dan korelasi *Pearson*.

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Kajian pustaka terhadap penelitian terdahulu dilakukan untuk memahami perkembangan metodologi, teknologi, serta hasil temuan yang berkaitan dengan karakterisasi sedimen dan morfologi dasar laut menggunakan *Multibeam Echosounder* (MBES). Beberapa penelitian terdahulu telah memanfaatkan analisis intensitas *backscatter*, *Angular Response Analysis* (ARA) untuk mengidentifikasi jenis dan persebaran sedimen di dasar laut. Penelitian-penelitian tersebut menjadi referensi penting dalam menentukan pendekatan analisis yang digunakan, terutama pada daerah yang memiliki aktivitas geologi dan morfologi kompleks seperti daerah semburan gas bawah laut. Ringkasan dari beberapa penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No	Judul	Lokasi	Metode	Temuan	Keterbatasan
1	<i>The use of multibeam backscatter angular response for marine sediment characterisation by comparison with shallow electromagnetic conductivity</i> (Monteys dkk., 2016)	Perairan pesisir Irlandia	Menggunakan data <i>backscatter</i> dari MBES Kongsberg EM1002 frekuensi 95–98 kHz yang diproses menggunakan ARA di FMGT. Hasil ARA kemudian dikorelasikan dengan data konduktivitas elektromagnetik yang memberikan informasi properti	Berhasil membuktikan bahwa <i>near-range backscatter</i> pada sudut 4–16° merupakan sektor yang paling kuat korelasinya dengan konduktivitas sedimen, terutama di area yang didominasi oleh pasir halus. Selain itu, penelitian ini berhasil membedakan	Hasil analisis sangat bergantung pada spesifikasi sistem MBES yang digunakan, khususnya frekuensi pulsa dan pola <i>beam</i> .

No	Judul	Lokasi	Metode	Temuan	Keterbatasan
			subsurface sedimen, dan didukung oleh 12 sampel sedimen.	sedimen berpasir dan berlumpur pada daerah yang mengandung gas.	
2	<i>Acoustic and biological characteristics of seafloor depressions in the North Yellow Sea Basin of China: Active fluid seepage in shallow water seafloor</i> (Liu dkk., 2019)	Cekungan Laut Kuning Utara, Tiongkok	Penelitian ini menggabungkan beberapa dataset yang diakuisisi pada waktu berbeda. Data batimetri dan <i>backscatter</i> MBES yang diperoleh pada 2011, data <i>sub-bottom profile</i> pada 2013, serta data <i>side scan sonar</i> dan seismik pada 2017. Sebelas sampel sedimen permukaan diambil menggunakan box corer berukuran 30×30 cm dengan distribusi di dalam <i>pockmark</i> , di tepian <i>pockmark</i> , dan di luar <i>pockmark</i> sebagai pembanding.	Sebanyak 282 <i>pockmark</i> berhasil diidentifikasi dengan morfologi beragam. Nilai intensitas <i>backscatter</i> di dalam <i>pockmark</i> rata-rata 3–5 dB lebih tinggi dibandingkan di luar, yang dikaitkan dengan kehadiran sedimen kasar, komunitas fauna benthik yang padat, serta mineralisasi diagenetik seperti pirit dan sementasi karbonat. Data sedimen menunjukkan perbedaan nyata ukuran butir antara area di dalam dan di luar <i>pockmark</i> , dan rekaman <i>side scan sonar</i> mengkonfirmasi keberadaan plum sedimen di kolom air yang menandakan <i>pockmark</i> masih aktif.	Seluruh dataset tidak diakuisisi pada waktu yang sama, sehingga kondisi yang terekam pada tiap dataset bisa jadi berbeda. Secara spesifik, penulis menyatakan bahwa gas yang terdeteksi pada profil seismik survei sebelumnya belum tentu masih ada pada saat survei terkini, karena kemungkinan besar gas tersebut telah lepas ke kolom air selama proses pembentukan <i>pockmark</i> berlangsung.

No	Judul	Lokasi	Metode	Temuan	Keterbatasan
3	<i>Morphometric Analysis of the Submarine Arc Volcano Monowai (Tofua–Kermadec Arc) to Decipher Tectono-Magmatic Interactions</i> (Wormald dkk., 2012)	Gunung berapi bawah laut Monowai, Busur Tofua Kermadec	Data batimetri dan <i>backscatter</i> MBES EM300 frekuensi 30 kHz dan di- <i>gridding</i> pada resolusi 25 m. Analisis morfometri dilakukan di ArcGIS 9.3 menggunakan fungsi <i>Slope, Aspect, Rugosity, Hydrology</i> , dan <i>Curvature</i> pada kernel 3×3 sel.	Struktur kaldera bersarang teridentifikasi dengan volume evakuasi 30,9 km ³ untuk kaldera luar dan 13,6 km ³ untuk kaldera dalam. Elongasi kaldera luar (125°) berorientasi tegak lurus terhadap orientasi sesar regional (031°), sementara elongasi kaldera dalam (135°) tegak lurus terhadap struktur magmatik (<i>fissure ridge</i> 041°). Pergeseran 10° antara kedua kaldera ini diinterpretasikan sebagai refleksi dari perubahan temporal interaksi tektonik dengan magmatik.	volume stratovolcano Monowai yang dilaporkan merupakan nilai minimum karena tidak terdapat cakupan survei di lereng tenggara bawah dari struktur tersebut. Selain itu, magmatisme konstruktif sebelum pembentukan kaldera tidak dapat ditentukan dari data yang tersedia, dan urutan waktu relatif antara kaldera dalam dengan stratovolcano tidak dapat diketahui hanya berdasarkan geomorfologi saja.

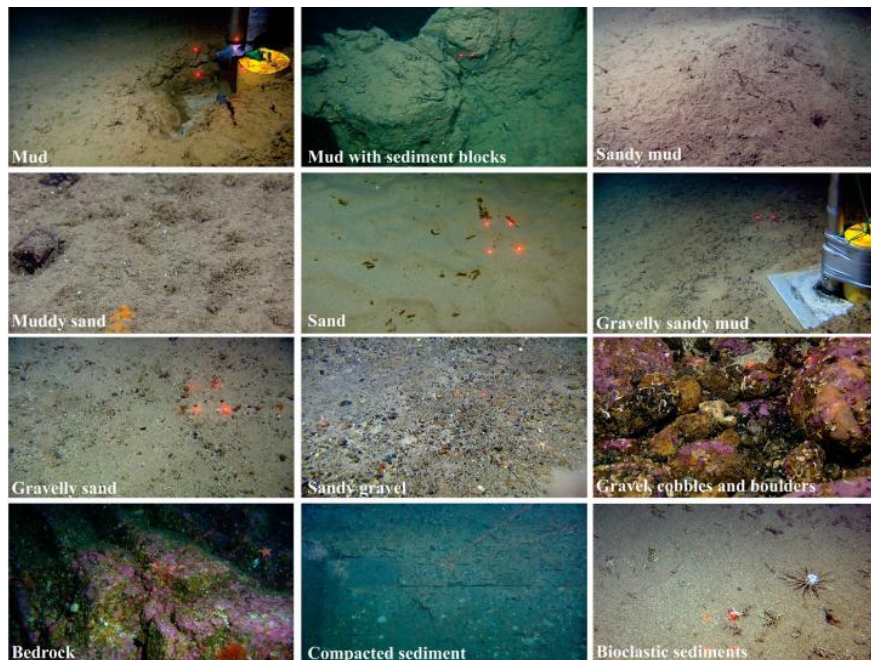
No	Judul	Lokasi	Metode	Temuan	Keterbatasan
4	Klasifikasi Morfologi Dasar Laut Perairan Pulau Kemujan, Kepulauan Karimunjawa (Rahman dkk., 2023)	Perairan Pulau Kemujan, Kepulauan Karimunjawa, Indonesia	Data batimetri diperoleh dari transformasi citra Sentinel-2A menggunakan algoritma SVR. Data ini kemudian diproses menggunakan <i>Benthic Terrain Modeler</i> (BTM) yang terintegrasi pada ArcGIS untuk menghitung <i>Fine BPI</i> (skala 25) dan <i>Broad BPI</i> (skala 100) dengan resolusi spasial 10 m. Kombinasi nilai <i>Fine BPI</i> , <i>Broad BPI</i> , dan <i>slope</i> dimasukkan ke dalam tabel keputusan klasifikasi untuk menghasilkan kelas morfologi dasar laut.	Tujuh kelas morfologi berhasil diidentifikasi yaitu <i>crest</i> , <i>valley bottom</i> , <i>flat</i> , <i>rough</i> , <i>valley flanks</i> , <i>break shelf</i> , dan <i>depression</i> . Kelas <i>rough</i> mendominasi area penelitian dengan luas 429,36 ha (65,56%), yang mengindikasikan dasar perairan Pulau Kemujan cenderung datar dan landai. Berdasarkan pengamatan lapangan, kelas <i>crest</i> yang berada di tepian pantai dan bagian tengah berasosiasi dengan gugusan terumbu karang, sementara kelas <i>rough</i> yang mendominasi terdiri dari hamparan pasir dan pecahan karang.	Penggunaan nilai skala pada <i>fine</i> dan <i>broad</i> dianggap masih belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi aktual di lapangan. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan faktor skala yang berbeda dengan resolusi spasial yang lebih tinggi, karena pemilihan parameter skala BPI sangat menentukan kemampuan deteksi fitur morfologi dan hasil yang diperoleh.

No	Judul	Lokasi	Metode	Temuan	Keterbatasan
5	<i>Seabed Sediment Classification through Multispectral Backscatter Mosaic MBES and Angular Response Analysis</i> (Khomsin dkk., 2024)	Perairan Gresik, Jawa Timur, Indonesia	Akuisisi data menggunakan MBES R2Sonic 2020 yang beroperasi secara ping-by-ping pada lima frekuensi (200, 250, 300, 350, dan 400 kHz). Klasifikasi sedimen dilakukan menggunakan metode ARA yang divalidasi oleh data <i>ground truth</i> dari 74 titik sampel yang dianalisis granulometri menggunakan metode <i>sieving</i> . Akurasi klasifikasi dievaluasi menggunakan <i>confusion matrix</i> dengan menghitung nilai <i>overall accuracy</i> dan koefisien <i>Kappa</i> .	Analisis utama difokuskan pada frekuensi 200, 300, dan 400 kHz. Perbedaan nilai <i>backscatter</i> antar frekuensi berkisar ± 1 dB, namun secara visual pola distribusi mosaik ketiga frekuensi tampak serupa. ARA menghasilkan 6 kelas sedimen yang berbeda dari 4 kelas yang ditemukan pada sampel in situ. Nilai <i>overall accuracy</i> klasifikasi ARA sebesar 51% dengan koefisien <i>Kappa</i> 0,37 yang masuk kategori <i>fair</i> , artinya hanya separuh dari titik prediksi yang sesuai dengan titik sampel aktual.	tingkat akurasi yang diperoleh masih dalam kategori <i>fair</i> dan menyebutkan bahwa peningkatan presisi klasifikasi sedimen di perairan dangkal dapat dilakukan dengan menambahkan data batimetri sebagai variabel tambahan dalam proses klasifikasi, serta mengeksplorasi penggunaan metode lain seperti <i>neural network</i> yang kemungkinan lebih mampu menangkap kompleksitas hubungan antara sinyal akustik dan jenis sedimen.

Dari keseluruhan penelitian terdahulu yang telah dikaji, terdapat kesenjangan yang cukup jelas bahwa studi-studi sebelumnya cenderung menerapkan metode ARA maupun BPI secara terpisah, di lokasi dengan morfologi sederhana, dan tanpa mengaitkannya dengan proses geologi aktif seperti semburan gas. Sementara itu, kajian di Indonesia sendiri umumnya masih berhenti pada deskripsi morfologi tanpa melangkah lebih jauh ke integrasi dengan data sedimen akustik. Kesenjangan inilah yang kemudian dijawab dalam penelitian ini, yakni belum adanya kajian yang secara bersamaan menggunakan ARA dan BPI dalam satu kerangka komparatif antara zona semburan dan non-sembrun gas di perairan zona tektonik aktif Indonesia. Oleh karena itu, kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi kedua metode tersebut untuk membandingkan karakteristik morfologi dan sebaran sedimen di Cekungan Weh, Aceh.

2.2 Sedimen Dasar Laut

Material padat yang mengendap di permukaan dasar laut disebut sebagai sedimen dasar laut yang terbentuk akibat terjadinya berbagai proses geologi, oseanografi, dan biologis di lingkungan laut (Bellec dkk., 2017). Proses mekanik yang dihasilkan oleh arus laut memiliki peran penting dalam pengendapan material sedimen di dasar laut. Arus dan gelombang tidak hanya menentukan arah transportasi material, tetapi juga mengontrol sebaran serta fraksi ukuran butir sedimen (Sasmito, 2020). Variasi ukuran butir dan persebarannya dapat digunakan sebagai indikator perilaku aliran sedimen di suatu wilayah perairan. Hal ini penting karena distribusi spasial sedimen mencerminkan dinamika hidrodinamika setempat, termasuk kekuatan arus dan energi gelombang yang bekerja di dasar laut (Runya dkk., 2021). Contoh variasi jenis sedimen dasar laut dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Contoh Jenis Sedimen Dasar Laut
(Bellec dkk., 2017)

Sedimen dasar laut dapat menyimpan rekam jejak perubahan geologi dan lingkungan dari masa lampau hingga masa kini. Faktor-faktor hidro-oseanografi seperti arus, pasang surut, gelombang, dan densitas air laut dapat memengaruhi transportasi serta pengendapan material di dasar laut (Widada dkk., 2014). Seiring berjalannya waktu, proses sedimentasi membentuk lapisan-lapisan berurutan yang dapat merekam perubahan kondisi oseanografi dan geologi yang terjadi di perairan tersebut (G. Wang dkk., 2025). Dengan demikian, urutan, struktur, dan tekstur lapisan sedimen yang terendapkan dapat memberikan rekaman historis tentang perubahan kondisi oseanografi, tektonik, serta aktivitas geologi yang terjadi di suatu wilayah laut (Samant dkk., 2025).

2.2.1 Skala Wentworth

Dalam melakukan klasifikasi sedimen, diperlukan suatu sistem skala yang menggambarkan ukuran butir sedimen dalam suatu rentang tertentu. Sistem Klasifikasi yang paling umum digunakan dalam sedimentologi adalah Skala Wentworth yang pertama kali dikembangkan oleh Wentworth (1922). Kontribusi mendasar dari Wentworth adalah penerapan sistem geometrik (kelipatan dua) sebagai dasar pembagian

kelas ukuran butir. Artinya, setiap batas kelas merupakan dua kali lipat dari batas kelas di bawahnya. Pendekatan geometrik ini dipilih karena mencerminkan hubungan antara ukuran partikel dengan energi hidrodinamika yang dibutuhkan untuk mengangkut material tersebut adalah energi yang juga bersifat geometrik, bukan aritmatika (Folk, 1954).

Secara garis besar, Skala Wentworth membagi sedimen klastik menjadi empat kelompok utama, yaitu kerikil dan batuan berukuran lebih besar (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*), dan lempung (*clay*). Masing-masing kelompok utama tersebut kemudian dibagi lagi menjadi subkelas yang lebih rinci berdasarkan rentang ukuran diameter butir dalam satuan milimeter. Tabel 2.2 menyajikan klasifikasi lengkap skala Wentworth beserta rentang ukurannya.

Tabel 2.2 Klasifikasi Sedimen Berdasarkan Skala Wentworth (1922)

Kelas Sedimen		Ukuran (mm)
Batuan (<i>Gravel</i>)	Bongkah (<i>Boulder</i>)	>256
	Kerakal (<i>Cobble</i>)	64–256
	Kerikil (<i>Pebble</i>)	4–64
	Granul (<i>Granule</i>)	2–4
Pasir (<i>Sand</i>)	Pasir Sangat Kasar (<i>Very Coarse Sand</i>)	1–2
	Pasir Kasar (<i>Coarse Sand</i>)	0,5–1
	Pasir Sedang (<i>Medium Sand</i>)	0,25–0,5
	Pasir Halus (<i>Fine Sand</i>)	0,125–0,25
	Pasir Sangat Halus (<i>Very Fine Sand</i>)	0,0625–0,125
Lanau (<i>Silt</i>)	Lanau Kasar (<i>Coarse Silt</i>)	0,031–0,0625
	Lanau Sedang (<i>Medium Silt</i>)	0,016–0,031
	Lanau Halus (<i>Fine Silt</i>)	0,008–0,016
	Lanau Sangat Halus (<i>Very Fine Silt</i>)	0,004–0,008
Lempung (<i>Clay</i>)	Lempung (<i>Clay</i>)	<0,004

2.2.2 Skala Phi (ϕ) Krumbien

Meskipun Skala Wentworth memberikan kerangka klasifikasi yang komprehensif, penggunaan satuan milimeter dalam analisis statistik distribusi ukuran butir menimbulkan kesulitan praktis karena rentang nilai yang sangat lebar (dari <0,001 mm hingga >256 mm) (W. C. Krumbein, 1934). Untuk mengatasi hal tersebut, W.C. Krumbein pada tahun 1934 memperkenalkan Skala Phi (ϕ), sebuah transformasi logaritmik berbasis 2 dari ukuran butir dalam milimeter yang dituliskan dalam persamaan 2.1.

$$\phi = -\log_2(D) \quad (2.1)$$

Di mana ϕ adalah nilai phi dan D adalah diameter butir dalam milimeter. Tanda negatif dalam formula ini menyebabkan partikel berukuran besar memiliki nilai phi negatif, sedangkan partikel berukuran kecil (halus) memiliki nilai phi positif. Implikasinya adalah semakin tinggi nilai phi, maka semakin halus ukuran butir sedimen. Keuntungan utama penggunaan skala phi adalah mengubah distribusi ukuran butir sedimen yang bersifat log-normal menjadi distribusi normal dalam ruang phi, sehingga memungkinkan penerapan statistik parametrik standar seperti mean, standar deviasi, skewness, dan kurtosis untuk mengkarakterisasi distribusi ukuran butir (Folk, 1954). Tabel 2.3 menyajikan klasifikasi lengkap Skala Phi Krumbien beserta rentang ukurannya.

Tabel 2.3 Diagram Skala Wentworth dan Krumbien

	Kelas Sedimen	Ukuran (mm)	Skala Phi (ϕ)
Batuan (Gravel)	Bongkah (<i>Boulder</i>)	>256	-8
	Kerakal (<i>Cobble</i>)	64–256	-6 hingga -8
	Kerikil (<i>Pebble</i>)	4–64	-2 hingga -6
	Granul (<i>Granule</i>)	2–4	-1 hingga -2
Pasir (Sand)	Pasir Sangat Kasar (<i>Very Coarse Sand</i>)	1–2	0 hingga -1
	Pasir Kasar (<i>Coarse Sand</i>)	0,5–1	1 hingga 0
	Pasir Sedang (<i>Medium Sand</i>)	0,25–0,5	2 hingga 1
	Pasir Halus (<i>Fine Sand</i>)	0,125–0,25	3 hingga 2
	Pasir Sangat Halus (<i>Very Fine Sand</i>)	0,0625–0,125	4 hingga 3
Lanau (Silt)	Lanau Kasar (<i>Coarse Silt</i>)	0,031–0,0625	5 hingga 4
	Lanau Sedang (<i>Medium Silt</i>)	0,016–0,031	6 hingga 5
	Lanau Halus (<i>Fine Silt</i>)	0,008–0,016	7 hingga 6
	Lanau Sangat Halus (<i>Very Fine Silt</i>)	0,004–0,008	8 hingga 7
Lempung (Clay)	Lempung (<i>Clay</i>)	<0,004	>8

2.3 Karakteristik Morfologi Dasar Laut

Morfologi dasar laut merupakan bentuk topografi permukaan dasar laut yang menggambarkan variasi elevasi dan struktur geologi di bawah permukaan air. Morfologi dasar laut mencerminkan hasil dari proses geodinamika bumi yang kompleks, melibatkan interaksi antara tektonik lempeng, aktivitas vulkanik, erosi, sedimentasi, dan deformasi kerak samudera (Rachmadhan & Jgprism, 2023). Proses pembentukan morfologi dasar laut secara umum dikontrol oleh dinamika lempeng tektonik. Interaksi antar lempeng dapat menghasilkan zona penyebaran dasar samudera (*mid-ocean ridge*), zona subduksi, serta busur kepulauan vulkanik (Bührig dkk., 2022).

Selain proses tektonik, sedimentasi juga berperan penting dalam membentuk dan memodifikasi morfologi dasar laut (Sklar dkk., 2024). Material sedimen yang diangkut oleh arus, sungai, atau longsoran bawah laut dapat mengisi lembah dan palung, membentuk dataran

sedimen yang luas di cekungan samudera. Proses sedimentasi berulang dari waktu ke waktu menghasilkan morfologi yang lebih halus dan datar, seperti dataran abisal (abyssal plain), sedangkan area dengan energi tinggi seperti lereng benua atau punggung samudera cenderung menunjukkan relief yang lebih kasar (Cormier & Sloan, 2018). Hubungan antara sedimentasi dan morfologi ini juga menentukan pola sebaran endapan, di mana topografi lokal berperan dalam mengontrol arah aliran material dan lokasi akumulasi sedimen (Oudk., 2021). Berdasarkan karakteristik morfologinya, Tabel 2.4 menjelaskan beberapa fitur bawah laut yang dapat dilihat pada Tabel (Stagpoole & Mackay, 2021).

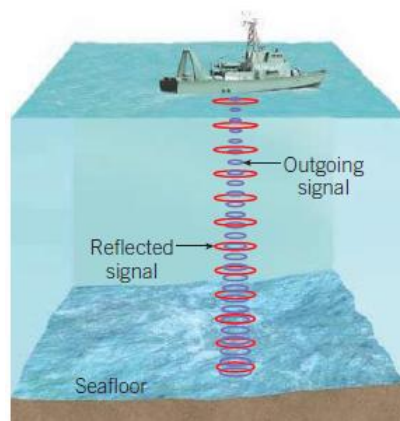
Tabel 2.4 Fitur Morfologi Berdasarkan GEBCO

No	Fitur Bawah Laut	Deskripsi
1	<i>Seamount</i>	Gunung bawah laut berbentuk kerucut atau kubah yang berdiri dengan ketinggian lebih dari sama dengan 1.000 m dari dasar laut di sekitarnya. Fitur ini dapat terbentuk dari aktivitas vulkanik maupun pada zona patahan tektonik.
2	<i>Guyot</i>	Gunung bawah laut yang datar (tablemount) yang memiliki ketinggian sama seperti seamount. Biasanya terbentuk melalui erosi gelombang saat gunung api berada di permukaan laut, kemudian tenggelam akibat subsiden termal lempeng dan atau naiknya muka air laut.
3	<i>Basin</i>	Cekungan di dasar laut yang terbentuk akibat proses tektonik, aktivitas vulkanik, atau kombinasi keduanya, dengan dimensi horizontal dari puluhan hingga ratusan kilometer.
4	<i>Abysal Plain</i>	Dataran yang sangat luas di laut dalam, terbentuk dari akumulasi sedimen pelagik halus yang menutupi topografi batuan dasar. Merupakan fitur morfologi terluas di permukaan Bumi. Tepi Abysal Plain sulit didefinisikan karena cenderung menyatu dengan lereng di tepi benua.
5	<i>Caldera</i>	Sebuah cekungan berbentuk lingkaran, seperti kuali, yang umumnya dicirikan oleh sisi-sisi yang curam dan terbentuk oleh runtuhannya, atau runtuhannya sebagian selama atau setelah letusan gunung berapi
6	<i>Ridge</i>	Ketinggian memanjang dengan kompleksitas, ukuran, dan kemiringan yang bervariasi. Biasanya lebih dari 10 kilometer panjangnya dan dapat mencapai lebih dari 1000 kilometer panjangnya.
7	<i>Apron</i>	Akumulasi material vulkaniklastik, debris, atau sedimen yang membentuk lereng landai dan luas di kaki gunung api bawah laut atau pulau vulkanik, berasal dari material runtuhannya dan aliran dari edifice utama.

No	Fitur Bawah Laut	Deskripsi
8	<i>Slope</i>	Daerah miring yang semakin dalam dari dataran tinggi hingga titik di mana terjadi penurunan gradien secara umum. Lebarnya bisa kurang dari 1 kilometer, tetapi seringkali membentang hingga puluhan kilometer dari tepi dataran tinggi dan jarang mencapai ratusan kilometer di sepanjang tepi dataran tinggi.
9	<i>Spur</i>	Tonjolan lateral memanjang yang bercabang dari lereng atau punggung utama ke arah samping. Seringkali menyatu dengan punggung. Spur merupakan bawahan dari fitur lain, tetapi jika Spur memiliki luas lebih dari 50% dari fitur yang ditujunya, maka dapat disebut punggung.
10	Zona Patahan	Zona panjang dan sempit dengan topografi tidak beraturan yang terbentuk oleh pergerakan lempeng tektonik yang terkait dengan pergeseran sumbu punggung laut yang menyebar, ditandai dengan punggung, palung atau tebing yang curam dan/atau asimetris. Secara morfologis, zona patahan mencakup baik patahan transform aktif di antara punggung laut yang menyebar maupun patahan tidak aktif di luar punggung laut yang menyebar yang dapat meluas hingga ke tepi margin benua.

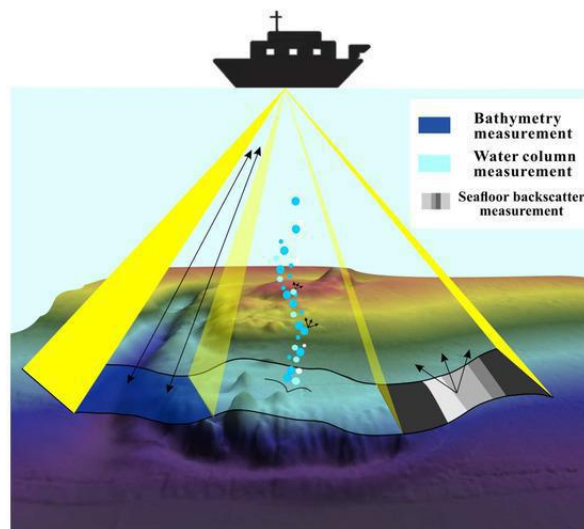
2.4 *Multibeam Echosounder*

Multibeam Echosounder (MBES) merupakan instrumen hidroakustik yang digunakan untuk memperoleh data kedalaman dan karakteristik reflektivitas dasar laut secara tiga dimensi (Nugroho dkk., 2022). *Multibeam Echosounder* memancarkan lebih dari satu beam dalam satu kali pancaran sinyal. Pada umumnya sistem pemancaran dari instrumen ini menggunakan sistem *swath* atau sapuan, dimana satu pancaran sinyal yang memiliki panjang dan lebar yang membentuk sebuah kolom (Trzcinska dkk., 2021). Teknologi ini memungkinkan perekaman data batimetri dengan resolusi tinggi dan cakupan area yang luas, menjadikannya instrumen utama dalam survei hidrografi, pemetaan habitat dasar laut, serta analisis geologi bawah laut (Janowski dkk., 2020). Ilustrasi pancaran gelombang MBES dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Pancaran Gelombang MBES
(Tarbuck & Lutgens, 2015)

Prinsip kerja MBES didasarkan pada pengukuran waktu tempuh (*two-way travel time*) gelombang suara yang dipancarkan dari transduser ke dasar laut dan dipantulkan kembali ke penerima. Waktu tempuh ini dikonversi menjadi jarak dengan memperhitungkan kecepatan rambat suara di air laut yang umumnya dipengaruhi oleh suhu, salinitas, dan tekanan (Nugroho dkk., 2022). Berbeda dengan *Singlebeam Echosounder* yang hanya menghasilkan satu titik data kedalaman per pulsa, MBES memancarkan ratusan hingga ribuan berkas sinar sekaligus dalam satu waktu, membentuk sapuan atau swath yang mencakup area dasar laut yang luas. Setiap sinar memiliki sudut pancar yang berbeda, sehingga memungkinkan pemetaan permukaan dasar laut secara rinci dengan tingkat detail tinggi (Siljeg dkk., 2023). MBES menghasilkan tiga luaran yang paling umum digunakan yaitu, data kedalaman, data *backscatter*, dan data kolom air seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Perekaman Data MBES
(Tarbuck & Lutgens, 2015)

2.5 Backscatter

Backscatter merupakan intensitas energi akustik yang dipantulkan kembali dari dasar laut menuju transduser setelah gelombang suara dipancarkan (Prasetia Adi dkk., 2016). Nilai *backscatter* mencerminkan sifat fisik dasar laut, seperti kekasaran permukaan, komposisi material, serta ukuran butir sedimen (Elson dkk., 2025). Prinsipnya, semakin keras atau kasar permukaan dasar laut, semakin besar energi yang dipantulkan sehingga menghasilkan nilai intensitas *backscatter* yang tinggi. Sebaliknya, permukaan halus dengan sedimen halus seperti lumpur atau lempung akan menghasilkan pantulan yang lemah (McGonigle dkk., 2009). *Backscatter* dapat dibedakan menjadi dua komponen utama, yaitu

1. *Volume scattering* terjadi ketika gelombang suara dipantulkan oleh partikel atau gelembung di kolom air
2. *Interface scattering* merupakan pantulan yang berasal langsung dari permukaan dasar laut

Dalam konteks pemetaan sedimen dasar laut, komponen *interface scattering* menjadi fokus utama karena mencerminkan kondisi fisik lapisan permukaan sedimen. Analisis intensitas *backscatter* sangat penting untuk mengidentifikasi variasi substrat dasar laut, karena nilai pantulan ini bergantung pada impedansi akustik antara air dan sedimen (Fonseca & Mayer,

2007). Impedansi akustik ditentukan oleh densitas dan kecepatan rambat suara dalam material dasar laut; sedimen berbutir kasar seperti pasir atau kerikil memiliki impedansi lebih tinggi dibandingkan sedimen halus seperti lumpur. Oleh karena itu, data *backscatter* dari MBES dapat digunakan untuk klasifikasi jenis sedimen serta untuk memetakan sebaran endapan di dasar laut (Lucieer dkk., 2013).

2.5.1 Koreksi *Backscatter*

Koreksi *backscatter* merupakan proses penting untuk memastikan bahwa nilai intensitas pantulan yang dihasilkan oleh *Multibeam Echosounder* (MBES) benar-benar mencerminkan sifat fisik dasar laut, bukan akibat pengaruh sistem atau kondisi perambatan gelombang akustik. Proses ini diperlukan agar data yang diperoleh memiliki nilai reflektivitas yang konsisten dan dapat digunakan dalam interpretasi kuantitatif, seperti analisis jenis sedimen atau identifikasi area dengan anomali pantulan (Lamarche & Lurton, 2018). Tahapan koreksi *backscatter* umumnya meliputi tiga langkah utama, yaitu:

1. *Beam Pattern Correction*

Koreksi yang bertujuan untuk menghilangkan artefak yang disebabkan oleh ketidakseragaman sensitivitas dan directivitas transduser MBES pada setiap *beam* (Lamarche & Lurton, 2018).

2. *Angle Varying Gain (AVG)*

Koreksi yang diterapkan untuk menghilangkan ketergantungan nilai *backscatter* terhadap sudut datang (*incidence angle*). Nilainya cenderung lebih tinggi pada sudut kecil (near-nadir) akibat komponen specular, dan menurun pada sudut besar (oblique) yang didominasi hamburan difus (Lamarche & Lurton, 2018).

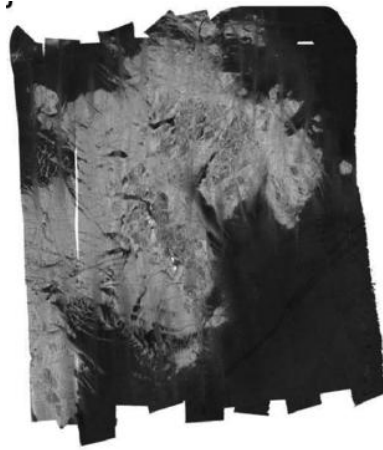
3. *Time-Varying Gain (TVG)*

Koreksi yang diterapkan secara real-time oleh sistem MBES untuk mengkompensasi pelemahan (*attenuation*) sinyal akustik akibat penyebaran geometris dan absorpsi gelombang di kolom air (Lamarche & Lurton, 2018).

Koreksi *backscatter* melalui tiga tahapan tersebut menghasilkan data intensitas yang telah dinormalisasi secara akustik dan geometrik. Data hasil koreksi kemudian dapat digunakan untuk proses pembuatan mosaik atau analisis lanjutan seperti identifikasi tipe sedimen dasar laut. Proses koreksi ini merupakan bagian penting dalam standar pengolahan data MBES yang direkomendasikan oleh *International Hydrographic Organization* (IHO, 2022) agar hasil yang diperoleh akurat dan dapat dibandingkan antar survei.

2.5.2 Mosaik *Backscatter*

Mosaik *backscatter* merupakan tahap penggabungan data intensitas pantulan dari beberapa jalur sapuan (*swath*) MBES menjadi satu peta citra kontinu yang merepresentasikan distribusi nilai reflektivitas dasar laut. Proses ini bertujuan untuk menghasilkan gambaran spasial yang menyeluruh dan homogen dari karakter permukaan dasar laut, sehingga pola-pola perbedaan material sedimen maupun fitur morfologi halus dapat terlihat secara visual (Brown & Lucieer, 2015). Mosaik *backscatter* adalah gambar berwarna keabu-abuan (*gray-scale*) yang tergeoreferensi serta merepresentasikan intensitas akustik yang diterima dari dasar laut, biasanya tingkat intensitas yang berbeda menunjukkan tipe dasar laut yang berbeda (Fonseca dkk., 2009). Ilustrasi mosaik *backscatter* dapat dilihat pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Contoh Mosaik *Backscatter*
(Fonseca dkk., 2009)

Pola-pola yang muncul pada mosaik *backscatter* memberikan informasi penting mengenai kondisi permukaan dasar laut, proses sedimentasi, serta aktivitas geologi yang sedang berlangsung (Fonseca dkk., 2009). Salah satu metode yang sering digunakan untuk *feature extraction* adalah *Gray Level Co-occurrence Matrix* (GLCM) (Ou dkk., 2021). GLCM merupakan matriks yang menggambarkan hubungan spasial antara dua piksel dengan tingkat keabuan tertentu dalam citra, berdasarkan jarak dan arah yang ditetapkan. Dalam konteks interpretasi geologi bawah laut, analisis GLCM dan metode *Angular Response Analysis* (ARA) saling melengkapi dalam memahami sifat akustik sedimen. GLCM menggambarkan pola spasial dari reflektivitas permukaan (ciri 2D pada citra mosaik), sedangkan ARA menganalisis respon intensitas terhadap sudut datang gelombang akustik (ciri fisis 3D dari interaksi gelombang dan butiran sedimen). Hubungan keduanya dapat digunakan untuk mengidentifikasi perubahan sifat sedimen yang tidak hanya tampak dari kekasaran permukaan, tetapi juga dari karakteristik penyebaran energi pantulan terhadap sudut insiden (Fonseca & Mayer, 2007).

2.6 *Bathymetry Position Index*

Bathymetric Position Index (BPI) adalah parameter morfometri yang digunakan untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan bentuk-bentuk morfologi dasar laut (seperti punggung, lembah, dataran, lereng, dan depresi) berdasarkan variasi kedalaman relatif antar sel dalam data batimetri (Lundblad dkk., 2006). Melalui BPI, informasi morfologi seperti bentuk kontur, perbedaan ketinggian lokal, dan distribusi fitur dasar laut dapat diinterpretasikan secara kuantitatif. Perhitungan BPI dilakukan dengan membandingkan kedalaman suatu titik dengan nilai kedalaman rata-rata dari area sekitarnya dalam radius tertentu. Secara matematis, BPI dapat dituliskan dalam persamaan 2.2.

$$BPI = Z_i - \bar{Z} \quad (2.2)$$

Dimana Z_i merupakan kedalaman pada titik ke- i dan $\bar{Z}$ adalah rata-rata kedalaman pada area sekitarnya. Nilai BPI positif menunjukkan bahwa titik tersebut lebih tinggi dibandingkan lingkungannya (misalnya puncak atau bukit bawah laut), sedangkan nilai negatif menunjukkan posisi yang lebih rendah (misalnya lembah atau palung). Nilai mendekati nol menandakan permukaan yang relatif datar atau homogen (Prampolini dkk., 2021). Skala analisis BPI dapat dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu BPI skala halus (*fine scale*) dan BPI skala luas (*broad scale*). BPI skala halus digunakan untuk mendeteksi fitur morfologi kecil seperti *ripples*,

alur sedimen, atau depresi kecil, sedangkan BPI skala luas digunakan untuk mengidentifikasi fitur besar seperti punggung, Lembah, Dataran, dan *seamount* (H. Wang dkk., 2025). Lundblad dkk (2006) mengembangkan skema klasifikasi BPI menggunakan data MBES. Skema tersebut mengintegrasikan nilai *fine scale*, *broad scale*, dan *slope* untuk menghasilkan 13 kelas morfologi dalam 4 zona utama, yaitu *Depression* (Depresi), *Crest* (Puncak), *Slope* (Lereng), dan *Flats* (Dataran). Tabel 2.5 adalah deskripsi lengkap dari 13 kelas BPI berdasarkan skema klasifikasi Lundblad et al. (2006).

Tabel 2.5 Skema Klasifikasi BPI

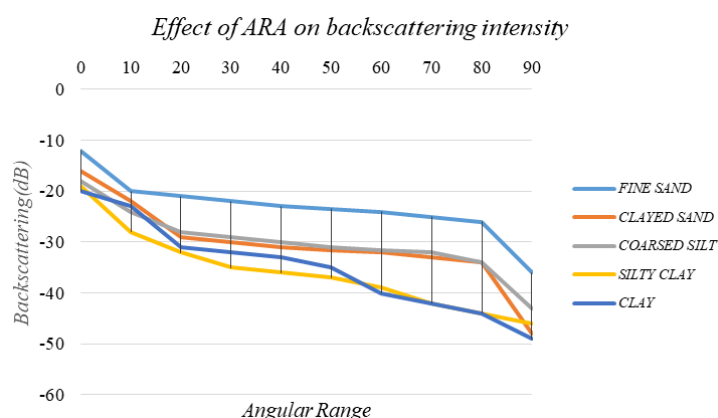
No	Zona	Kelas	Deskripsi
1	<i>Depressions</i>	<i>Narrow depression</i> (Depresi Sempit)	Fitur cekungan sempit yang memiliki nilai negatif pada <i>fine scale</i> dan <i>broad scale</i> . Secara morfologi, titik ini berada jauh di bawah rata-rata elevasi area sekitarnya pada kedua skala analisis, sehingga mencerminkan cekungan yang terisolasi.
2	<i>Depressions</i>	<i>Local crest in depression</i> (Puncak Lokal dalam Depresi)	Punggungan kecil atau tonjolan yang berada di dalam area cekungan yang lebih luas. Memiliki nilai <i>fine scale</i> positif dan nilai negatif pada <i>broad scale</i> . Fenomena ini sering dijumpai pada gunung bawah laut kecil di dalam basin, atau bongkahan sedimen yang terangkat di dasar lembah.
3	<i>Depressions</i>	<i>Broad depression with an open bottom</i> (Depresi Luas dengan Dasar Terbuka)	Cekungan luas dengan dasar terbuka, biasanya mencirikan dasar lembah besar atau cekungan basin yang landai. Memiliki nilai <i>broad scale</i> negatif, namun pada <i>fine scale</i> memiliki nilai netral.
4	<i>Crests</i>	<i>Depression on crest</i> (Depresi pada Puncak)	Fitur cekungan atau lubang (seperti kawah atau <i>pockmark</i>) yang terletak tepat di atas punggung atau puncak. Kelas ini merupakan kebalikan topografi dari kelas 2, di mana nilai <i>fine scale</i> negatif dan <i>broad scale</i> positif.

No	Zona	Kelas	Deskripsi
5	<i>Crests</i>	<i>Narrow crest</i> (Puncak Sempit)	Punggungan sempit, sering kali berkaitan dengan puncak struktur geologi atau tonjolan yang menonjol secara lokal maupun regional. Kelas ini dicirikan oleh nilai <i>fine scale</i> dan <i>broad scale</i> yang keduanya positif. Contoh morfologi yang termasuk kelas ini antara lain punggungan <i>mid-ocean ridge</i> atau puncak gunung bawah laut (<i>seamount</i>).
6	<i>Slopes</i>	<i>Lateral midslope depression</i> (Depresi Lereng Tengah Lateral)	Cekungan yang terletak di bagian tengah lereng. Memiliki nilai <i>fine scale</i> negatif dan <i>broad scale</i> netral. Fitur ini sering terbentuk akibat erosi arus bawah laut, longsor sedimen, atau proses geomorfik lainnya yang bekerja pada lereng.
7	<i>Slopes</i>	<i>Lateral midslope crest</i> (Puncak Lereng Tengah Lateral)	Menggambarkan tonjolan, punggung kecil, atau <i>spur</i> yang terdapat di sisi lereng. Fitur ini umumnya terbentuk sebagai hasil proses tektonik, vulkanik, atau penumpukan sedimen di permukaan lereng kontinen. Memiliki nilai <i>fine scale</i> positif dan <i>broad scale</i> netral, disertai kemiringan lereng yang terukur.
8	<i>Slopes</i>	<i>Open slopes</i> (Lereng Terbuka)	Merepresentasikan area lereng yang homogen dan relatif seragam yang tidak menunjukkan fitur tonjolan atau cekungan yang dominan dengan nilai <i>fine scale</i> netral.
9	<i>Slopes</i>	<i>Steep slope</i> (Lereng Curam)	Area dengan kemiringan lereng yang sangat tajam. Merepresentasikan <i>escarpment</i> , tebing bawah laut (<i>submarine cliff</i>), sisi dinding palung, atau lereng terjal lainnya.
10	<i>Flats</i>	<i>Local depression on flat</i> (Depresi Lokal pada Dataran)	Cekungan atau lubang kecil yang terdapat pada area dataran yang relatif luas dan datar. Memiliki nilai <i>fine scale</i> negatif, namun <i>broad scale</i> netral dan kemiringan rendah.

No	Zona	Kelas	Deskripsi
11	Flats	<i>Local crest on flat</i> (Puncak Lokal pada Dataran)	Tonjolan atau gundukan kecil yang terdapat pada area dataran, dengan nilai <i>fine scale</i> positif, namun <i>broad scale</i> netral dan kemiringan rendah.
12	Flats	<i>Shelf</i>	Merepresentasikan paparan kontinen atau fitur dangkal dengan nilai BPI luas yang cenderung netral, kemiringan rendah, dan topografi yang relatif homogen.
13	Flats	<i>Broad flat</i> (Dataran Luas)	Merepresentasikan area yang sangat datar dan luas, dengan nilai <i>fine scale</i> dan <i>broad scale</i> keduanya netral.

2.7 Angular Response Analysis (ARA)

Angular Response Analysis (ARA) merupakan metode analisis akustik yang digunakan untuk menggambarkan hubungan antara intensitas *backscatter* dan sudut datang (*incident angle*) gelombang akustik dari sistem MBES (Fonseca dkk., 2009). Prinsip utama ARA adalah memanfaatkan kemampuan MBES dalam merekam sinyal *backscatter* dari berbagai sudut dalam satu sapuan (Gambar 2.3), sehingga dapat menghasilkan *angular response curve* (ARC) untuk setiap jenis substrat dasar laut (Lamarche & Lurton, 2018). Setiap jenis sedimen dengan sudut yang berbeda akan menghasilkan nilai hambur balik yang berbeda (Mukti dkk., 2020). Hal ini sesuai dengan Gambar 2.5 yang memperlihatkan bahwa terdapat hubungan antara nilai hambur balik dengan sudut orientasi target, hubungan yang terbentuk adalah nilai hambur balik berbanding terbalik dengan sudut orientasi target. Semakin besar sudut orientasi target (menjauhi nadir) maka akan semakin kecil nilai hambur balik akustik pada setiap tipe sedimennya.



Gambar 2.5 Ilustrasi *Angular Response Curve* (Farihah dkk., 2020)

Kurva diatas memberikan gambaran mengenai sifat reflektif dan hamburan energi dari permukaan dasar laut. Secara umum, ARA menganalisis kurva hubungan antara intensitas pantulan (I) terhadap sudut datang (θ), yang dikenal sebagai *angular response curve*. Persamaan dasar hubungan intensitas *backscatter* terhadap sudut dinyatakan pada persamaan 2.3.

$$I(\theta) = I_0 + 10 \log_{10}[R(\theta)] \quad (2.3)$$

Di mana I_0 adalah konstanta kalibrasi sistem MBES (mengoreksi *gain*, TVG, *power*) dan $R(\theta)$ merupakan koefisien reflektivitas akustik yang bergantung pada sudut datang. Reflektivitas akustik dapat dimodelkan menggunakan pendekatan model fisik pada persamaan 2.4 (Jackson & Briggs, 1992).

$$\sigma_s(\theta) = \frac{4\pi k^4 \eta^2 L^2}{(1 + 4k^2 L^2 \sin^2 \theta)^{3/2}} \quad (2.4)$$

Di mana $k = 2\pi/\lambda$ adalah bilangan gelombang, η adalah kekasaran permukaan, dan L adalah parameter statistik yang menggambarkan jarak rata-rata keterkaitan dari kekasaran mikro-topografi pada permukaan sedimen dasar laut. parameter kekasaran η dan L diperkirakan melalui penyesuaian model terhadap respon sudut yang diukur (Fonseca dkk., 2009). Dalam proses klasifikasi sedimen menggunakan ARA, data dikelompokkan berdasarkan interval sudut datang sehingga dapat menghasilkan respon rata-rata sedimen terhadap setiap sudut. Data yang telah dikelompokkan digunakan untuk membangun ARC yang selanjutnya dibandingkan dengan model akustik untuk memperkirakan parameter fisik dasar laut, seperti kekasaran permukaan (RMS *roughness*), rasio impedansi (*impedance ratio*), dan koefisien *volume backscattering* (Fonseca dan Mayer, 2007). Proses *curve fitting* ini umumnya dilakukan menggunakan metode *least square*. Parameter yang dihasilkan kemudian diinterpretasikan untuk menentukan tipe sedimen dasar laut berdasarkan klasifikasi standar seperti skala Wenworth atau Folk (1954).

Sebagai salah satu metode klasifikasi sedimen berbasis akustik, ARA memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode klasifikasi *backscatter* konvensional yang hanya mengandalkan nilai intensitas rata-rata. Keunggulan utama ARA terletak pada pemanfaatan informasi sudut datang secara menyeluruh, sehingga metode ini mampu menangkap karakteristik fisik sedimen yang tidak hanya bergantung pada satu nilai intensitas, melainkan pada pola perubahan intensitas terhadap sudut (Fonseca & Mayer, 2007). Dengan demikian, ARA dinilai lebih robust dalam membedakan jenis substrat yang memiliki nilai *backscatter* rata-rata serupa namun berbeda dalam hal kekasaran permukaan atau proses *volume scattering*, karena kedua sifat tersebut memberikan bentuk ARC yang berbeda meskipun nilai intensitas puncaknya mendekati sama (Fonseca dkk., 2009). Selain itu, ARA tidak memerlukan sampel sedimen dalam jumlah besar untuk kalibrasi awal karena klasifikasi dapat dilakukan melalui pendekatan *unsupervised* berbasis pengelompokan bentuk kurva, sehingga metode ini relatif efisien untuk survei area yang luas dengan keterbatasan data ground truth (Lamarche & Lurton, 2018).

Meskipun demikian, ARA juga memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam penerapannya. Pertama, metode ini pada dasarnya dikembangkan dengan asumsi bahwa permukaan dasar laut bersifat relatif datar (*flat seafloor assumption*), sehingga akurasi klasifikasi akan menurun secara signifikan pada area dengan morfologi kompleks atau kemiringan lereng yang tinggi, karena sudut datang aktual terhadap permukaan akan menyimpang dari sudut insidensi nominal yang dihitung berdasarkan geometri akuisisi (Fonseca & Mayer, 2007). Kedua, ARA sangat sensitif terhadap kualitas koreksi radiometrik sebelumnya (TVG, beam pattern, dan AVG), apabila koreksi tidak diterapkan secara konsisten antar *swath*, artefak sistematis dapat muncul dan menyebabkan misklasifikasi pada batas-batas

lintasan survei (Lamarche & Lurton, 2018). Ketiga, ARA cenderung memiliki keterbatasan dalam memisahkan sub-kelas sedimen halus yang memiliki sifat akustik berdekatan, seperti antara lanau dan lempung, karena perbedaan impedansi akustik di antara kelas-kelas tersebut sangat kecil sehingga kurva respons sudutnya cenderung tumpang tindih (Monteys dkk., 2016). Keempat, hasil klasifikasi ARA juga sangat bergantung pada spesifikasi teknis sistem MBES yang digunakan, seperti frekuensi kerja dan pola beam, sehingga hasil klasifikasi dari satu sistem tidak selalu dapat dibandingkan secara langsung dengan hasil dari sistem MBES yang berbeda tanpa penyesuaian lebih lanjut (Khomsin dkk., 2024).

2.8 Uji Validasi

2.8.1 *Confusion Matrix*

Confusion matrix merupakan kerangka evaluasi dalam analisis klasifikasi yang menyajikan tabulasi sistematis antara kelas prediksi yang dihasilkan oleh suatu model dengan kelas aktual (*ground truth*) yang telah diverifikasi secara (Feizizadeh dkk., 2022). Dalam konteks klasifikasi sedimen dasar laut menggunakan data akustik MBES, *confusion matrix* berfungsi sebagai instrumen validasi utama yang mengukur sejauh mana hasil klasifikasi akustik mampu merepresentasikan kondisi sedimen yang sesungguhnya berdasarkan data sampel uji lapangan (Garone dkk., 2023).

Secara struktural, *confusion matrix* untuk kasus klasifikasi multi-kelas berbentuk matriks persegi pada Gambar 2.6 yang berukuran $n \times n$, di mana n adalah jumlah kelas yang diklasifikasikan. Baris dalam matriks merepresentasikan kelas aktual (observasi lapangan), sedangkan kolom merepresentasikan kelas yang diprediksi oleh model. Diagonal utama matriks berisi jumlah prediksi yang benar (*True Positive*) untuk masing-masing kelas, sedangkan sel-sel di luar diagonal mencerminkan kesalahan klasifikasi antar kelas (Feizizadeh dkk., 2022).

		Actual Value	
		P	N
Predicted Value	P	TP	FP
	N	FN	TN

Gambar 2.6 *Confusion Matrix*
(Das dkk., 2022)

Dari *confusion matrix*, sejumlah metrik evaluasi dapat diturunkan untuk mengukur performa klasifikasi secara kuantitatif. Metrik-metrik tersebut meliputi akurasi keseluruhan atau *Overall Accuracy* (OA) dan indeks Kappa Cohen (κ). OA adalah jumlah total sampel yang diklasifikasikan dengan benar terhadap keseluruhan sampel yang diuji (Garone dkk., 2023). Secara matematis, OA dituliskan pada Persamaan 2.5.

$$OA = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100\% \quad (2.5)$$

Sedangkan, indeks *Cohen Kappa* (κ) adalah metrik yang mengukur kesepakatan antara prediksi model dengan observasi actual setelah memperhitungkan kemungkinan kesepakatan yang terjadi secara kebetulan (*chance agreement*) (Feizizadeh dkk., 2022). Kappa dituliskan dalam Persamaan 2.6.

$$\kappa = \frac{Po - Pe}{1 - Pe} \quad (2.6)$$

Di mana Po adalah proporsi kesepakatan aktual (sama dengan OA) dan Pe adalah proporsi kesepakatan yang diharapkan terjadi secara kebetulan. Nilai κ berkisar antara 0 (kesepakatan hanya karena kebetulan) hingga 1 (kesepakatan sempurna). (Landis & Koch, 1977). Tabel 2.6 adalah interpretasi dari nilai *Cohen Kappa*.

Tabel 2. 6 Interpretasi nilai *Cohen Kappa*

Nilai κ	Keeratan Kesepakatan
$\leq 0,20$	Sangat Rendah
$0,21 - 0,40$	Rendah
$0,41 - 0,60$	Sedang
$0,61 - 0,80$	Kuat
$0,81 - 1$	Sangat Kuat

2.8.2 Regresi Linier

Regresi linier merupakan metode statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan fungsional antara satu variabel dependen (*response variable*) dengan satu atau lebih variabel independen (*predictor variable*) melalui persamaan matematis yang berbentuk linier (Montgomery dkk., 2012). Dalam konteks penelitian ini, regresi linier diaplikasikan untuk mengkuantifikasi hubungan antara intensitas *backscatter* MBES (variabel independen) yang dinyatakan dalam dB dengan ukuran butir sedimen pada skala phi Wentworth (variabel dependen) yang dinyatakan dalam ϕ . Pemodelan hubungan ini bersifat fundamental karena intensitas *backscatter* secara fisis diketahui dipengaruhi oleh kekasaran permukaan dasar laut yang berhubungan langsung dengan ukuran butir sedimen (Jackson & Briggs, 1992). Model regresi linier sederhana dapat dituliskan dalam Persamaan 2.7.

$$Y = a + bX \quad (2.7)$$

Di mana Y adalah variabel terikat atau dependen yang dipengaruhi oleh variabel bebas, a adalah nilai perpotongan sumbu Y dengan X yang dituliskan dalam Persamaan 2.9. Sedangkan b adalah koefisien regresi atau kemiringan garis regresi, koefisien b dapat dituliskan dalam persamaan 2.8. X adalah variabel bebas atau dependen yang mempengaruhi Y .

$$b = \frac{\sum_n(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sum_n(X^2) - (\sum X)^2} \quad (2.8)$$

$$a = \frac{(\sum Y) - b(\sum X)}{n} \quad (2.9)$$

2.8.3 Koefisien Determinasi

Koefisien determinasi, yang dinyatakan dengan simbol R^2 , merupakan ukuran statistik yang menggambarkan proporsi variansi variabel dependen yang dapat dijelaskan oleh variabel independen melalui model regresi yang dibangun (Montgomery dkk., 2012). Nilai R^2 didapatkan menggunakan Persamaan 2.10.

$$R^2 = \frac{b \times \sum XY}{\sum y^2} \quad (2.10)$$

Rentang nilai R^2 berkisar antara 0 hingga 1. Nilai R^2 mendekati 1 menunjukkan bahwa model regresi secara sempurna menjelaskan seluruh variasi data, dimana seluruh variabel dependen dapat dijelaskan oleh variabel independen. Sebaliknya jika nilai R^2 semakin mendekati 0 berarti variabel dependen tidak dapat dijelaskan dengan variabel independen. Tabel 2.7 adalah interpretasi dari nilai Koefisien Determinasi.

Tabel 2.7 Interpretasi Koefisien Determinasi

Nilai R^2	Interpretasi
< 0,25	Lemah
0,25 – 0,50	Sedang
0,50 – 0,75	Kuat
> 0,75	Sangat Kuat

2.8.4 Korelasi *Pearson*

Koefisien Korelasi *Pearson*, yang dilambangkan dengan r , merupakan ukuran statistik parametrik yang mengkuantifikasi kekuatan dan arah hubungan linier antara dua variabel kontinu yang berskala interval atau rasio (Pearson, 1895). Dalam penelitian ini, korelasi *Pearson* digunakan untuk mengukur kekuatan hubungan linier antara nilai intensitas *backscatter* MBES dengan ukuran butir sedimen pada skala phi Wentworth. Perhitungan Korelasi *Pearson* dituliskan pada Persamaan 2.11.

$$r_{xy} = \frac{\sum_n X_i Y_i - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{\sqrt{[\sum_n X_i^2 - (\sum X_i)^2][\sum_n Y_i^2 - (\sum Y_i)^2]}} \quad (2.11)$$

Dimana n adalah jumlah sampel data, X adalah variabel independen, dan Y adalah variabel dependen. . Nilai r berkisar antara -1 hingga $+1$, dengan nilai $r = +1$ menunjukkan korelasi linier positif sempurna, $r = -1$ menunjukkan korelasi linier negatif sempurna, dan $r = 0$ menunjukkan tidak adanya hubungan linier. Tabel 2.8 adalah interpretasi dari nilai Korelasi *Pearson* (Pearson, 1895).

Tabel 2.8 Interpretasi Korelasi *Pearson*

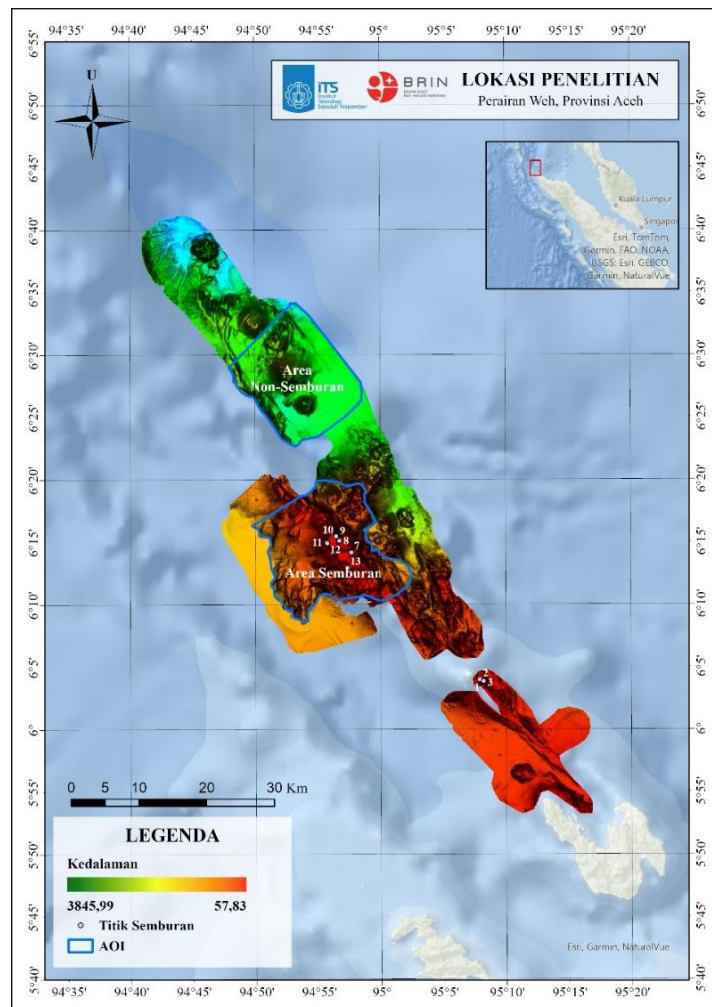
Nilai r	Interpretasi
< 0,20	Sangat lemah
0,21 – 0,40	Lemah
0,41 – 0,60	Sedang
0,61 – 0,80	Kuat
0,81 – 1	Sangat Kuat

BAB III METODOLOGI

Bab ini menjelaskan lokasi, data dan keseluruhan alur dalam pelaksanaan penelitian. Pada bab ini, menguraikan tahapan pengolahan data secara sistematis yang mencakup pengolahan data batimetri untuk menghasilkan *Digital Elevation Model* (DEM), pengolahan parameter kuantitatif morfologi, klasifikasi struktur morfologi menggunakan BPI, serta pengolahan data *backscatter* untuk menghasilkan mosaik dan klasifikasi sedimen menggunakan ARA.

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di perairan Indonesia, yaitu di utara Pulau Weh provinsi Aceh, yang terletak di garis sesar aktif Sumatra. Secara tektonik, Cekungan Weh terletak di lereng kontinen Samudra hindia dan berada di dalam margin aktif yang sangat kompleks yang dicirikan oleh subduksi miring antara Lempeng India dan Eurasia di sepanjang segmen sesar aktif, khususnya Sesar Segmen Aceh (ACF) dan Sesar Seulimeum (SLF), yang secara struktural terhubung dengan sistem Sesar Andaman Barat (WAF) (Aswini dkk., 2021). Penelitian ini difokuskan pada area semburan dan non-semburan. Adapun lebih lengkapnya dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian

Pemilihan *area of interest* dalam penelitian ini didasarkan pada penelitian terdahulu serta tiga pertimbangan utama, yaitu ketersediaan data akuisisi, aktivitas geologi yang teridentifikasi, dan representativitas area sebagai zona pembanding. Pemilihan area semburan didasarkan pada hasil penelitian terdahulu yang mengidentifikasi adanya aktivitas gas bawah laut di perairan Cekungan Weh. Kurnio dkk (2015), mengidentifikasi karakteristik gunung api bawah laut di perairan Sabang yang memperlihatkan potensi tinggi keluarnya emisi gas dari dasar laut melalui rekahan-rekahan yang terbentuk akibat aktivitas vulkanik dan tektonik. Selain itu, pada area semburan terdapat beberapa titik semburan gas yang teridentifikasi di perairan Cekungan Weh, termasuk titik-titik yang berada di bagian selatan wilayah survei sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.1. Namun, area semburan yang dipilih dalam penelitian ini adalah area di bagian utara cekungan berdasarkan dua pertimbangan tambahan. Pertama, area semburan utara memiliki cakupan data MBES yang memiliki lajur yang overlap dengan baik, sehingga menghasilkan DEM dan mosaik backscatter yang minim *gap* dibandingkan area selatan.

Dari sisi area non-semburan, pemilihan didasarkan pada dua kriteria. Pertama, secara geologi, area ini terletak pada zona yang tidak memiliki indikasi aktivitas semburan gas aktif maupun rekahan tektonik permukaan yang signifikan, sehingga dapat berfungsi sebagai zona kontrol yang representatif. Kedua, pada Gambar 3.1 menampilkan kondisi morfologi area non-semburan yang berbeda dibandingkan area semburan yang kompleks akibat dari zona patahan, sehingga memberikan pembanding yang tepat untuk mengkaji pengaruh aktivitas semburan gas terhadap perbedaan morfologi dan karakteristik sedimen.

3.2 Bahan dan peralatan yang digunakan

Adapun bahan dan peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi berbagai data dan instrumen yang mendukung pengumpulan serta analisis data secara menyeluruh. Berikut adalah rincian bahan dan peralatan yang digunakan:

3.2.1 Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Raw data Multibeam Echosounder* Kongsberg EM304 (batimetri dan *backscatter*) sebagai data primer yang diambil pada tanggal 14 - 22 Mei 2024 di perairan Cekungan Weh, Pulau Sabang Aceh.
2. Data *Sound Velocity Profiler* sebagai data primer untuk mengoreksi cepat rambat gelombang akustik.

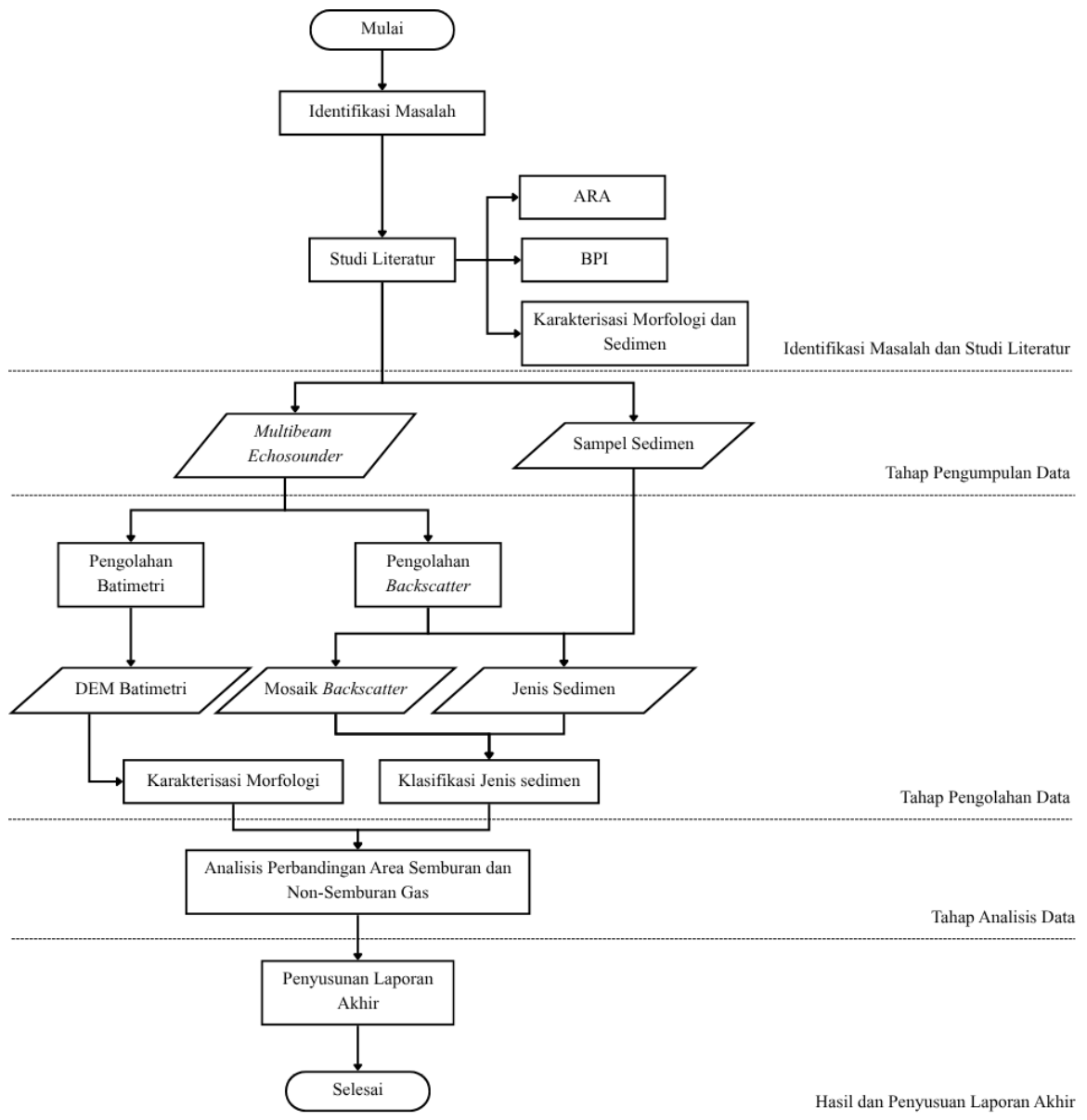
3.2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini untuk pengolahan data adalah sebagai berikut:

1. Laptop yang digunakan sebagai perangkat keras (*Hardware*) untuk melakukan pengumpulan, pengolahan, dan analisis data
2. Perangkat Lunak (*Software*) meliputi :
 - Qimera yang digunakan untuk mengolah data batimetri agar mendapatkan *Digital Elevation Model* (DEM) pada area studi.
 - FMGT yang digunakan untuk mengolah data *backscatter* agar dapat menentukan jenis sedimen pada area studi.
 - ArcGIS yang digunakan untuk mengolah DEM menjadi klasifikasi morfologi menggunakan *Bathymetry Index Position* pada area studi.
 - Saga GIS yang digunakan untuk mengolah DEM menjadi turunan datanya meliputi *slope, curvature, aspect, convergence index*, dan *rugosity*.

3.3 Tahapan Pelaksanaan Penelitian

Diagram alir pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini yang dijasikan dalam Gambar 3.2 sebagai berikut:



Gambar 3. 2 Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian Tugas Akhir

Penjelasan diagram alir proses penelitian Tugas Akhir adalah sebagai berikut.

A. Identifikasi Masalah

Tahap awal adalah melakukan studi literatur yang sangat penting untuk mengetahui permasalahan dan Batasan masalah yang diangkat dalam penelitian “Perbandingan Sebaran Sedimen dan Morfologi Menggunakan *Angular Response Analysis* dan *Bathymetry Position Index* pada Zona Semburan dan Non-Semburan Gas”. Penelitian ini berfokus dalam mengetahui sebaran sedimen dan karakteristik morfologi pada area semburan dan non-semburan gas dasar laut.

B. Studi Literatur

Setelah mengidentifikasi masalah, studi literatur dilakukan untuk menyusun kerangka teoritis dan metodologi yang baik dalam penelitian ini. Studi literatur dilakukan dengan analisis terhadap penelitian terdahulu yang relevan seperti karakteristik morfologi, sedimen dasar laut, BPI, dan ARA sebagai metodologi utama yang digunakan dalam penelitian ini. Berdasarkan studi literatur yang ada, penelitian ini dapat dilakukan dengan menggunakan metodologi yang tepat dan relevan untuk menjawab rumusan masalah dan memenuhi tujuan penelitian.

C. Tahap Pengolahan Data

Pengolahan data yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pengolahan data kedalaman dan data *backscatter*. Data diolah menggunakan perangkat lunak seperti yang tercantum pada sub bab alat dan bahan. Data mentah diolah untuk menghasilkan informasi yang dapat lebih mudah dilakukan analisis. Pada tahap ini, pengolahan mencakup pembuatan model digital elevasi dasar laut, mosaik *backscatter*, serta beberapa parameter kuantitatif yang digunakan untuk mendukung analisis morfologi seperti *slope*, *aspect*, *curvature*, *convergence index*, dan *rugosity*.

D. Tahap Analisis Data

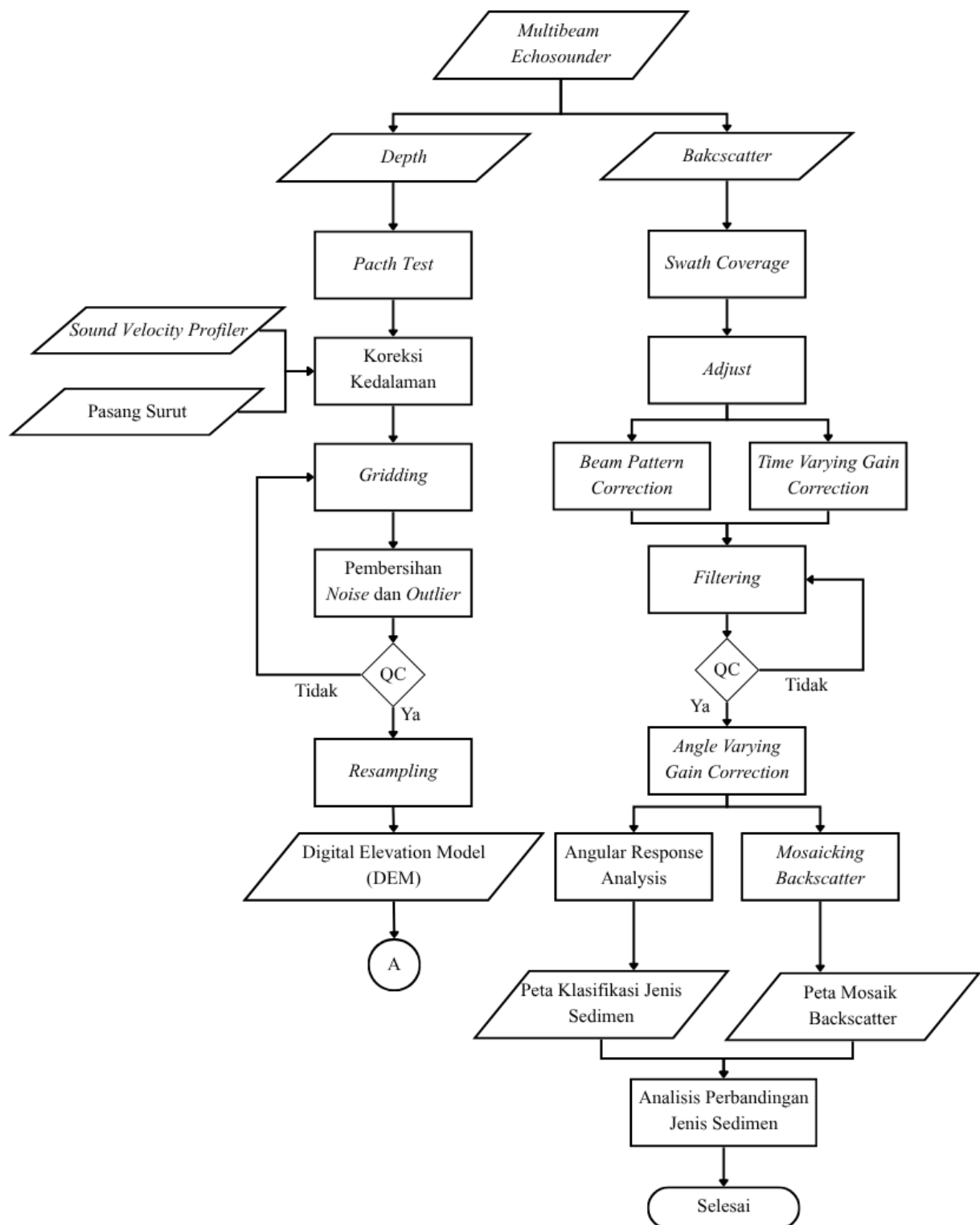
Analisis data merupakan tahapan penting dalam penelitian. Tahap ini bertujuan untuk menghasilkan pembahasan yang mendalam terkait perbandingan sebaran sedimen dan karakteristik morfologi antara area semburan dan non-semburan gas dasar laut. Analisis dilakukan dengan meninjau intensitas *backscatter* yang merepresentasikan sifat reflektivitas dasar laut serta struktur morfologi dasar laut yang diinterpretasikan dari model batimetri. Selain itu, penelitian ini juga melakukan analisis hubungan antara intensitas *backscatter* dengan karakteristik sedimen pada kedua zona. Melalui interpretasi terhadap data yang telah dilakukan pengolahan, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang mendalam tentang kondisi geologis di wilayah penelitian.

E. Tahap Penyusunan Laporan

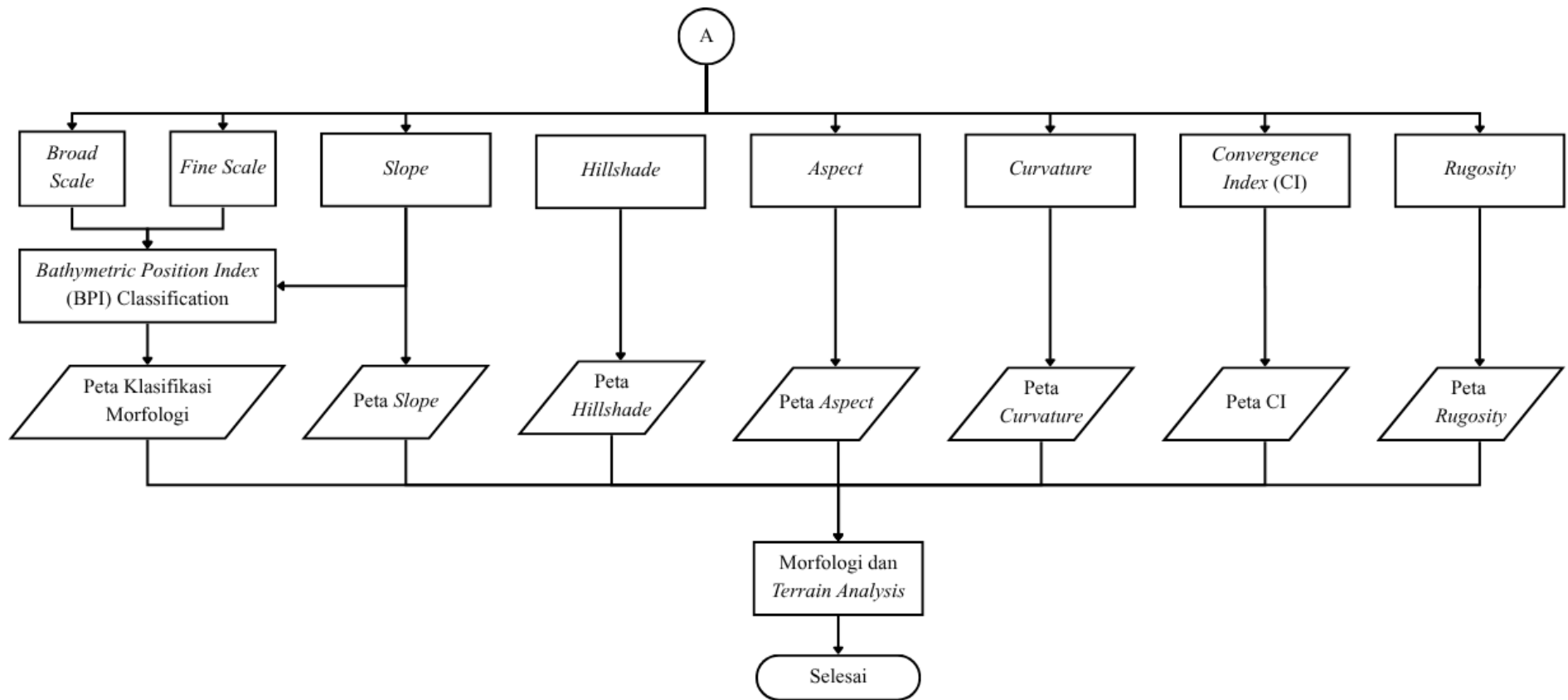
Penyusunan laporan akhir “Perbandingan Sebaran Sedimen dan Morfologi Menggunakan *Angular Response Analysis* dan *Bathymetry Position Index* pada Zona Semburan dan Non-Semburan Gas” merupakan tahap akhir dalam penelitian ini. Laporan akhir tidak hanya menyajikan hasil dan analisis, tetapi juga menyajikan Kesimpulan yang dapat menjawab tujuan penelitian. Laporan akhir penelitian diharapkan dapat memberikan informasi penting untuk memahami proses geologi bawah laut, potensi sumber daya sedimen, serta dampak lingkungan dari aktivitas semburan gas. Penelitian ini juga memiliki manfaat praktis untuk eksplorasi sumber daya kelautan dan mendukung pengelolaan wilayah perairan Indonesia berbasis hidroakustik.

3.4 Tahapan pengolahan Data

Pengolahan data dalam penelitian ini menggunakan empat perangkat lunak utama, yaitu Qimera untuk pengolahan data batimetri, FMGT (Fledermaus Midwater Geocoder Toolbox) untuk pengolahan data *backscatter*, SAGA GIS untuk analisis parameter morfologi, dan ArcGIS untuk pengolahan BPI dan visualisasi serta penyajian peta akhir. Adapun diagram alir pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini yang dijasikan dalam Gambar 3.3 dan sebagai berikut.



Gambar 3.3 Diagram Alir Pengolahan Data (A)



Gambar 3.4 Diagram Alir Pengolahan Data (B)

Secara garis besar, pengolahan data dibagi menjadi tiga tahap utama, yaitu pengolahan batimetri, pengolahan parameter klasifikasi morfologi, dan pengolahan *backscatter*. Berikut merupakan penjelasan dari diagram alur penelitian.

3.4.1 Tahap Pengolahan Batimetri

Pengolahan data batimetri dilakukan menggunakan perangkat lunak Qimera yang merupakan perangkat lunak khusus untuk pengolahan data *Multibeam Echosounder* (MBES). Tahapan pengolahan batimetri secara berurutan adalah sebagai berikut.

1. *Patch Test*

Patch test dilakukan untuk menentukan dan mengoreksi kesalahan sistematis pada saat melakukan instalasi transduser MBES. Kesalahan ini mencakup tiga parameter sudut instalasi, yaitu *roll* (kemiringan melintang), *pitch* (kemiringan memanjang), dan *heave* (pergerakan vertikal), serta satu parameter waktu yang disebut *latency* (keterlambatan waktu antara posisi GPS dan data akustik). Proses ini penting dilakukan untuk memastikan bahwa *beam* yang telah direkam sudah benar secara sistematis sebelum proses pengolahan lebih lanjut dilakukan. Koreksi yang dihasilkan pada *patch test* diterapkan pada seluruh data mentah sehingga kesalahan posisional akibat *misalignment* sensor dapat dieliminasi. Tanpa *patch test* yang tepat, data batimetri akan menghasilkan artefak berupa duplikasi fitur dasar laut pada tepi *swath* yang saling tumpang tindih. Pada penelitian ini, *patch test* dilakukan pada saat proses akuisisi data tepatnya pada saat ekspedisi BRIN dan OceanX sedang berlangsung, namun *patch test* juga bisa dilakukan pada saat *post-processing*. *Patch Test* saat *post-processing* dilakukan dengan menggunakan dua atau lebih lintasan survei yang saling tumpang tindih atau saling berlawanan arah. Dalam Qimera, data dari lintasan-lintasan ini dianalisis secara berpasangan untuk setiap parameter:

- *Roll* : dideteksi dari dua lintasan paralel yang berjalan ke arah yang sama, di mana perbedaan elevasi pada tepi *swath* menunjukkan adanya *roll offset*.
- *Pitch* : dideteksi dari dua lintasan yang berjalan bolak-balik (*reciprocal*) di atas medan bawah laut yang memiliki fitur topografi menonjol, seperti lereng atau tebing.
- *Yaw* : dideteksi dari dua lintasan paralel yang berjalan ke arah yang sama dan fokus pada fitur lateral yang terdefinisi jelas.
- *Latency*: dideteksi dari dua lintasan yang berjalan searah dengan kecepatan berbeda di atas medan berlereng.

2. Koreksi Kedalaman

Koreksi kedalaman merupakan proses penyesuaian nilai kedalaman terukur dari sistem *Multibeam Echosounder* agar merepresentasikan kedalaman yang sebenarnya relatif terhadap referensi datum vertikal yang diinginkan. Proses ini melibatkan dua koreksi utama, yaitu koreksi kecepatan suara (*Sound Velocity Profiler/SVP*) dan koreksi pasang surut (pasut). Namun, pada penelitian ini koreksi pasut tidak dilakukan karena tidak berpengaruh signifikan pada *deep sounding*.

- Kecepatan suara dalam air laut bervariasi terhadap kedalaman sebagai fungsi dari suhu, salinitas, dan tekanan. Sistem MBES mengasumsikan satu nilai kecepatan suara tertentu untuk menghitung jarak pantul akustik menjadi nilai kedalaman. Apabila profil kecepatan suara aktual berbeda dari nilai yang diasumsikan, maka akan terjadi kesalahan refraksi pada

beam (terutama pada *beam* sudut besar), sehingga posisi dan kedalaman titik pengukuran menjadi tidak akurat.

- Nilai kedalaman yang direkam MBES merupakan jarak dari permukaan air (*water surface*) ke dasar laut pada saat pengukuran. Karena tinggi muka air berfluktuasi akibat pasang surut, nilai kedalaman terukur perlu dikoreksi agar mengacu pada datum vertikal yang seragam, yaitu Chart Datum (CD) atau *Mean Sea Level* (MSL) sesuai ketentuan survei. Data pasang surut dapat diperoleh dari stasiun pasang surut terdekat atau dari pengamatan langsung di lapangan selama periode survei. Dalam Qimera, file data pasang surut (dalam format teks atau CSV dengan kolom waktu dan tinggi muka air) diimpor dan diterapkan secara otomatis ke seluruh dataset berdasarkan stempel waktu rekaman.

3. **Gridding**

Gridding adalah proses mengonversi kumpulan titik-titik pengukuran batimetri (*point cloud*) yang tersebar secara tidak teratur menjadi model grid raster dengan resolusi spasial yang seragam. Setiap sel grid merepresentasikan nilai kedalaman rata-rata atau nilai statistik tertentu dari titik-titik data yang berada di dalam atau di sekitar sel tersebut. Tujuan *gridding* adalah menghasilkan representasi kontinu permukaan dasar laut dalam format raster yang siap untuk proses visualisasi, analisis morfologi, dan derivasi parameter *terrain*. *Grid* batimetri menjadi input utama bagi pembuatan *Digital Elevation Model* (DEM) dan seluruh analisis parameter morfologi selanjutnya. Proses *gridding* dilakukan dengan menentukan ukuran sel (*cell size/resolution*) yang sesuai dengan kepadatan data dan tujuan survei. Dalam penelitian ini ukuran sel $25 \times 25 \text{ m}$. Pemilihan ukuran sel mempertimbangkan *beam footprint* pada kedalaman rata-rata area survei serta keperluan resolusi untuk analisis morfologi. Metode interpolasi yang umum digunakan meliputi *weighted mean* (rata-rata tertimbang berdasarkan jarak), *Nearest Neighbor*, atau CUBE (*Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator*) yang juga menghasilkan estimasi ketidakpastian pada setiap sel grid. CUBE merupakan metode yang direkomendasikan karena secara statistik *robust* terhadap *outlier* dan menghasilkan estimasi kedalaman hipotesis yang optimal.

4. **Pembersihan Noise dan Outlier**

Pembersihan *noise* dan *outlier* adalah proses identifikasi dan eliminasi titik-titik data batimetri yang bernilai tidak wajar (*spurious soundings*) akibat gangguan akustik, *multipath*, deteksi dasar palsu, atau kesalahan sistem navigasi. *Noise* merupakan variasi acak di sekitar nilai sebenarnya, sedangkan *outlier* merupakan titik data yang secara statistik atau geometris menyimpang jauh dari permukaan dasar laut yang sebenarnya. Proses ini dilakukan untuk memastikan bahwa model kedalaman yang dihasilkan bebas dari artefak yang dapat mengaburkan interpretasi morfologi dasar laut atau memengaruhi akurasi analisis parameter *terrain*. Data yang bersih menghasilkan DEM yang halus dan representatif sehingga fitur-fitur morfologi seperti cekungan, atau perubahan lereng dapat terdeteksi dengan akurat.

5. **Digital Elevation Model (DEM)**

Digital Elevation Model (DEM), dalam konteks batimetri sering disebut juga sebagai *Digital Bathymetric Model* (DBM), adalah representasi raster tiga dimensi permukaan dasar laut di mana setiap piksel menyimpan nilai kedalaman (elevasi negatif) pada koordinat geografis yang bersesuaian. DEM merupakan produk akhir utama dari proses pengolahan batimetri dan menjadi dasar bagi seluruh

analisis morfologi selanjutnya. DEM dihasilkan dari grid batimetri yang telah melalui seluruh proses koreksi dan pembersihan data. DEM diekspor dalam format raster standar (GeoTIFF) dengan sistem koordinat proyeksi yang sesuai dengan area studi (UTM WGS1984 Zona 46N). Resolusi spasial DEM ditentukan oleh ukuran sel yang digunakan pada tahap *gridding*. Pada penelitian ini DEM berfungsi sebagai input primer bagi seluruh analisis parameter morfologi, termasuk perhitungan *Slope*, *Aspect*, *Curvature*, *Rugosity*, *Convergence Index*, dan *Bathymetric Position Index* (BPI).

3.4.2 Tahap Pengolahan Parameter Klasifikasi Morfologi

Parameter klasifikasi morfologi diturunkan dari DEM menggunakan perangkat lunak SAGA GIS dan ArcGIS. Seluruh parameter dihitung berbasis analisis jendela gerak (*moving window*) menggunakan kernel 3×3 piksel sesuai prinsip yang diformulasikan oleh Zevenbergen dan Thorne (1987). Setiap piksel dihitung berdasarkan nilai elevasi piksel pusat dan 8 piksel tetangganya sebagaimana dinotasikan pada Gambar 3.4 berikut.

a	b	c
d	e (pusat)	f
g	h	i

Gambar 3.5 Kernel 3x3

a sampai i adalah nilai elevasi piksel, e adalah piksel pusat (lokasi yang dihitung), dan cellsize adalah ukuran resolusi spasial piksel (meter). Seluruh turunan DEM dapat dikelompokkan berdasarkan orde turunannya. Turunan pertama menghasilkan *Slope* dan *Aspect*. Turunan kedua menghasilkan *Curvature*. Turunan selanjutnya adalah analisis statistik spasial menghasilkan *Convergence Index* dan rasio geometrik 3D/2D yang menghasilkan *Rugosity*. Keseluruhan parameter ini kemudian digunakan untuk menghasilkan peta klasifikasi morfologi dan analisis terrain.

1. Broad Scale dan Fine Scale

Broad scale dan *fine scale* merupakan dua rentang skala analisis spasial yang digunakan dalam perhitungan *Bathymetric Position Index* (BPI). Kedua skala ini merepresentasikan lingkungan perbandingan yang berbeda dalam menilai posisi relatif suatu lokasi terhadap sekitarnya.

- *Broad scale* menggunakan radius annular besar untuk mendeteksi fitur morfologi berskala makro seperti punggung besar, lembah luas, atau lereng kontinental.
- *Fine scale* menggunakan radius annular kecil untuk mendeteksi fitur berskala mikro seperti gundukan kecil, lubang *pockmark*, atau variasi lokal dasar laut.

2. Bathymetric Position Index (BPI)

Klasifikasi BPI menghasilkan Peta Klasifikasi Morfologi yang menampilkan distribusi spasial berbagai kelas bentuk lahan dasar laut. Dalam penelitian ini, peta ini digunakan untuk membandingkan karakteristik morfologi antara zona semburan gas dan zona non-semburan. Klasifikasi morfologi dilakukan dengan mengkombinasikan nilai *broad scale*, *fine scale*, dan nilai *slope* dengan mengikuti skema Lundblad dkk (2006) yang bisa dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 3. 1 Skema Klasifikasi Lundblad

No	Kelas	Deskripsi
1	<i>Narrow depression</i> (Depresi Sempit)	Memiliki nilai negatif pada <i>fine scale</i> dan <i>broad scale</i> .
2	<i>Local crest in depression</i> (Puncak Lokal dalam Depresi)	Memiliki nilai <i>fine scale</i> positif dan nilai negatif pada <i>broad scale</i> .
3	<i>Broad depression with an open bottom</i> (Depresi Luas dengan Dasar Terbuka)	Memiliki nilai <i>broad scale</i> negatif, namun pada <i>fine scale</i> memiliki nilai netral.
4	<i>Depression on crest</i> (Depresi pada Puncak)	Memiliki nilai <i>fine scale</i> negatif dan <i>broad scale</i> positif.
5	<i>Narrow crest</i> (Puncak Sempit)	Kelas ini dicirikan oleh nilai <i>fine scale</i> dan <i>broad scale</i> yang keduanya positif.
6	<i>Lateral midslope depression</i> (Depresi Lereng Tengah Lateral)	Memiliki nilai <i>fine scale</i> negatif dan <i>broad scale</i> netral.
7	<i>Lateral midslope crest</i> (Puncak Lereng Tengah Lateral)	Memiliki nilai <i>fine scale</i> positif dan <i>broad scale</i> netral, disertai kemiringan lereng yang terukur.
8	<i>Open slopes</i> (Lereng Terbuka)	Memiliki nilai <i>fine scale</i> netral dan disertai kemiringan lereng yang terukur.
9	<i>Steep slope</i> (Lereng Curam)	Area dengan kemiringan lereng yang sangat tajam, serta memiliki nilai <i>fine scale</i> positif
10	<i>Local depression on flat</i> (Depresi Lokal pada Dataran)	Memiliki nilai <i>fine scale</i> negatif, namun <i>broad scale</i> netral dan kemiringan rendah.
11	<i>Local crest on flat</i> (Puncak Lokal pada Dataran)	Memiliki nilai <i>fine scale</i> positif, namun <i>broad scale</i> netral dan kemiringan rendah.
12	<i>Shelf</i>	Memiliki nilai <i>fine</i> dan <i>broad scale</i> yang cenderung netral serta kemiringan rendah.
13	<i>Broad flat</i> (Dataran Luas)	Memiliki nilai <i>fine scale</i> dan <i>broad scale</i> keduanya netral.

3. Slope

Slope (kemiringan lereng) adalah turunan pertama dari permukaan DEM yang mengukur tingkat perubahan elevasi terhadap jarak horizontal pada setiap piksel yang dinyatakan dalam derajat. Peta *slope* digunakan untuk mengidentifikasi distribusi area berlereng curam dan landai di seluruh area penelitian serta sebagai variabel pembeda dalam klasifikasi BPI. *Slope* dihitung berdasarkan turunan parsial permukaan terhadap arah X (barat-timur, dz/dx) dan arah Y (utara-selatan, dz/dy) menggunakan Gambar 3.4 Kernel 3×3 yang dituliskan dalam persamaan (3.1) dan (3.2).

$$X = \frac{(c + 2f + i) - (a + 2d + g)}{8 \times \text{cell size}} \quad (3.1)$$

$$Y = \frac{(g + 2h + i) - (a + 2b + c)}{8 \times \text{cell size}} \quad (3.2)$$

Setelah gradien (X dan Y) parsial diperoleh, dapat menghitung nilai *slope* per piksel menggunakan persamaan (3.3).

$$S(^{\circ}) = \tan^{-1}(\sqrt{X^2 + Y^2}) \quad (3.3)$$

4. Aspect

Aspect merupakan turunan pertama DEM berbasis sudut yang digunakan untuk menganalisis orientasi fitur utama yang ada di bawah laut. *Aspect* menggunakan komponen gradien yang sama dengan *Slope* (X dan Y), namun dikombinasikan menggunakan fungsi *atan2* untuk menghasilkan sudut *azimuth* dari lereng. Pada persamaan (3.4), perhitungan *aspect* yang digunakan mengacu pada Zevenbergen dan Thorne (1987).

$$\text{Aspect } (^{\circ}) = \frac{180}{\pi} \times \text{atan2}\left(Y, -\frac{dz}{dx}\right) + \text{koreksi azimuth} \quad (3.4)$$

Dimana koreksi *azimuth* diberikan untuk memastikan nilai dari *aspect* dalam rentang $0^{\circ} - 360^{\circ}$. Berikut merupakan ketentuan koreksi *azimuth* yang ada dalam perangkat lunak SAGA GIS.

- Jika *Aspect* $< 90^{\circ}$, maka *Aspect* $= 90^{\circ} - \text{Aspect}$
- Jika *Aspect* $> 90^{\circ}$, maka *Aspect* $= 360^{\circ} - \text{Aspect} + 90^{\circ}$
- Jika *Aspect* $= 0^{\circ}$, maka *aspect* tidak terdefinisi atau dapat dikategorikan sebagai datar.

5. General Curvature Index

Curvature (kelengkungan) adalah turunan kedua dari permukaan DEM yang mengukur bagaimana kecuraman lereng berubah dari piksel ke piksel. *Curvature* dihitung dari polinomial permukaan orde kedua yang di-fit terhadap kernel 3×3 . Zevenbergen dan Thorne (1987) mendefinisikan koefisien-koefisien polinomial yang membentuk dasar perhitungan yang dituliskan dalam persamaan (3.5).

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (3.5)$$

Dimana nilai dari setiap koefisien D hingga H didapatkan dari penurunan kernel 3×3 . Namun, untuk koefisien A, B, dan C tidak digunakan dalam perhitungan nilai *curvature* karena tidak berkontribusi pada nilai *curvature* di titik pusat tetapi tetap diperlukan dalam model perhitungan agar fit dengan 9 titik pada Gambar 3.4, sedangkan I adalah nilai elevasi pada piksel pusat. Untuk mencari General *curvature* hanya membutuhkan koefisien D dan E yang dituliskan dalam Persamaan 3.6 dan 3.7.

$$D = \frac{\left(\frac{d+f}{2-e}\right)}{\text{cell size}^2} \quad (3.6)$$

$$E = \frac{\left(\frac{b+h}{2-e}\right)}{\text{cell size}^2} \quad (3.7)$$

Setelah mendapatkan nilai dari kedua koefisien, maka untuk menghitung *general curvature* dapat menggunakan persamaan 3.8.

$$\text{General Curvature} = -2(D + E) * 100 \quad (3.8)$$

6. *Convergence Index*

Convergence Index (CI) merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur sejauh mana lereng-lereng di sekitar suatu titik mengumpul (konvergen) atau menyebar (divergen). Peta CI (Peta CI) digunakan untuk mengidentifikasi jalur pengumpulan atau penyebaran material, seperti area akumulasi sedimen pada lembah bawah laut atau area erosi pada puncak. Dalam penelitian ini, CI membantu menginterpretasikan pola distribusi sedimen di area penelitian. CI dihitung berdasarkan perbedaan antara arah *aspect* rata-rata pada tetangga suatu piksel dengan arah menuju piksel pusat. CI dihitung berdasarkan selisih antara *aspect* dari 8 sel tetangga dengan arah yang seharusnya menuju ke sel pusat yang dituliskan pada persamaan 3.9.

$$\Delta_i = \Sigma_i (\text{Aspect}_{\text{tetangga}(i)} - \theta_i) / 8 \quad (3.9)$$

Implementasi dalam SAGA GIS mengikuti metode Koethe dan Lehmeier (1996). Arah referensi (θ) dari tiap tetangga menuju piksel pusat.

- Tetangga 1 (NW / atas-kiri) : $\theta_1 = 135^\circ$
- Tetangga 2 (N / atas) : $\theta_2 = 180^\circ$
- Tetangga 3 (NE / atas-kanan) : $\theta_3 = 225^\circ$
- Tetangga 4 (W / kiri) : $\theta_4 = 90^\circ$
- Tetangga 5 (E / kanan) : $\theta_5 = 270^\circ$
- Tetangga 6 (SW / bawah-kiri) : $\theta_6 = 45^\circ$
- Tetangga 7 (S / bawah) : $\theta_7 = 0^\circ$
- Tetangga 8 (SE / bawah-kanan) : $\theta_8 = 315^\circ$

7. *Rugosity Index*

Rugosity (kekasaran permukaan) adalah ukuran kompleksitas atau heterogenitas topografi permukaan dasar laut, dihitung sebagai rasio antara luas permukaan 3D aktual terhadap luas area proyeksi planar 2D. Peta rugosity dapat dibuat dengan berbagai metode seperti *Arc-Chord Ratio* (ACR), *Vector Ruggedness Measure* (VRM), dan *Terrain Ruggedness Index* (TRI). Namun, dalam penelitian ini menggunakan metode VRM karena metode ini dapat mengukur seberapa tersebar arah vektor normal dari permukaan dalam suatu *neighborhood*. Metode VRM berbasis dispersi vektor normal permukaan dalam *window* analisis. Metode ini tidak dipengaruhi secara langsung oleh kemiringan lokal. Algoritma perhitungan VRM dimulai dengan mencari vektor normal permukaan tiap piksel yang dituliskan dalam persamaan 3.10 hingga persamaan 3.12.

$$x_i = \sin(\text{Slope}_i) \times \sin(\text{Aspect}_i) \quad (3.10)$$

$$y_i = \sin(\text{Slope}_i) \times \cos(\text{Aspect}_i) \quad (3.11)$$

$$z_i = \cos(\text{Slope}_i) \quad (3.12)$$

Setelah mengetahui nilai dari tiap vektor terhadap sumbu x, y, dan z, selanjutnya adalah dengan mencari resultan vektor dalam *window* (n sel) yang dituliskan dalam persamaan 3.13.

$$R = \sqrt{(\sum x_i)^2 + (\sum y_i)^2 + (\sum z_i)^2} \quad (3.13)$$

Selanjutnya dapat menghitung nilai kekasaran permukaan menggunakan metode VRM dengan persamaan 3.14.

$$\text{VRM} = 1 - (R / n) \quad (3.14)$$

3.4.3 Tahap pengolahan *Backscatter*

Pengolahan data *backscatter* dilakukan menggunakan perangkat lunak FMGT (FM Geocoder Toolbox). Data *backscatter* yang direkam secara bersamaan dengan data batimetri oleh MBES mengandung informasi tentang sifat fisik dan tekstur dasar laut. Tahapan pengolahan *backscatter* secara berurutan adalah sebagai berikut.

1. *Swath Coverage*

Swath coverage adalah representasi visual cakupan area yang berhasil direkam oleh sistem *Multibeam Echosounder* selama survei. *Swath* merupakan lebar strip dasar laut yang dapat direkam oleh MBES dalam sekali lintasan. Dalam FMGT, *swath coverage* diperiksa untuk memastikan bahwa seluruh area survei telah tercakup tanpa adanya *gap* (celah) antar lintasan yang signifikan. Visualisasi *coverage* juga memperlihatkan kualitas data (*gap*, *overlap*, degradasi di tepi *swath*) yang penting untuk tahap koreksi berikutnya.

2. *Adjust*

Tahap ini adalah proses penyesuaian awal untuk menghasilkan data yang konsisten antar lintasan survei. Proses *adjust* melibatkan penyelarasan level intensitas *backscatter* pada area yang overlap antar lintasan yang berdekatan. Pada tahap ini, FMGT akan melakukan dua hal untuk menghasilkan dataset *backscatter* yang homogen secara radiometrik sebagai dasar untuk koreksi dan analisis lebih lanjut, sehingga variasi intensitas yang terlihat pada mosaik benar-benar mencerminkan perbedaan sifat dasar laut.

- *Time Varying Gain*

Time Varying Gain (TVG) *correction* adalah koreksi untuk variasi penguatan sinyal akustik yang diterapkan oleh sistem MBES sebagai fungsi waktu untuk mengompensasi atenuasi dan absorpsi gelombang akustik dalam air. Tujuan koreksi TVG adalah memastikan bahwa intensitas *backscatter* yang direkam dari kedalaman berbeda dapat dibandingkan secara adil. Tanpa TVG yang tepat, data *backscatter* dari area dangkal dan dalam akan memiliki level yang berbeda meskipun dasar lautnya identik. TVG diterapkan oleh sistem secara *real-time* selama perekaman, namun koreksinya perlu diverifikasi dan disesuaikan dalam pengolahan. Dalam FMGT, koreksi TVG memastikan bahwa *gain* yang diterapkan oleh sistem selama perekaman telah sesuai dengan model transmisi akustik yang digunakan. Apabila terdapat perbedaan antara TVG yang diterapkan sistem dan yang seharusnya, koreksi residual akan dilakukan.

- *Beam Pattern Correction*

Beam Pattern Correction (BPC) atau koreksi pola beam adalah koreksi untuk menghilangkan variasi intensitas *backscatter* yang disebabkan oleh pola respons sudut dari transduser MBES. BPC bertujuan untuk menghilangkan artefak yang disebabkan oleh karakteristik instrumen sehingga data *backscatter* yang dihasilkan lebih representatif terhadap sifat fisik dasar laut. Dalam FMGT, BPC dilakukan dengan mengestimasi pola *beam* berdasarkan statistik distribusi sudut *backscatter* dari seluruh area survei, dengan asumsi bahwa distribusi jenis dasar laut bersifat acak dan seragam secara statistik. Pola *beam* yang terestimasi kemudian digunakan untuk mengoreksi setiap ping berdasarkan sudut insidensinya.

3. *Filtering*

Filtering pada pengolahan *backscatter* adalah proses mengurangi *noise* dan artefak yang masih tersisa pada data setelah koreksi-koreksi sebelumnya. *Noise* pada data *backscatter* dapat berasal dari sudut *grazing* yang sangat kecil atau besar, atau *sounding* yang tidak valid. *Filtering* dilakukan dengan menghapus lajur survei yang berbelok atau pada saat akuisisi kapal bermanuver sehingga dapat menyebabkan *Angle of Incidence* (perbedaan sudut datang) dan perbedaan nilai intensitas yang tidak merepresentasikan keadaan sebenarnya. Tahap ini dilakukan untuk meningkatkan *signal noise ratio* data *backscatter* sehingga variasi intensitas yang terlihat lebih mencerminkan perbedaan sifat dasar laut yang nyata. Data yang bersih akan menghasilkan mosaic *backscatter* dengan kontras yang lebih jelas antar tipe substrat.

Selain itu, pada tahap ini juga dilakukan *Angle Varying Gain* (AVG) *correction* yang juga biasa dikenal sebagai *Angular Response Correction* (ARC). AVG adalah koreksi untuk menghilangkan variasi sistematis intensitas *backscatter* terhadap sudut insidensi beam yang disebabkan oleh sifat alami interaksi akustik dengan dasar laut, terlepas dari variasi jenis substrat. Dalam FMGT, koreksi AVG dilakukan dengan mengestimasi kurva respons sudut rata-rata dari seluruh dataset dan kemudian mengoreksi setiap *sounding* berdasarkan deviasi dari kurva rata-rata tersebut. Hal ini menghasilkan *backscatter* yang telah dinormalisasi terhadap sudut sehingga variasi intensitas yang bersifat instrumental dihilangkan, menyisakan hanya variasi yang mencerminkan perbedaan substrat.

4. *Mosaicking Backscatter*

Mosaicking backscatter merupakan proses penggabungan data *backscatter* dari seluruh lintasan survei menjadi satu gambar raster. Mosaik *backscatter* merepresentasikan distribusi intensitas akustik dasar laut di seluruh area survei yang dapat divisualisasikan dan dianalisis secara spasial. Dalam FMGT, *mosaicking* dilakukan setelah seluruh koreksi telah diterapkan. Pada proses ini melibatkan:

- Proyeksi seluruh *sounding* terkoreksi ke dalam grid *georeferenced* dengan resolusi 25×25 m.
- Blending pada area tumpang tindih antar lintasan menggunakan metode *weighted average* untuk mengurangi batas yang terlihat (*seam artifacts*).
- Normalisasi histogram untuk memastikan tampilan kontras yang optimal.

Pada penelitian ini, *mosaic backscatter* digunakan sebagai dasar untuk interpretasi dan delimitasi zona-zona substrat, serta dikombinasikan dengan hasil ARA untuk menghasilkan Peta Klasifikasi Jenis Sedimen.

5. Penetapan Nilai *Threshold Intensitas Backscatter*

Penetapan nilai threshold dalam penelitian ini dilakukan secara empiris melalui proses iteratif, yaitu dengan mencoba berbagai nilai batas secara berulang dan mengevaluasi pola sebaran yang dihasilkan. Pendekatan ini dipilih karena hingga saat ini belum terdapat nilai threshold yang bersifat universal dan berlaku untuk semua kondisi perairan. Untuk memastikan nilai *threshold* yang ditetapkan mendekati kondisi sebenarnya, hasil dari *thresholding* dibandingkan secara visual dengan peta klasifikasi sedimen yang dihasilkan oleh metode *Angular Response Analysis* (ARA). Perbandingan ini dilakukan dengan prinsip bahwa zona yang diklasifikasikan sebagai sedimen kasar oleh ARA seharusnya memiliki nilai *backscatter* yang berada di atas nilai threshold, dan sebaliknya untuk zona sedimen halus. Apabila pola spasial antara peta threshold dan peta klasifikasi ARA menunjukkan kesesuaian yang wajar, maka nilai threshold tersebut dianggap representatif untuk area penelitian yang bersangkutan.

6. *Angular Response Analysis* (ARA)

Pada tahap ini, Setiap tipe substrat (misalnya pasir, lumpur, kerikil, batuan) memiliki karakteristik kurva respon sudut (*angular response curve*) yang berbeda, bergantung pada sifat fisik seperti ukuran butir, kekasaran permukaan, dan impedansi akustik. Dalam FMGT, ARA dilakukan dengan mengekstraksi *angular response curve* (ARC). Kurva ini kemudian dibandingkan dengan model teoritis atau pustaka referensi untuk mengidentifikasi tipe substrat. Karakteristik kurva yang dianalisis meliputi:

- Nilai *backscatter* pada nadir (0°): mencerminkan komponen spekuler yang terkait dengan impedansi akustik
- Kemiringan kurva pada sudut menengah (20° – 40°): mencerminkan kekasaran permukaan
- Perilaku pada sudut besar ($>45^\circ$): mencerminkan *volume scattering* dan heterogenitas substrat

Algoritma klasifikasi dalam FMGT kemudian mencocokkan ARC setiap area dengan profil yang diketahui untuk menghasilkan peta klasifikasi sedimen. Dalam penelitian ini, ARA digunakan untuk membandingkan distribusi jenis sedimen antara zona semburan gas dan zona non-semburan, serta mengidentifikasi perubahan sifat fisik sedimen yang mungkin terkait dengan aktivitas gas.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil pengolahan dan analisis data. Bagian hasil menyajikan visualisasi dari setiap tahapan pengolahan, sedangkan bagian pembahasan menganalisis dan menginterpretasikan hasil tersebut secara lebih mendalam, mencakup perbandingan karakteristik morfologi, identifikasi struktur dan fitur bawah laut, analisis variasi *backscatter* dan sebaran sedimen, evaluasi akurasi klasifikasi, serta pembahasan korelasi akustik-sedimen. Seluruh analisis dilakukan secara komparatif antara area semburan dan non-semburan untuk menjawab rumusan masalah yang telah ditetapkan.

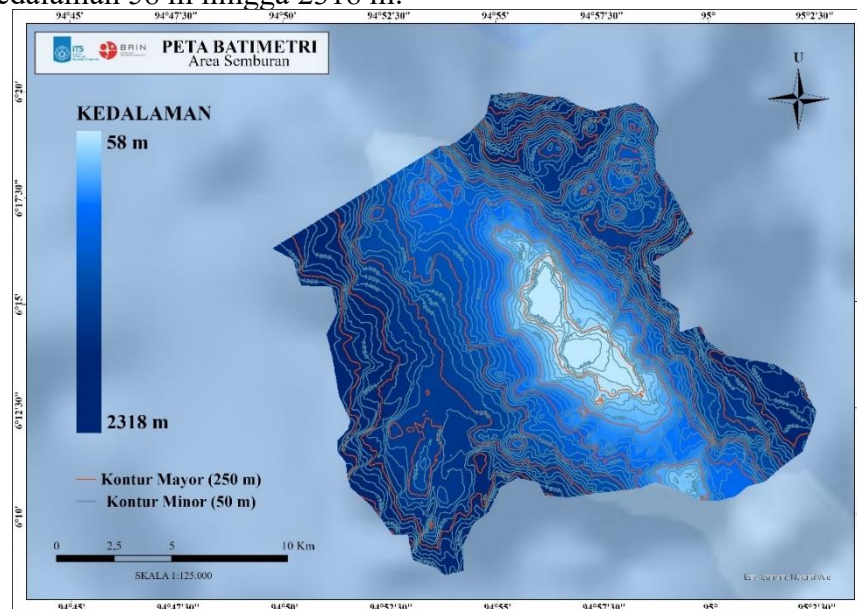
4.1 Hasil

4.1.1 Parameter Kuantitatif Morfologi

Penelitian ini membandingkan karakteristik morfologi antara area semburan dengan non-semburan gas bawah laut yang berada di perairan weh, aceh. Resolusi *grid* batimetri yang digunakan dalam penelitian ini adalah 25×25 meter, yang cukup untuk mengamati karakteristik morfologi bawah laut. Pengolahan data batimetri dilakukan beberapa koreksi, seperti *sound velocity* dan *patch test* untuk mendapatkan nilai kedalaman yang merepresentasikan keadaan sebenarnya. Beberapa koreksi tersebut dilakukan pada saat proses akuisi data, sehingga pada saat melakukan pengolahan hanya melalui proses *filtering* untuk menghapus *noise* dan *outlier* yang ada. Selanjutnya, data batimetri diolah menjadi DEM untuk dilakukan pengolahan lebih lanjut menggunakan perangkat lunak ArcGIS dan Saga GIS untuk membuat turunan DEM yang meliputi *slope*, *aspect*, *curvature*, *convergence index*, dan *rugosity*. Berikut merupakan hasil pengolahan parameter kuantitatif morfologi.

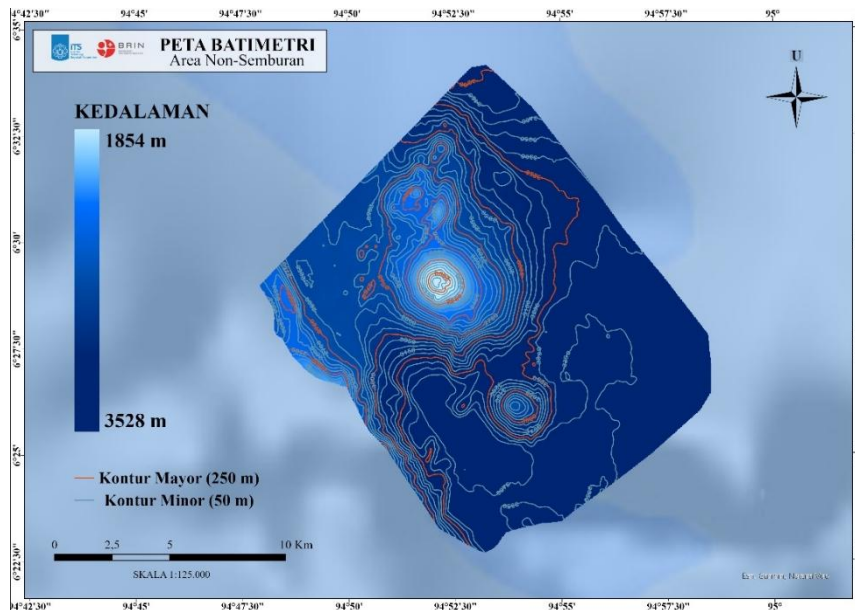
A. Batimetri

Dalam penelitian ini, Peta Batimetri merepresentasikan kedalaman dan kondisi bawah laut melalui garis kontur dari area semburan dan non-semburan. Hasil dari Pengolahan Batimetri pada area semburan yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 memiliki rentang kedalaman 58 m hingga 2318 m.



Gambar 4.1 Peta Batimetri Area Semburan

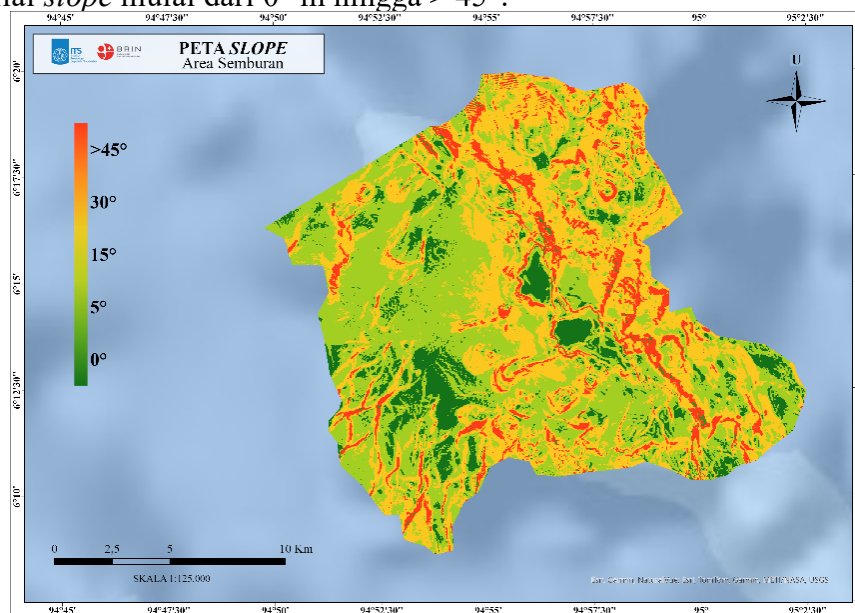
Hasil dari Pengolahan Batimetri pada area non-sembruran yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 memiliki rentang kedalaman 1854 m hingga 3528 m.



Gambar 4.2 Peta Batimetri Area Non-Sembruran

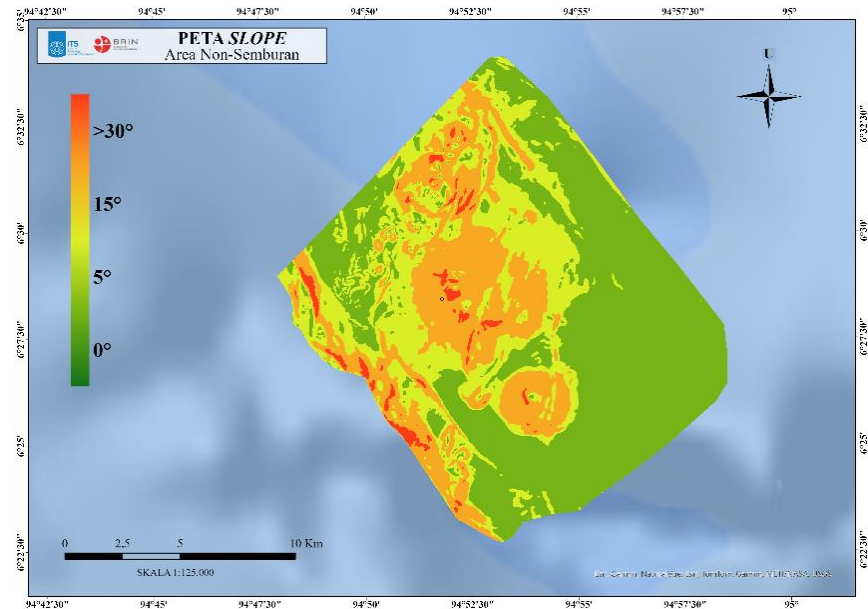
B. Slope

Peta *Slope* memiliki keterkaitan dengan Peta Batimetri, Peta *Slope* menggambarkan perubahan elevasi atau Tingkat kecuraman pada area semburan dan non-sembruran. Hasil dari Pengolahan *slope* pada area semburan yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 memiliki rentang nilai *slope* mulai dari 0° m hingga > 45°.



Gambar 4.3 Peta *Slope* Area Sembruran

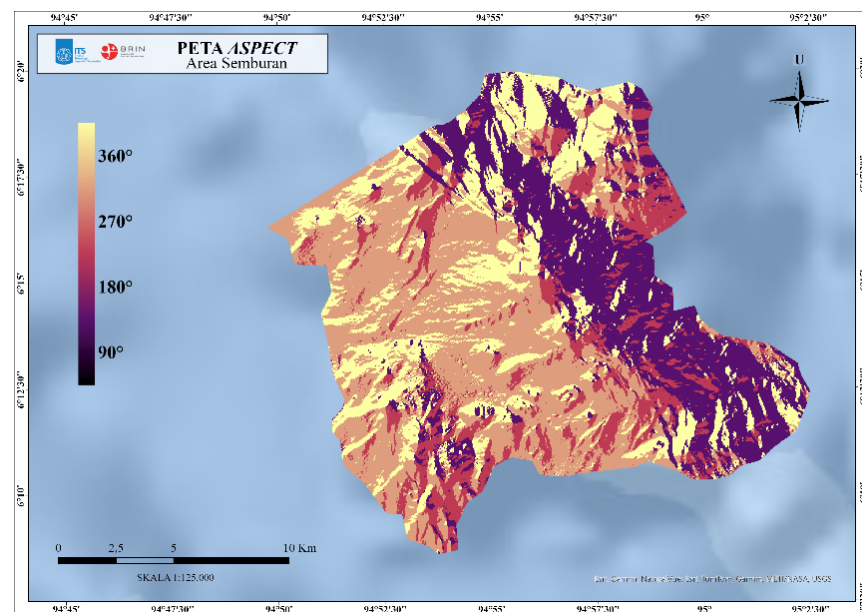
Hasil dari Pengolahan *slope* pada area non-sembruran yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 memiliki rentang nilai *slope* mulai dari 0° m hingga > 30°.



Gambar 4.4 Peta *Slope* Area Non-Semburan

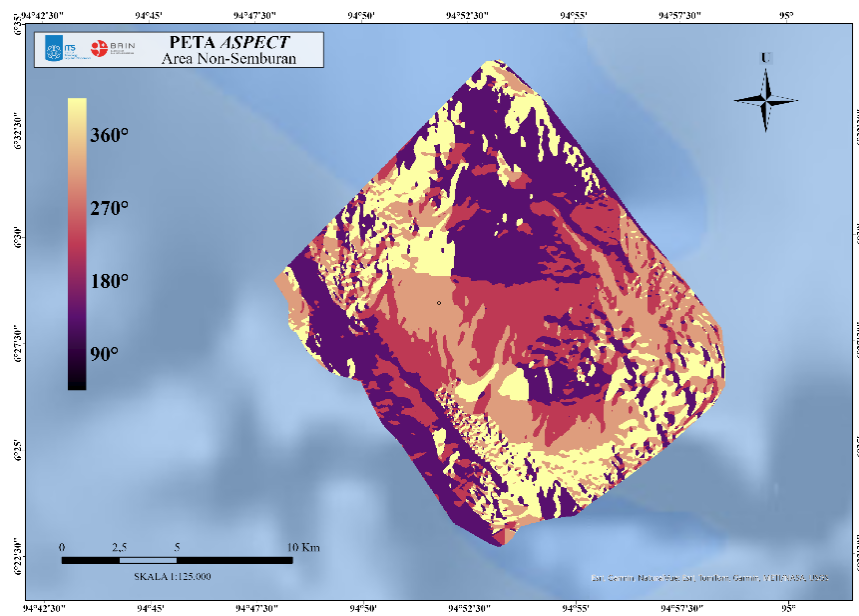
C. *Aspect*

Peta *Aspect* dalam penelitian ini mengukur arah atau orientasi lereng dari setiap piksel yang dinyatakan dalam satuan derajat. Selain itu, *aspect* juga menjadi parameter yang sangat penting karena dapat memberikan informasi tentang pola aliran lava, sedimentasi dan distribusi material vulkanik. *Aspect* diukur searah jarum jam dari Utara, misalnya *aspect* 90° menunjukkan lereng yang menghadap ke timur, sedangkan *aspect* 270° menunjukkan lereng yang menghadap ke barat. Hasil Pengolahan *Aspect* pada area semburan yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 memperlihatkan dominasi arah atau orientasi fitur ke arah barat daya.



Gambar 4.5 Peta *Aspect* Area Semburan

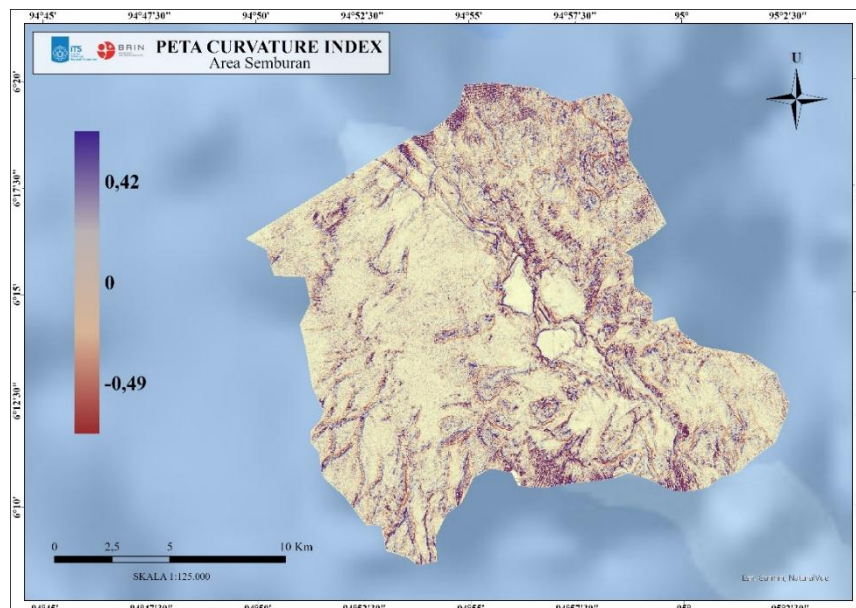
Hasil Pengolahan *Aspect* pada area non-sembruan yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 memperlihatkan arah atau orientasi fitur ke arah merata ke segala arah.



Gambar 4.6 Peta *Aspect* Area Non-Semburan

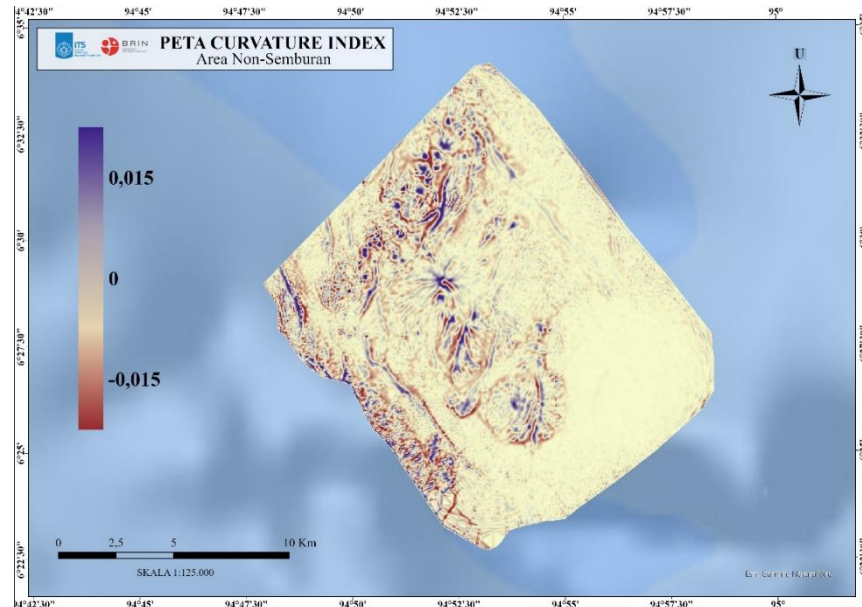
D. *Curvature*

Peta *Curvature* untuk mengetahui kelengkungan permukaan dasar laut. *Curvature* membantu mengidentifikasi batas-batas geomorfologi melalui transisi antara konkav (cekung) dan konveks (cembung). Hasil Pengolahan *curvature* pada area semburan yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 menunjukkan rentang indeks nilai *curvature* mulai dari -0,49 hingga 0,42.



Gambar 4.7 Peta *Curvature* Area Semburan

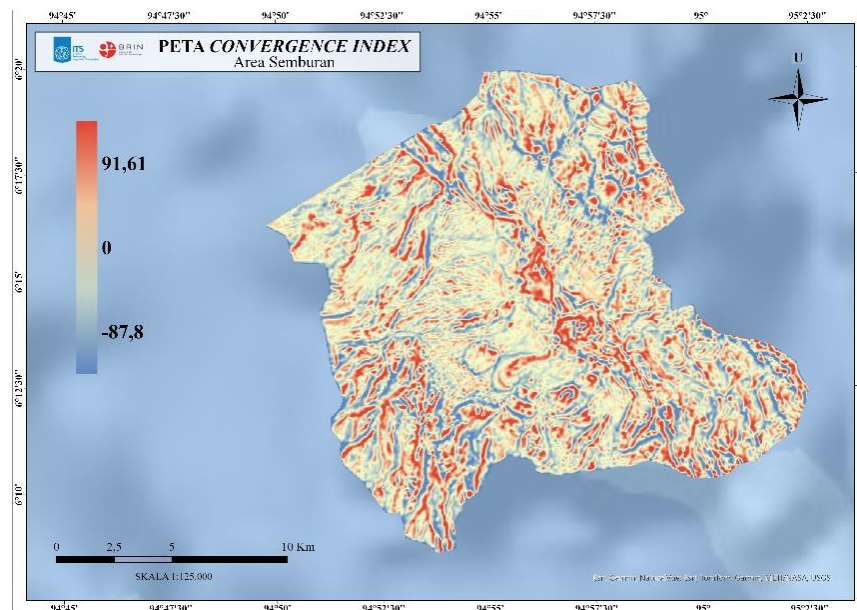
Hasil Pengolahan *curvature* pada area non-sembruran yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 menunjukkan rentang indeks nilai *curvature* mulai dari -0,015 hingga 0,015.



Gambar 4.8 Peta *Curvature* Area Non-Semburan

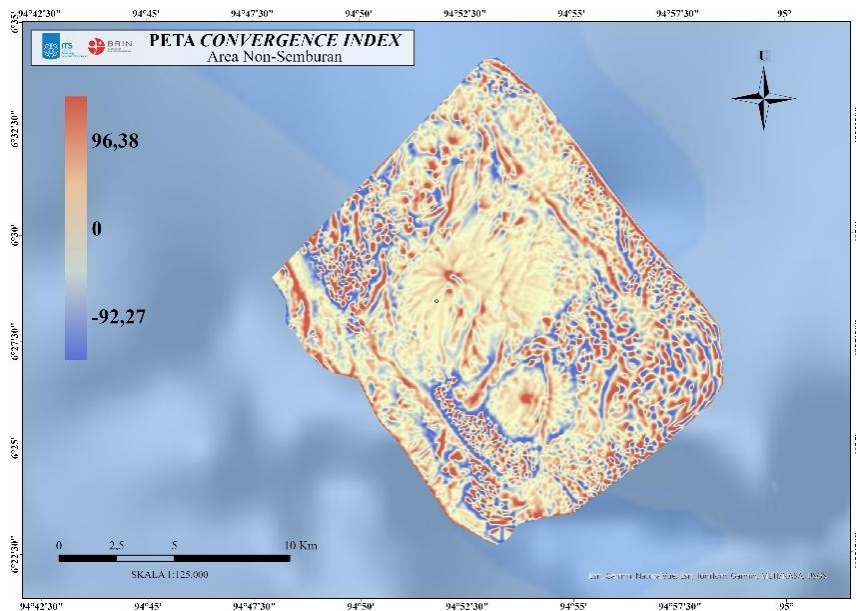
E. *Convergence Index*

Convergence Index (CI) merupakan parameter geomorfometri yang mengkuantifikasi derajat konvergensi atau divergensi aliran material sedimen. Hasil Pengolahan CI pada area semburan yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 menunjukkan rentang indeks nilai CI mulai dari -87,8 hingga 91,61.



Gambar 4.9 Peta *Convergence Index* Area Semburan

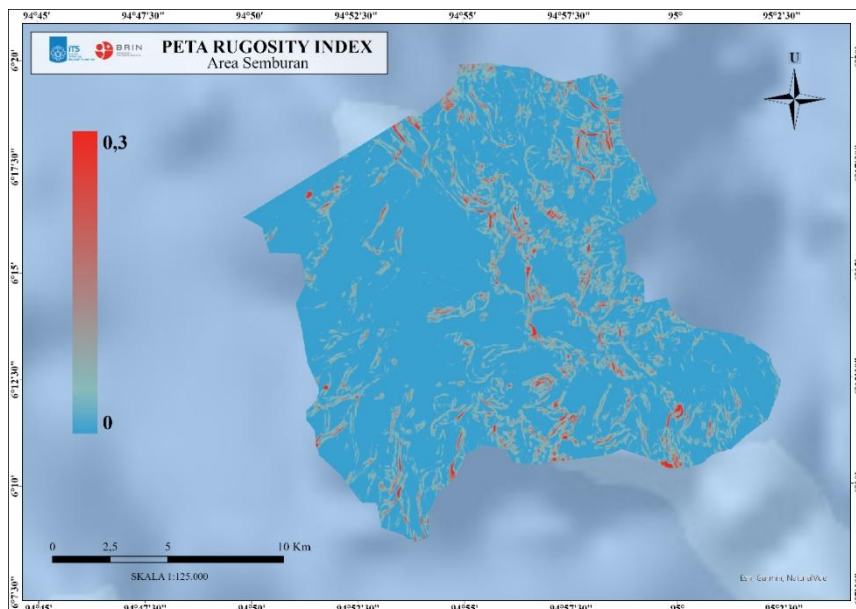
Hasil Pengolahan CI pada area semburan yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 menunjukkan rentang indeks nilai CI mulai dari -92,27 hingga 96,38.



Gambar 4.10 Peta *Convergence Index* Area Non-Semburan

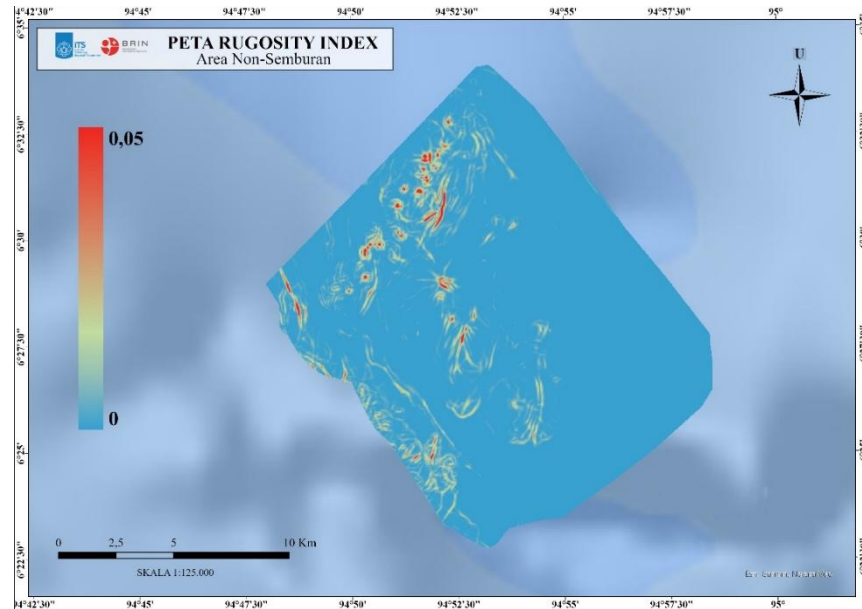
F. *Rugosity*

Peta *Rugosity* digunakan untuk mengukur kompleksitas atau kekasaran permukaan topografi. Hasil Pengolahan *rugosity* pada area semburan yang ditunjukkan pada Gambar 4.11 menunjukkan rentang indeks nilai *rugosity* mulai dari 0 hingga 0,3.



Gambar 4.11 Peta *Rugosity* Area Semburan

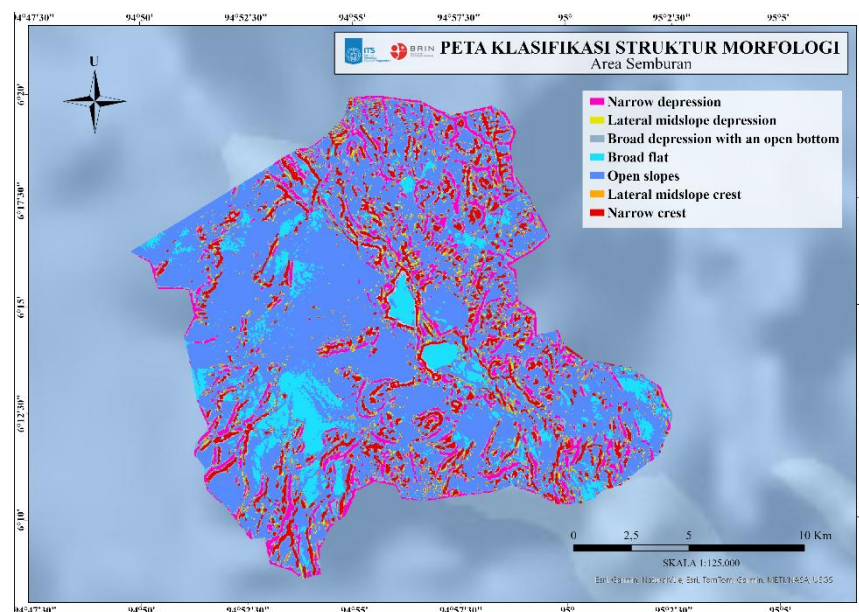
Hasil Pengolahan *rugosity* pada area non-sembruan yang ditunjukkan pada Gambar 12 menunjukkan rentang indeks nilai *rugosity* mulai dari 0 hingga 0,05.



Gambar 4.12 Peta *Rugosity* Area Non-Semburan

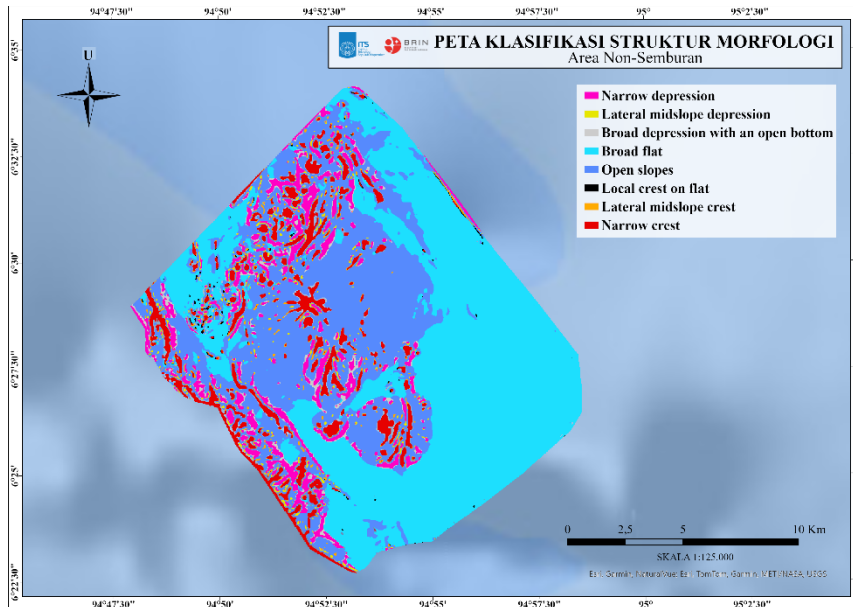
4.1.2 Klasifikasi Struktur Morfologi

Morfologi bawah laut merupakan permukaan bumi di bagian dasar laut yang merepresentasikan bentuk fitur atau objek yang berada di bawah laut yang terbentuk dari proses geologi seperti tektonik, erosi, sedimentasi, serta pergerakan lempeng (Wormald dkk., 2012). Setiap morfologi bawah laut memiliki struktur yang mencirikan fitur bawah laut tersebut. Dalam penelitian ini *Bathymetry Position Index* (BPI) digunakan untuk melakukan klasifikasi struktur morfologi yang membentuk fitur bawah laut di area asemburan dan area non-sembruran. Berdasarkan Gambar 4.13, pada Area sembruran didominasi oleh kelas *Open Slopes* dan *Narrow Crest*.



Gambar 4. 13 Peta Klasifikasi Struktur Morfologi Area Semburan

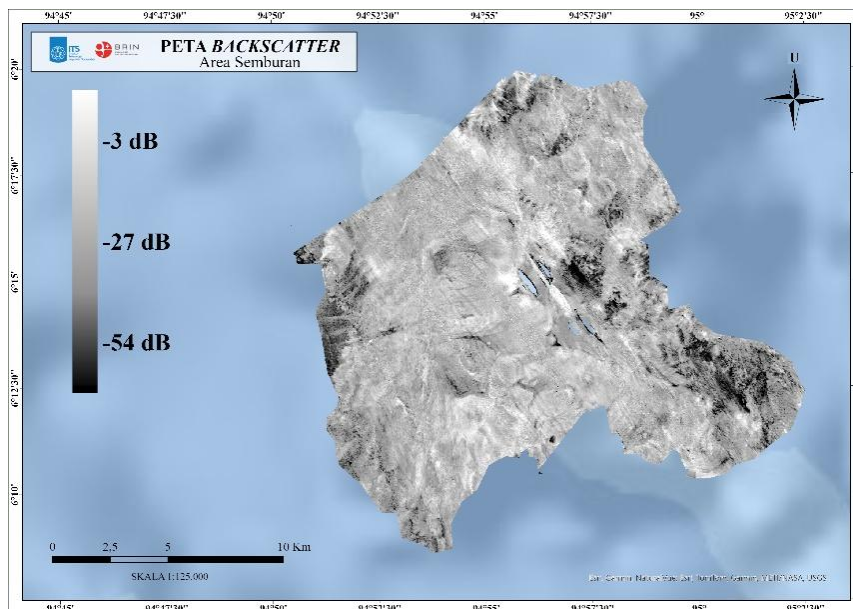
Berbeda dengan area sembruran, Area non-sembruran didominasi oleh kelas *Open Slopes* dan *Broad Flat* yang ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Peta Klasifikasi Struktur Morfologi Area Non-Semburan

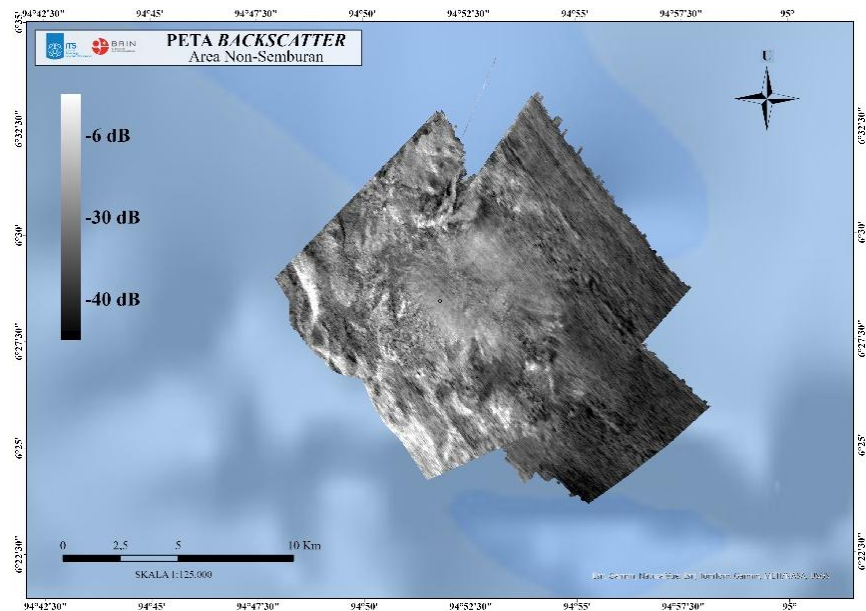
4.1.3 Intensitas *Backscatter*

Hasil Pengolahan *Backscatter* pada area semburan menghasilkan nilai intensitas *backscatter* mulai dari -54 dB hingga -3 dB yang ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Peta *Backscatter* Area Semburan

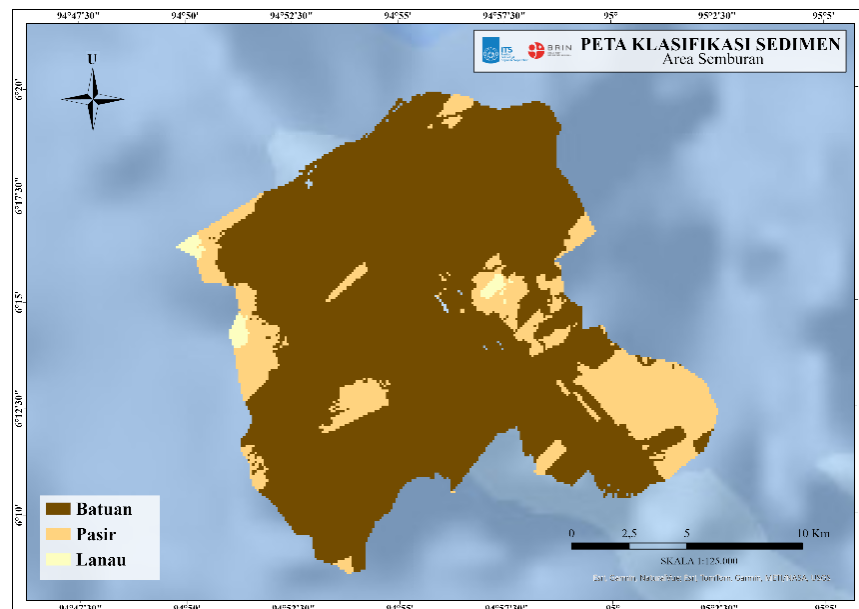
Pada area non-semburan, Gambar 4.16 menunjukkan rentang nilai intensitas *Backscatter* mulai dari -40 dB hingga -6 dB.



Gambar 4.16 Peta *Backscatter* Area Non-Semburan

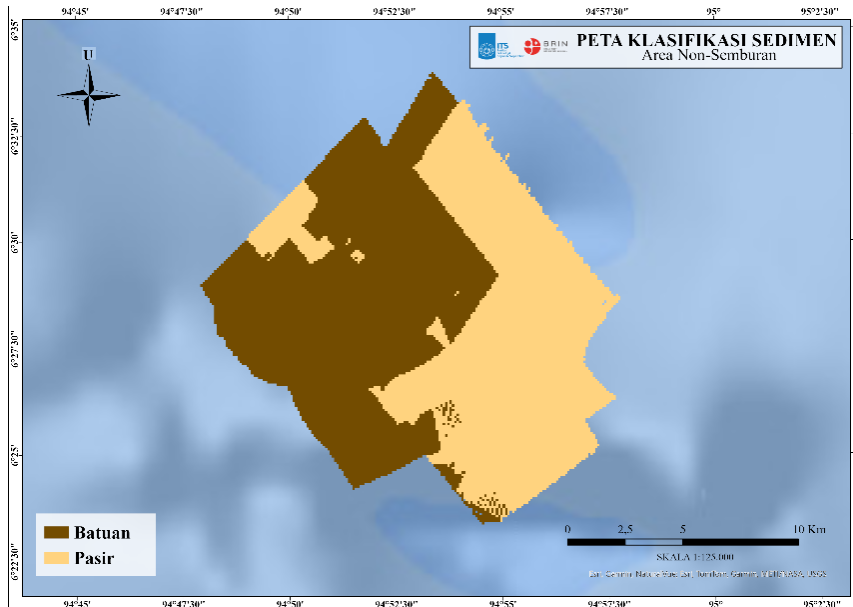
4.1.4 Klasifikasi Sedimen

Klasifikasi sedimen menggunakan ARA pada area semburan mengidentifikasi 3 kelas sedimen yang ditunjukkan oleh Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Peta Klasifikasi Sedimen Area Semburan

Pada area non-sembruan, hasil klasifikasi sedimen pada ARA hanya menghasilkan 2 kelas sedimen yang ditunjukkan oleh Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Peta Klasifikasi Sedimen Area Non-Semburan

4.1.5 Uji Validasi Klasifikasi Sedimen

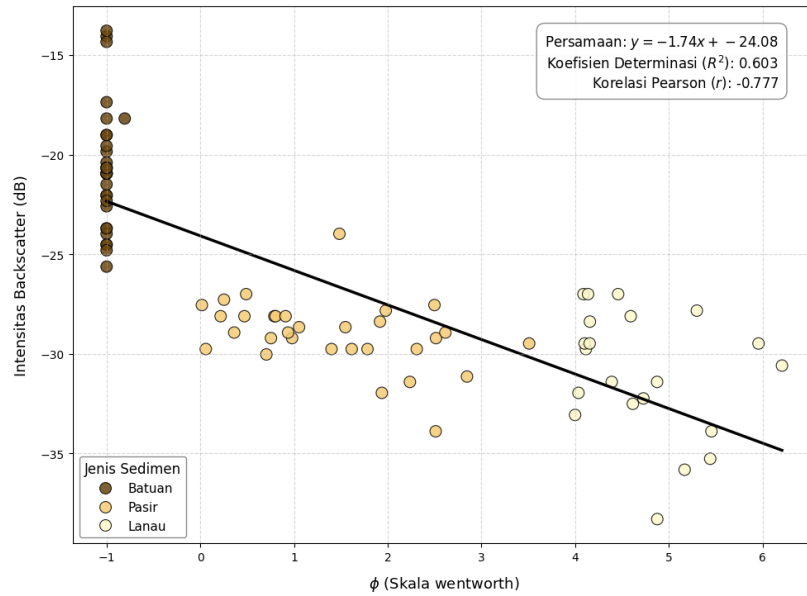
Validasi hasil klasifikasi sedimen dilakukan dengan membandingkan hasil klasifikasi ARA terhadap data foto sedimen lapangan menggunakan *Confusion Matrix* yang disajikan pada Tabel 4.1. Hasil evaluasi menunjukkan nilai *Overall Accuracy* sebesar 0,867 dan nilai *Cohen's Kappa* sebesar 0,444.

Tabel 4.1 Hasil Uji Validasi Sedimen

n = 30		Prediksi		
		Batuan	Pasir	Total
Aktual	Batuan	24	0	24
	Pasir	4	2	6
	Total	28	2	30
Overall Accuracy				0.8667
Cohen's Kappa				0.4444

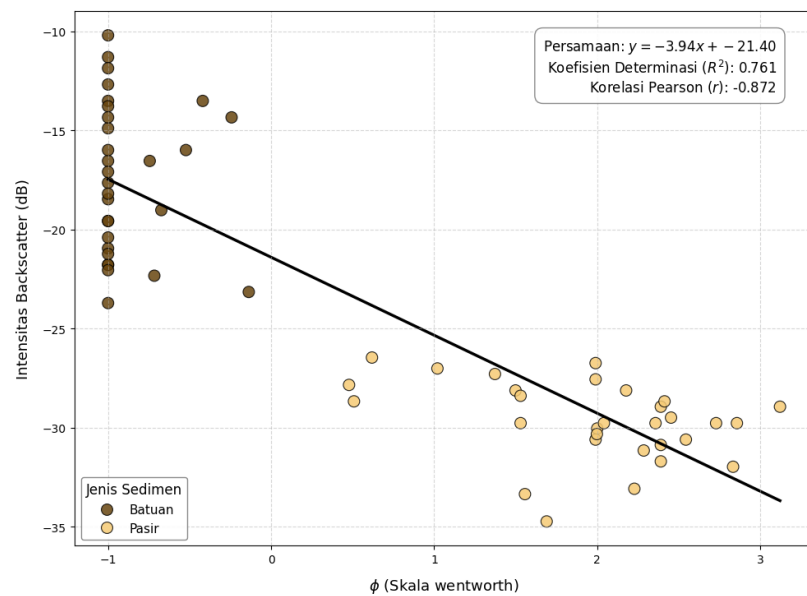
4.1.6 Korelasi Intensitas *Backscatter* dengan Jenis Sedimen

Uji korelasi dilakukan untuk mengetahui hubungan antara intensitas *backscatter* dengan ukuran butir sedimen yang direpresentasikan oleh nilai phi dalam skala wentworth. Nilai phi yang lebih tinggi mengindikasikan butiran yang lebih halus, sedangkan nilai phi yang lebih rendah atau negatif mengindikasikan butiran yang lebih kasar. Hasil uji korelasi menggunakan regresi linier dan korelasi *pearson* dapat dilihat pada Gambar 4.19 untuk area semburan.



Gambar 4.19 Korelasi Jenis Sedimen dengan Intensitas *Backscatter* pada Area Semburan

Hasil uji korelasi pada area non-sembruan dapat dilihat pada Gambar 4.20.



Gambar 4.20 Korelasi Jenis Sedimen dengan Intensitas *Backscatter* pada Area Non-Semburan

4.2 Pembahasan

4.2.1 Karakteristik Morfologi

Analisis parameter kuantitatif morfologi merupakan langkah penting untuk memahami karakteristik bentang dasar laut secara terukur dan objektif. Dalam penelitian ini, beberapa turunan DEM yang diolah dari data batimetri MBES, yaitu *slope*, *aspect*, *curvature*, *Convergence Index* (CI), dan *rugosity*, digunakan sebagai parameter kuantitatif untuk membandingkan kondisi morfologi antara area semburan dan non-sembruan. Rekapitulasi perbandingan nilai parameter tersebut disajikan pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Perbandingan Parameter Kuantitatif Morfologi

Parameter Morfologi	Area Semburan	Area Non-Semburan
Rentang Kedalaman	58 m s.d. 2318 m	1854 m s.d. 3528 m
<i>Slope</i>	0° – >45°	0° – <35°
<i>Aspect</i> (Dominasi)	Dominan ke arah Barat	Merata ke segala arah
<i>Curvature</i>	-0,49 hingga 0,42	-0,015 hingga 0,015
<i>Convergence Index</i>	-87,8 hingga 91,61	-92,27 hingga 96,38
<i>Rugosity</i>	0 – 0,3	0 – 0,05

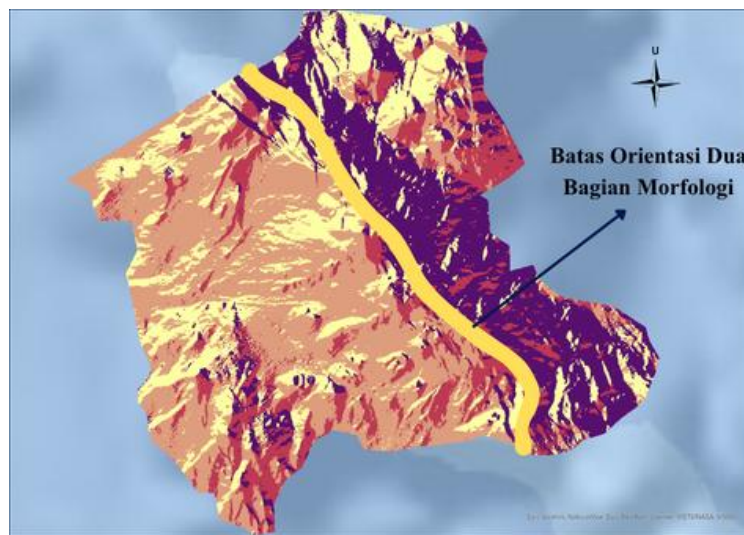
Berdasarkan Tabel 4.1, kedua area memiliki rentang kedalaman yang berbeda. Area semburan berada pada kedalaman 58 m hingga 2318 m, sedangkan area non-sembrun berada dalam rentang 1854 m hingga 3528 m. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa area non-sembrun secara umum terletak di laut yang lebih dalam, yang turut mempengaruhi karakteristik morfologi dan kondisi sedimen di masing-masing area. Selain kedalaman, terdapat pula perbedaan signifikan pada beberapa parameter morfologi lainnya yang secara kuantitatif mencerminkan perbedaan karakteristik bentuk dasar laut antara kedua area tersebut.

Nilai *slope* pada kedua area juga memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Area semburan memiliki rentang kemiringan dari 0° hingga lebih dari 45°, sementara pada area non-sembrun memiliki rentang 0° hingga kurang dari 35°. Jika dilihat pada Gambar 4.3, bagian barat area semburan didominasi oleh struktur yang memanjang secara linier seperti punggung, sehingga hal tersebut yang menyebabkan adanya perubahan elevasi yang tinggi. Sementara pada bagian timur area semburan perubahan elevasi tidak seperti pada bagian barat. Perubahan elevasi pada bagian barat cukup landai sehingga membentuk lereng yang tidak begitu terjal. Perbedaan perubahan kelerengan pada kedua sisi dapat menyebabkan perbedaan sebaran sedimen pada kedua sisi karena distribusi kelerengan berperan dalam mengendalikan pola arus dasar laut (*bottom current*) dan transportasi sedimen di sekitar aktivitas vulkanik (Palomino dkk., 2016).

Sedangkan pada Gambar 4.4, area non-sembrun didominasi oleh nilai kurang dari 5° yang tergolong rendah di sebagian besar area non-sembrun. Sedangkan zona yang memiliki perubahan nilai kelerengan yang signifikan hanya berada pada beberapa area yang berkorelasi dengan fitur struktural vulkanik. Perbedaan *slope* antara area semburan dengan non-sembrun dapat disebabkan oleh garis patahan akibat aktivitas tektonik yang dapat membentuk struktur vulkanik dengan punggung yang terjal. Zona kelerengan rendah pada area non-sembrun berkorelasi dengan nilai *curvature* negatif dan *rugosity* yang konsisten rendah, keduanya mencerminkan permukaan yang tertutupi sedimen. Seperti pada Peta Batimetri, pada Peta *Slope* menunjukkan lereng terjal yang membentuk lingkaran yang mengindikasikan bahwa pada area non-sembrun tetap memiliki struktur vulkanik. Selain itu, distribusi *slope* yang lebih homogen pada area non-sembrun juga berperan dalam menentukan pola transportasi sedimen (Xu dkk., 2025). Pola transportasi

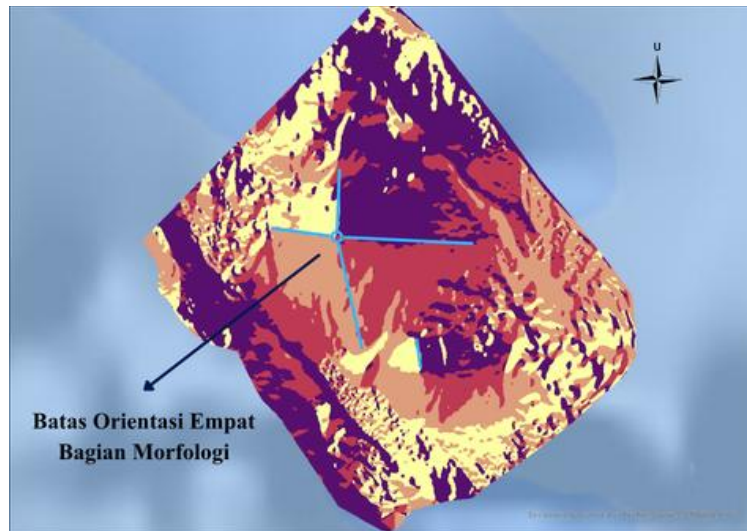
sedimen ini selanjutnya akan menentukan distribusi aspect dan pola *convergence index* yang mencerminkan arah preferensial pergerakan material di area non-sembruran.

Parameter *aspect* juga menunjukkan perbedaan yang juga cukup mencolok. *Aspect* erat berhubungan dengan *slope*, yaitu orientasi suatu fitur bergantung dengan nilai kemiringan. Semakin tinggi nilai perubahan elevasi atau kelerengan maka dapat merepresentasikan kemana arah fitur tersebut menghadap. *Aspect* pada area semburan memperlihatkan bahwa orientasi lereng didominasi menghadap barat daya yang ditunjukkan oleh warna merah muda. Namun, berdasarkan nilai kelerengan pada Peta *Slope*, arah lereng atau fitur utama dari area semburan menghadap ke arah timur laut yang ditunjukkan oleh warna ungu gelap. Batas orientasi 2 bagian lereng pada sisi timur dan barat dipisahkan oleh garis berwarna kuning sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21 Orientasi Aspect pad Area Semburan

Sedangkan pada area non-sembruran, distribusi *aspect* memperlihatkan pola yang secara keseluruhan lebih merata dibandingkan area semburan. Namun, pada fitur yang memiliki nilai kelerengan yang tinggi arah *aspect* memiliki pola radial dan membentuk kerucut yang dapat dilihat juga pada Gambar 4.22. Hal tersebut mengindikasikan pada area non-sembruran terdapat struktur vulkanik yang mempengaruhi nilai kelerengan serta distribusi orientasi lereng di sekitarnya. Selain itu, visualisasi pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.22 terdapat pola garis lurus dan parallel pada area non-sembruran, terutama pada area dengan nilai *slope* yang sangat rendah (mendekati 0°). Garis-garis ini bukan merupakan representasi fitur geomorfologi nyata, melainkan merupakan artefak komputasional yang muncul akibat keterbatasan perhitungan aspect pada area mendekati-datar.



Gambar 4.22 Orientasi Aspect pada Area Non-Semburan

Secara matematis, nilai aspect dihitung menggunakan Persamaan 3.4. Pada zona dengan *slope* mendekati nol, kedua komponen gradien (dz/dx dan dz/dy) memiliki nilai yang sangat kecil dan mendekati ambang batas presisi numerik *floating-point* dari perangkat lunak SAGA GIS. Ketika kedua nilai gradien mendekati nol, fungsi atan2 menjadi sangat sensitif terhadap variasi kecil yang berasal dari *noise* pada data DEM, resolusi piksel, atau perbedaan nilai elevasi antar-grid yang sangat minimal. Akibatnya, piksel-piksel yang secara geomorfologi sesungguhnya mendekati datar dapat menghasilkan nilai *aspect* yang bervariasi secara tidak beraturan atau justru menampilkan pola linier. Oleh karena itu, dalam interpretasi peta *aspect* penelitian ini, zona dengan nilai *slope* di bawah 2° dikecualikan dari analisis orientasi lereng karena nilai *aspect* pada zona tersebut tidak dapat dianggap representatif. Interpretasi aspect difokuskan pada piksel-piksel dengan nilai slope di atas 5° di mana gradien permukaan cukup signifikan untuk menghasilkan nilai aspect yang bermakna dan dapat diinterpretasikan secara geomorfologi.

Perbedaan pada kedua area juga terdapat pada nilai *curvature* dan *rugosity*. Area semburan memiliki rentang *curvature* yang jauh lebih lebar, yaitu -0,49 hingga 0,42, dibandingkan area non-semburan yang sangat sempit (-0,015 hingga 0,015). Nilai *curvature* yang besar di area semburan menunjukkan adanya transisi kuat antara permukaan cekung (konkav) dan cembung (konveks) yang menggambarkan kondisi morfologi yang kompleks. Sebaliknya, nilai *curvature* yang sangat kecil di area non-semburan mencerminkan permukaan dasar laut yang bertransisi gradual dan mulus. Parameter *rugosity* turut memperkuat temuan ini; nilai maksimum *rugosity* di area semburan mencapai 0,3, sedangkan di area non-semburan hanya 0,05. Nilai *rugosity* yang tinggi mengindikasikan permukaan yang kasar dan kompleks secara tiga dimensi, sedangkan nilai yang rendah mencerminkan permukaan yang lebih halus dan teratur.

Sementara itu, parameter *Convergence Index* (CI) pada kedua area menunjukkan rentang yang cukup serupa, yaitu area semburan -87,8 hingga 91,61 dan area non-semburan -92,27 hingga 96,38. Zona CI positif berwarna merah yang teridentifikasi membentuk pola jaringan yang berfungsi sebagai jalur transportasi material sedimen. Distribusi tersebut dapat dilihat juga pada pola *aspect* yang dominan di kedua area, di

mana puncak sebagai titik divergen tertinggi mengalirkan material ke berbagai arah lereng, dengan preferensi ke arah timur mengikuti gradien *slope* terbesar.

4.2.2 Struktur dan Fitur Bawah Laut

Morfologi bawah laut merupakan permukaan bumi di bagian dasar laut yang merepresentasikan bentuk fitur atau objek yang berada di bawah laut yang terbentuk dari proses geologi seperti tektonik, erosi, sedimentasi, serta pergerakan lempeng (Wormald dkk., 2012). Setiap morfologi bawah laut memiliki struktur yang mencirikan fitur bawah laut tersebut. Dalam penelitian ini *Bathymetry Position Index* (BPI) digunakan untuk melakukan klasifikasi struktur morfologi yang membentuk fitur bawah laut di area asemburan dan area non-semburan. Nilai BPI positif mengindikasikan posisi topografis tinggi relatif terhadap sekitarnya, nilai negatif mengindikasikan posisi rendah relatif, dan nilai mendekati nol mengindikasikan permukaan planar atau lereng tengah yang netral.

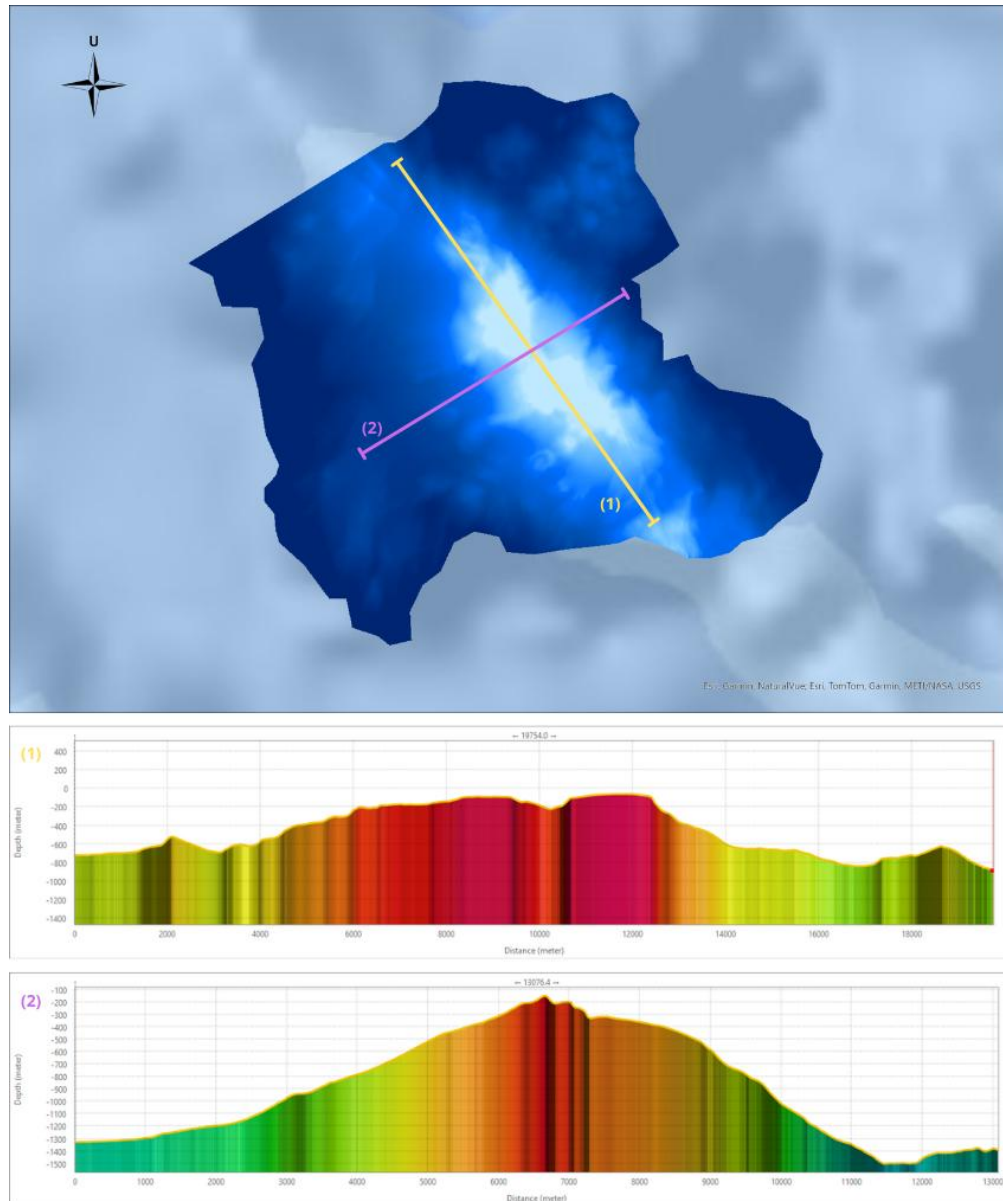
Keunggulan BPI dalam karakterisasi morfologi dasar laut adalah memiliki dua skala analisis yang komplementer secara simultan. *broad-scale* (skala luas) dihitung menggunakan radius analisis yang besar, sebaliknya BPI *fine-scale* (skala kecil) menggunakan radius analisis yang sempit untuk mengidentifikasi fitur-fitur seperti *channel*, punggung kecil, *pockmark*, dan sebagainya (Walbridge dkk., 2018). Radius analisis dalam *fine* dan *broad scale* pada BPI terbagi lagi menjadi dua, yaitu *outer radius* dan *inner radius* yang akan dikalikan dengan ukuran piksel dalam data raster DEM batimetri. *Outer radius* adalah batas maksimum jendela pencarian sel yang berada dalam jarak kurang dari sama dengan *outer radius* yang telah diatur, sementara *inner radius* adalah batas minimum jendela pencarian sel yang berada dalam lebih dari sama dengan *inner radius* yang telah diatur. Jadi BPI akan menghitung rata-rata pada area yang berada dalam rentang *inner* dan *outer radius*. Dalam penelitian ini nilai radius pada *broad* dan *fine scale* berbeda, pada *broad-scale* nilai *outer radius* adalah 5 dan *inner radius* adalah 1. Sementara pada *fine-scale* nilai *outer radius* adalah 10 dan *inner radius* adalah 2. Pemilihan nilai radius mempertimbangkan fitur-fitur kecil yang terdapat dalam lokasi penelitian, radius analisis yang terlalu kecil akan menghasilkan BPI yang mendominasi fitur *noise* batimetri, sementara radius yang terlalu besar akan mengaburkan fitur kecil yang relevan secara geomorfologis.

A. Area Semburan

Peta Klasifikasi Struktur Morfologi pada area semburan yang ditunjukkan dalam Gambar 4.13 memperlihatkan distribusi 9 kelas struktur yang membentuk fitur bawah laut di area semburan. Berdasarkan hasil klasifikasi menggunakan BPI, area semburan didominasi oleh 3 kelas struktur morfologi. Kelas pertama adalah *Open Slopes* yang mengisi Sebagian besar area semburan. Kedua adalah kelas *Narrow Crest* yang membentuk jaringan linier di sekitar puncak fitur utama pada area tersebut. Ketiga adalah kelas *Narrow Depression* secara berdampingan dengan kelas *Narrow Crest* yang membentuk pasangan morfologi puncak-lembah yang berulang. Kehadiran *Narrow Crest* dan *Narrow Depression* secara berdampingan merupakan indikator kuat adanya tekstur permukaan dasar laut yang sangat kasar (*high roughness*), yang pada umumnya berkaitan erat dengan aktivitas tektonik, vulkanik, maupun proses migrasi fluida seperti semburan gas dari bawah permukaan.

Berdasarkan interpretasi antara Peta Klasifikasi Struktur Morfologi (Gambar 4.13), garis profil batimetri dan model tiga dimensi, beberapa fitur morfologi dasar

laut teridentifikasi di area semburan. Namun, perlu ditekankan bahwa interpretasi ini bersifat dugaan dan belum dapat dikonfirmasi secara definitif tanpa data geologi dan geofisika pendukung yang lebih rinci. Fitur morfologi utama yang teridentifikasi pada area semburan adalah *Submarine Ridge*. Berdasarkan model tiga dimensi (Gambar 4.24) serta profil batimetri (1) dan (2) pada Gambar 4.23, area semburan secara jelas dicirikan oleh adanya struktur penonjolan dasar laut yang masif dan dominan.

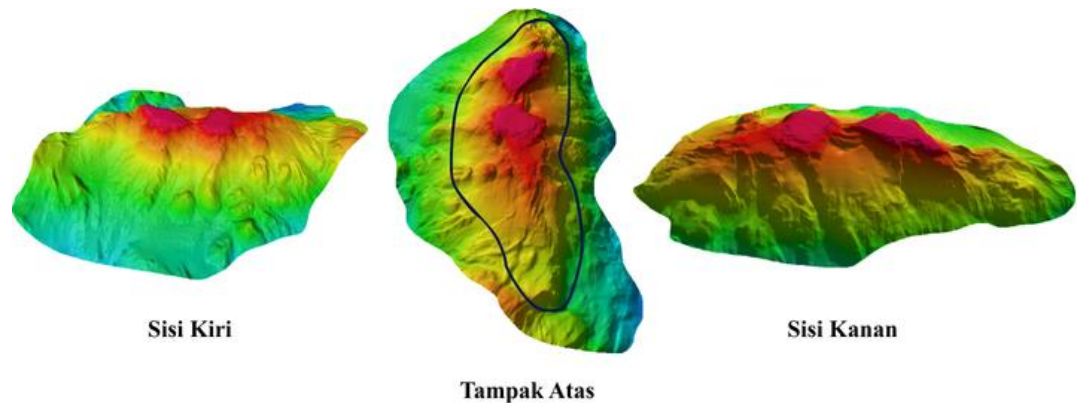


Gambar 4.23 Garis Profil Pada Area Semburan

Selain itu, Identifikasi tersebut juga didukung oleh ketiga sumber data yang diintegrasikan. Pertama, dari sisi parameter kuantitatif, nilai *slope* yang mencapai lebih dari 45° mengindikasikan adanya sisi-sisi yang sangat curam, jauh melampaui batas minimum $>5^\circ$ yang dipersyaratkan GEBCO untuk *ridge*. Nilai *rugosity* yang tinggi (hingga 0,3) menunjukkan permukaan yang kasar dan tidak teratur, yang khas dari fitur tektonik aktif. Rentang *curvature* yang lebar (-0,49 hingga 0,42) mencerminkan adanya transisi tajam antara puncak cembung dan lembah cekung

dalam jarak pendek, konsisten dengan topografi punggung yang berulang. Dominasi *aspect* ke arah Barat juga mengonfirmasi orientasi struktural yang terarah, bukan simetris, dimana hal itu merupakan ciri khas dari *ridge*.

Kedua, dari sisi klasifikasi struktur morfologi, area semburan didominasi oleh kelas *Narrow Crest* dan *Open Slopes* yang ditunjukkan oleh Gambar 4.13. Kelas *Narrow Crest* secara langsung merepresentasikan puncak-puncak sempit yang memanjang. Sementara itu, kelas *Open Slopes* yang mendominasi bagian lainnya menunjukkan lereng terbuka yang luas di sisi-sisi punggung. Ketiga, visualisasi model 3D pada Gambar 4.24 secara visual memperlihatkan bentuk fitur yang jelas memanjang dengan rasio panjang terhadap lebar yang jauh melebihi 3:1, sesuai dengan syarat utama GEBCO untuk *ridge*. Selain itu, fitur utama pada area semburan adalah *Submarine Ridge* karena tidak ditemukan adanya cekungan yang membentuk kawah pada titik tertinggi atau puncak dari fitur tersebut, melainkan punggung-punggung memanjang yang berkesinambungan.

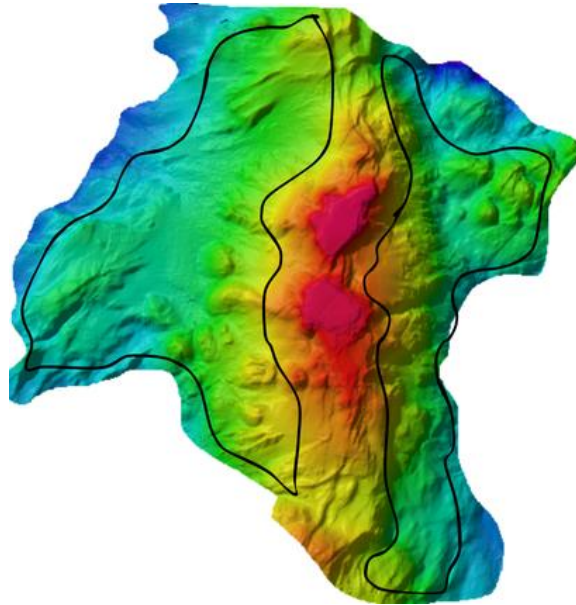


Gambar 4.24 Visualisasi 3D *Submarine Ridge*

Berdasarkan bukti dari ketiga sumber data di atas, fitur utama di area semburan bukan *Seamount* karena *Seamount* mensyaratkan bentuk yang ekuidimensional dengan rasio panjang:lebar tidak melebihi 3:1, sedangkan fitur di area semburan jelas memanjang. Fitur ini juga bukan *Guyot*, karena *Guyot* mensyaratkan puncak yang sangat datar dengan kemiringan $<2^\circ$ dan luasan lebih dari 10 km², sementara BPI menunjukkan dominasi *Narrow Crest* yang mencerminkan puncak tajam dan sempit, dimana hal tersebut bertolak belakang dengan puncak datar *Guyot*. Secara geologi, keberadaan semburan gas (*gas seep*) di area ini juga berhubungan dengan lingkungan tektonik aktif yang sering ditemui membentuk punggung memanjang, bukan fitur vulkanik simetris.

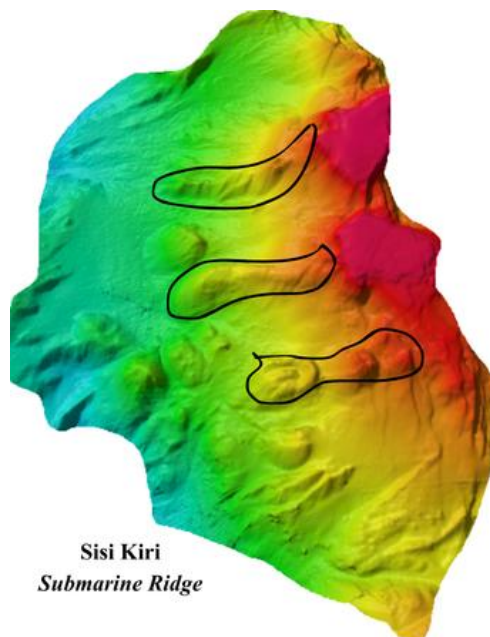
Selain *ridge* sebagai fitur utama, kelas *Open Slopes* yang sangat dominan pada Peta Klasifikasi Struktur Morfologi mengkonfirmasi bahwa sebagian besar permukaan di area semburan sebagai fitur *Slope* (lereng). *Slope* didefinisikan sebagai kawasan miring yang menghubungkan fitur elevasi dengan dasar yang lebih rendah, dengan kemiringan umumnya lebih dari 2° . Gambar 4.25 memperlihatkan lereng-lereng dengan tekstur permukaan yang kasar dan bergelombang tidak beraturan. Lereng-lereng ini diduga merupakan *flanking slope* (lereng samping) dari *Submarine Ridge* yang membentuk badan utama area semburan. Dominasi nilai *slope* di area semburan yang lebih dari 2° secara kuantitatif mengonfirmasi keberadaan fitur *Slope* di area semburan. Selain itu, Nilai CI yang sebagian negatif

juga menandai zona-zona divergensi di lereng, di mana aliran sedimen cenderung menyebar ke bawah menuruni lereng.



Gambar 4.25 Visualisasi 3D *Slope*

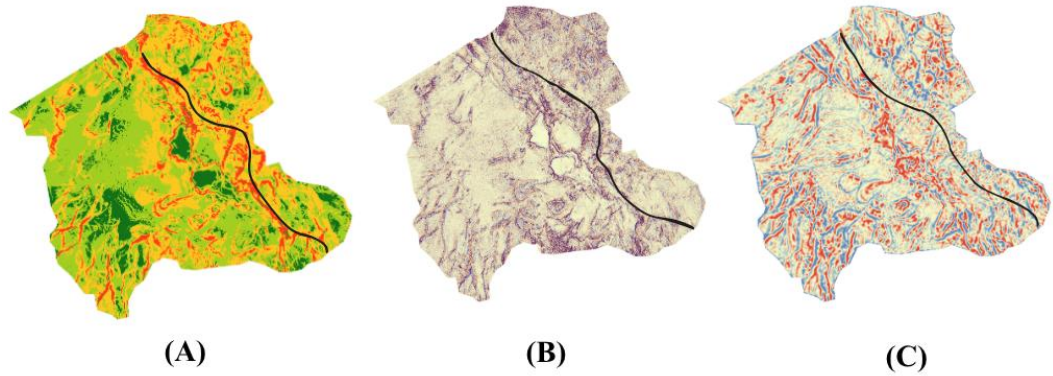
Fitur ke-3 yang teridentifikasi pada area semburan adalah *Spur*. Gambar 4.26 memperlihatkan adanya beberapa tonjolan lateral yang menjulur dari *Slope* pada sisi kiri atau barat *submarine ridge*, yang dapat diinterpretasikan sebagai *Spur*. *Spur* merupakan fitur berupa tanjung atau lidah batuan yang menonjol keluar dari tubuh utama gunung bawah laut. Pada Peta Klasifikasi Struktur, *Spur* dicirikan oleh jalur *Lateral Midslope Crest* yang memanjang ke arah bawah lereng dari zona *Narrow Crest* di bagian atas.



Sisi Kiri
Submarine Ridge

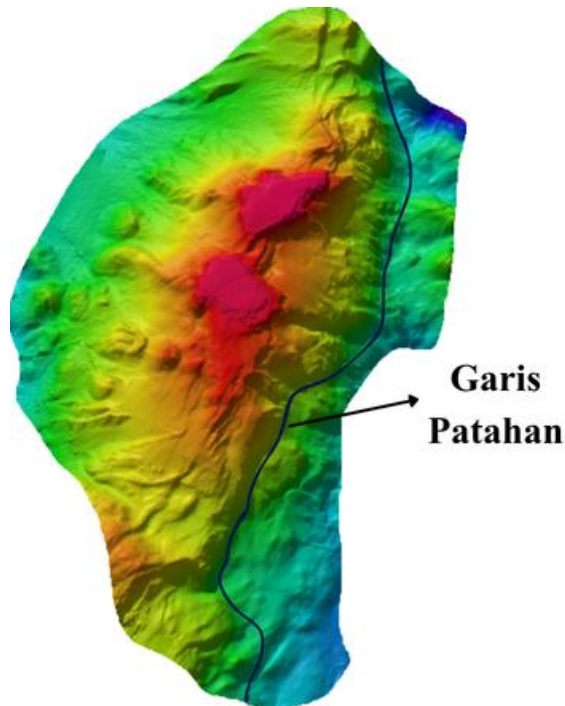
Gambar 4.26 Visualisasi 3D *Spur*

Keberadaan aktivitas semburan gas yang terkonsentrasi di area ini merupakan indikasi kuat adanya Zona Patahan atau *Fracture Zone*. Pola *Narrow Crest* dan *Narrow Depression* yang membentuk jalur-jalur linear dan relatif lurus di beberapa bagian area semburan mengindikasikan kemungkinan adanya zona patahan. Secara morfologi, zona patahan biasanya dicirikan dengan zona panjang (linier) dan ditandai dengan punggung atau tebing curam dengan topografi tidak beraturan yang asimetris pada kedua sisinya (Stagpoole & Mackay, 2021). Hal tersebut juga didukung dengan beberapa parameter kuantitatif, seperti nilai kelerengan yang didominasi oleh nilai 20° hingga lebih dari 45° dan pola *curvature* dan CI yang membentuk pola linier yang ditunjukkan pada Gambar 4.27.



Gambar 4. 27 Pola Patahan Pada *Slope* (A), *Curvature* (B), dan CI (C)

Keberadaan zona patahan pada Gambar 4.28 sangat relevan dari perspektif geologi karena zona patahan berfungsi sebagai jalur keluarnya gas dari reservoir bawah permukaan menuju dasar laut sehingga hal tersebut dapat menjelaskan mengapa semburan gas ditemukan di area ini.

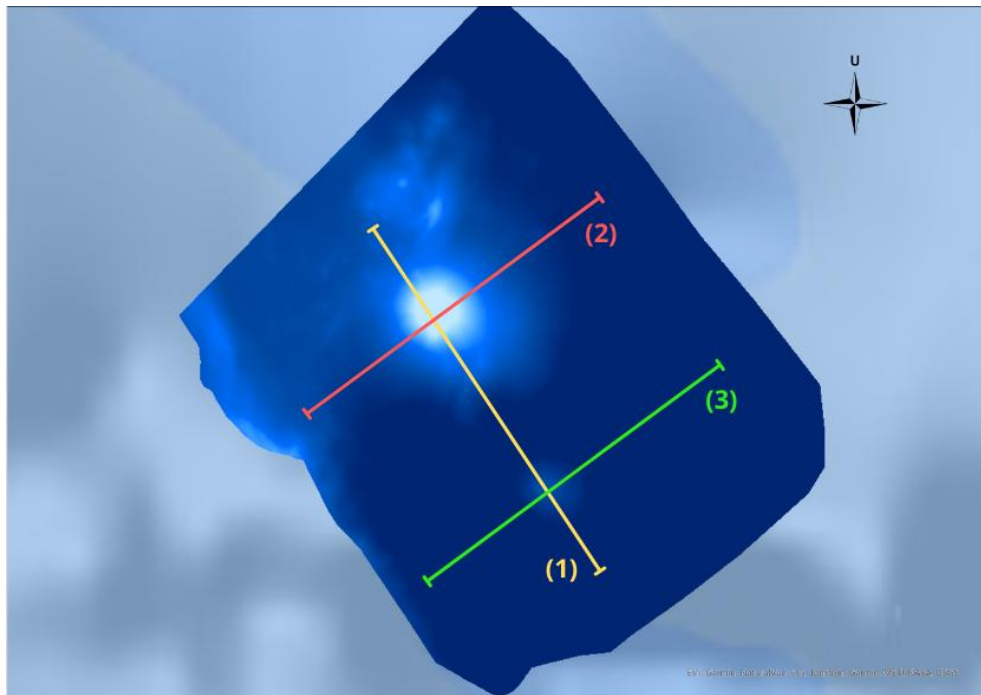


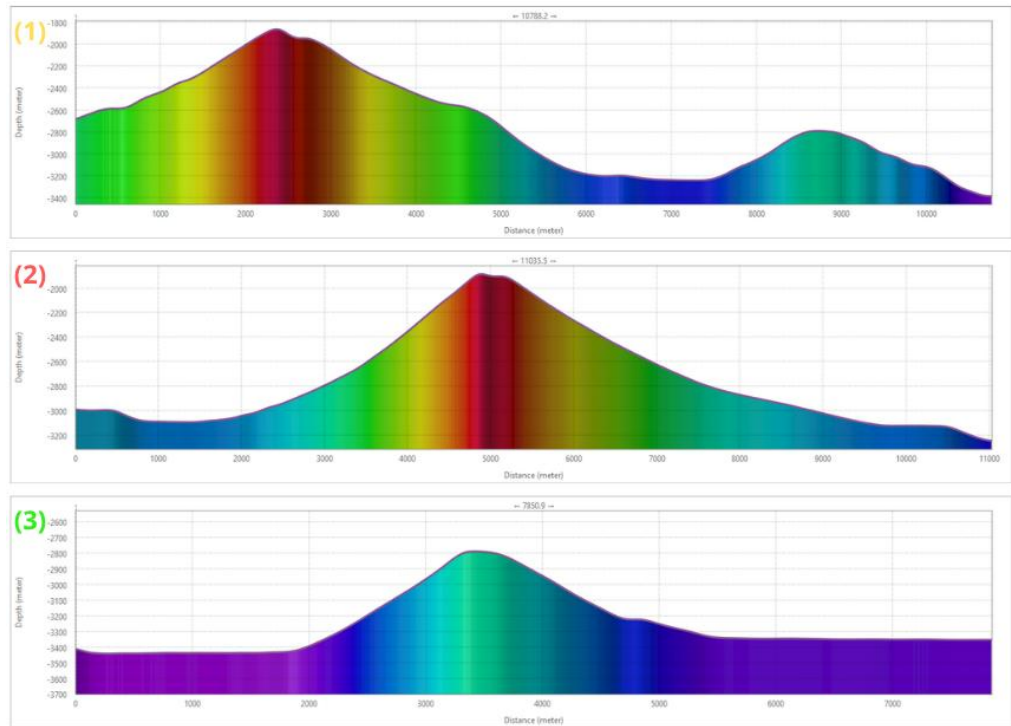
Gambar 4.28 Visualisasi 3D Segmen Patahan

B. Area Non-Semburan

Area non-semburan memperlihatkan karakteristik morfologi yang secara keseluruhan berbeda secara mencolok dari area semburan sebagaimana tampak pada Gambar 4.21. Fitur yang paling dominan pada Peta Klasifikasi Struktur Morfologi pada area non-semburan adalah luasnya hamparan kelas *Broad Flat*, terutama di bagian timur dan tenggara area. *Broad Flat* mendominasi hampir separuh dari luasan area non-semburan, hal tersebut mengindikasikan adanya bidang dasar laut yang sangat luas dan datar. Kondisi ini mencerminkan lingkungan pengendapan yang relatif tenang dan stabil tanpa gangguan aktivitas tektonik. Sedangkan, pada bagian barat dan tengah area, kelas *Open Slopes* hadir secara signifikan dan mencirikan zona transisi dari topografi yang lebih tinggi ke arah dataran luas di sebelah timurnya. Kelas *Narrow Crest* dan *Narrow Depression* juga hadir di area non-semburan, namun dengan intensitas yang jauh lebih rendah dibandingkan area semburan dan cenderung terkonsentrasi di bagian barat-tengah area yang memiliki relief lebih tinggi.

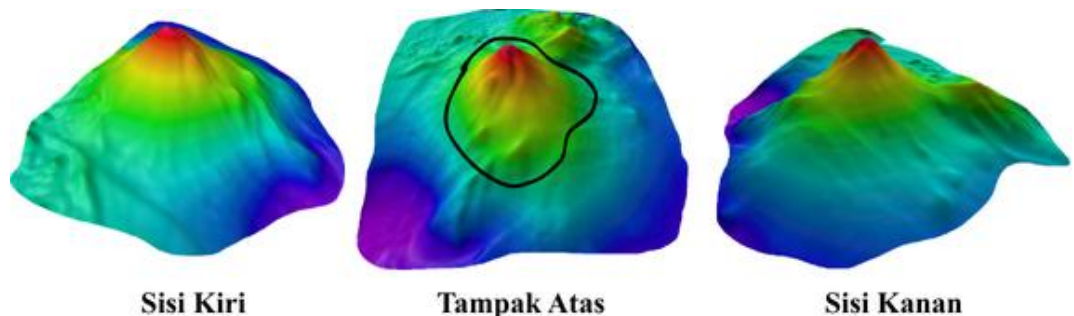
Fitur pertama pada area non-semburan adalah *Seamount*, Profil batimetri (1) pada Gambar 4.29 memperlihatkan adanya penonjolan dasar laut yang besar dengan puncak yang berada jauh lebih tinggi dari lantai laut di sekitarnya, menghasilkan relief vertikal yang sangat signifikan berkisar lebih dari 1.400 meter.





Gambar 4.29 Garis Profil Pada Area Non-Semburan

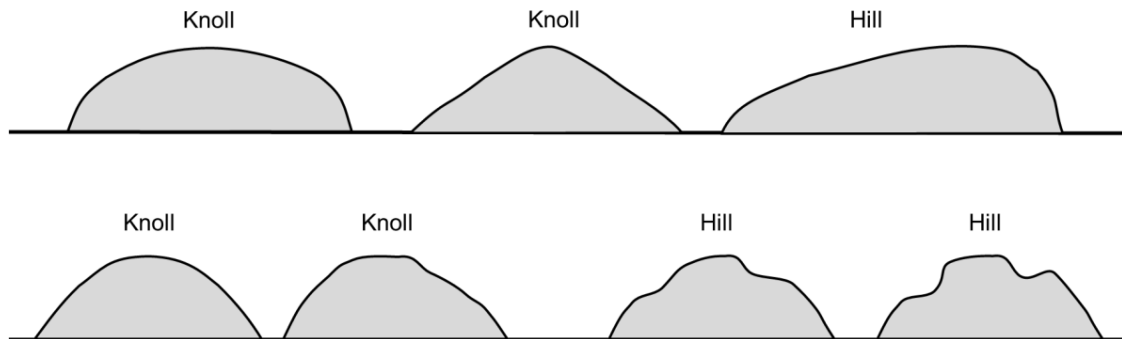
Dapat dilihat juga pada Gambar 4.30 yang menunjukkan lereng *Seamount* di area non-semburan tampak lebih teratur dan lebih mulus sebagaimana juga pada garis profil yang menampilkan puncak yang lebih jelas dan transisi lereng yang lebih gradual. Pada Peta Klasifikasi Struktur Morfologi, *Seamount* di area ini dicirikan oleh *Narrow Crest* dan *Open Slopes* di bagian lereng yang langsung berbatasan dengan kelas *Broad Flat* yang luas di sekitar kakinya. Sementara dari sisi parameter kuantitatif, nilai *slope* yang mencapai hampir 35° menunjukkan sisi-sisi yang curam ($>5^\circ$), memenuhi syarat GEBCO untuk *seamount*. Selain itu, distribusi *aspect* yang merata ke segala arah secara kuantitatif membuktikan bahwa fitur ini bersifat ekuidimensional (simetris radial), yang merupakan salah satu ciri utama *seamount* menurut GEBCO.



Gambar 4.30 Visualisasi 3D *Seamount*

Di samping *Seamount* sebagai fitur utama, model 3D area non-semburan juga memperlihatkan adanya tonjolan di sekitarnya. Tonjolan tersebut dapat diidentifikasi sebagai 2 fitur yang berbeda, yaitu *Knoll* dan *Hill*. Berdasarkan GEBCO, *Knoll* dan *Hill* adalah dua bentang alam yang memiliki ketinggian kurang

dari 1000 m dan sisi-sisinya lebih curam dari 5 derajat. Perbedaan antara kedua bentang alam ini terletak pada kehalusan bentuknya (*reguler* dan *irreguler shape*). *Knoll* cenderung hampir simetris dan memiliki profil membulat atau kerucut dengan puncak yang halus, sedangkan bukit umumnya berbentuk tidak beraturan. Beberapa contoh yang menunjukkan perbedaan keduanya ditunjukkan pada Gambar 4.31.



Gambar 4.31 Perbedaan *Knoll* dan *Hill*

(Stagpoole & Mackay, 2021)

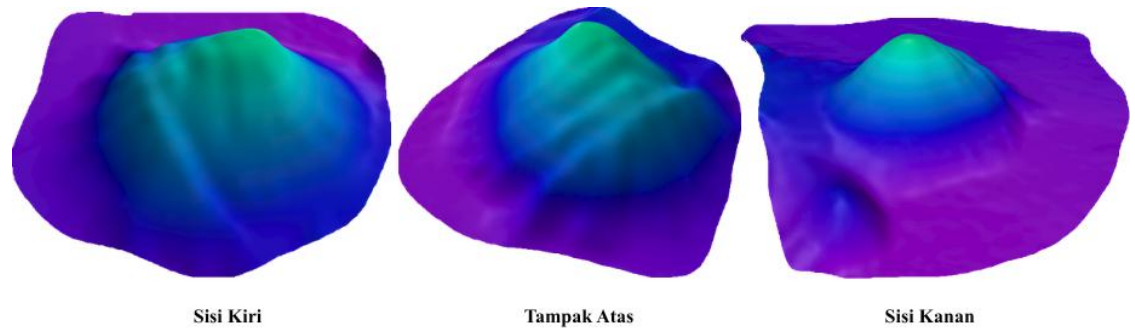
Perbedaan antara *Knoll* dan *Hill* sering membuat kesalahan interpretasi. Oleh karena itu, Tabel 4.3 berikut disusun untuk merangkum perbedaan keduanya berdasarkan yang didefinisikan oleh GEBCO.

Tabel 4.3 Perbedaan *Knoll* dan *Hill*

Kriteria	KNOLL	HILL
Tinggi	<1000 m di atas relief sekitarnya	<1000 m di atas relief sekitarnya
Bentuk	Hampir simetris, profil membulat atau kerucut membentuk <i>regular shape</i>	Bentuk tidak beraturan (<i>irregular shape</i>)
Kemiringan Sisi	>5 derajat	>5 derajat
Panjang:Lebar	Hingga 3:1	Hingga 3:1
Tekstur Permukaan	Halus dan memiliki nilai <i>rugosity</i> rendah	Kasar dan nilai <i>rugosity</i> lebih tinggi

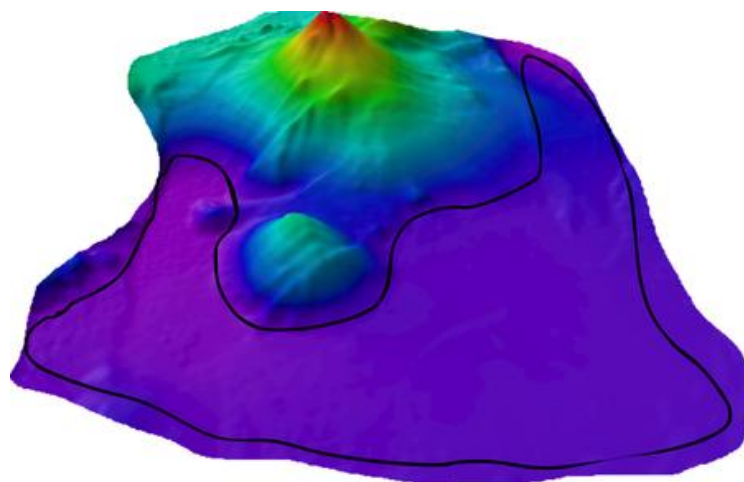
Berdasarkan Tabel 4.3, perbedaan mendasar antara *Knoll* dan *Hill* terletak pada kehalusan dan simetri profil. *Knoll* mensyaratkan profil yang membulat atau kerucut dengan permukaan yang halus dan hampir simetris, sementara *Hill* memiliki bentuk yang tidak beraturan (*irregular*). Mengacu pada parameter kuantitatif, tonjolan ini memiliki perubahan elevasi dari dasar ke puncak dari fitur

tersebut adalah sekitar 31° , sehingga tonjolan ini masuk dalam kriteria dua fitur tersebut. Berdasarkan garis profil 3 pada Gambar 4.28, ketinggian dari tonjolan tersebut sekitar 575 m dari permukaan di sekitarnya. Selain itu, tonjolan ini memiliki profil yang halus dan membulat secara regular yang dapat dilihat dengan garis kontur pada Gambar 4.2. Keseluruhan karakter kuantitatif ini jauh lebih mendekati definisi *Knoll* dibandingkan *Hill*. Visualisasi fitur tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.32.



Gambar 4. 32 Visualisasi Model 3D *Knoll*

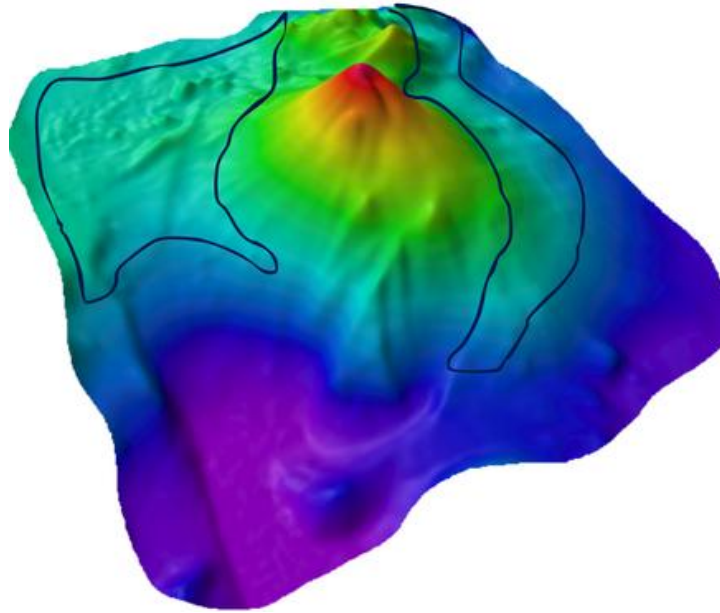
Selanjutnya, dominasi kelas *Broad Flat* di bagian timur hingga tenggara area non-semburan yang berada di kedalaman yang mencapai -3.300 hingga -3.450 meter serta permukaan dasar laut yang sangat datar pada model tiga dimensi (Gambar 4.33), mengkonfirmasi keberadaan Abysall Plain (Dataran Abisal) di area ini. Dataran Abisal merupakan salah satu fitur morfologi bawah laut terluas dan terdatar di muka bumi, terbentuk dari akumulasi sedimen pelagis dan turbidit yang mengisi dan meratakan depresi-depresi besar di lantai samudra (Stagpoole & Mackay, 2021). Karakteristik *Broad Flat* pada skema Lunblad sangat konsisten dengan kondisi dataran abisal yang memiliki nilai kemiringan lereng yang sangat kecil. Fitur ini memiliki nilai kerengan kurang dari 5° dan tidak memiliki pola pada *curvature* yang dapat dilihat pada Gambar 4.8, dimana hal tersebut semakin mendukung bahwa dataran yang landai adalah Dataran Abisal.



Gambar 4.33 Visualisasi Model 3D *Abysall Plain*

Di sekitar kaki *seamount*, Gambar 4.34 memperlihatkan zona lereng yang lebih landai sebelum bertemu dengan dasar laut yang lebih datar. Zona ini berpotensi diklasifikasikan sebagai Apron. Pada zona tersebut memiliki nilai kelerengan

kurang dari 5° . Selain itu, pada Peta Klasifikasi Struktur Morfologi zona ini terekspresikan sebagai perubahan gradual dari kelas *Open Slopes* menuju *Broad Flat* tanpa batas yang tegas. Menurut GEBCO, Apron merupakan lereng dengan kemiringan rendah dan permukaan yang relatif mulus yang umumnya mengelilingi *seamount*. Secara kuantitatif, nilai *curvature* yang cenderung mendekati nol atau sedikit positif di zona ini mengindikasikan transisi dari lereng curam ke landai, konsisten dengan karakter *apron*. Fitur ini juga merupakan lokasi yang potensial sebagai area akumulasi sedimen yang mengalir dari lereng *seamount* di atasnya.



Gambar 4.34 Visualisasi Model 3D *Apron*

4.2.3 Variasi *Backscatter* dan Sebaran Sedimen

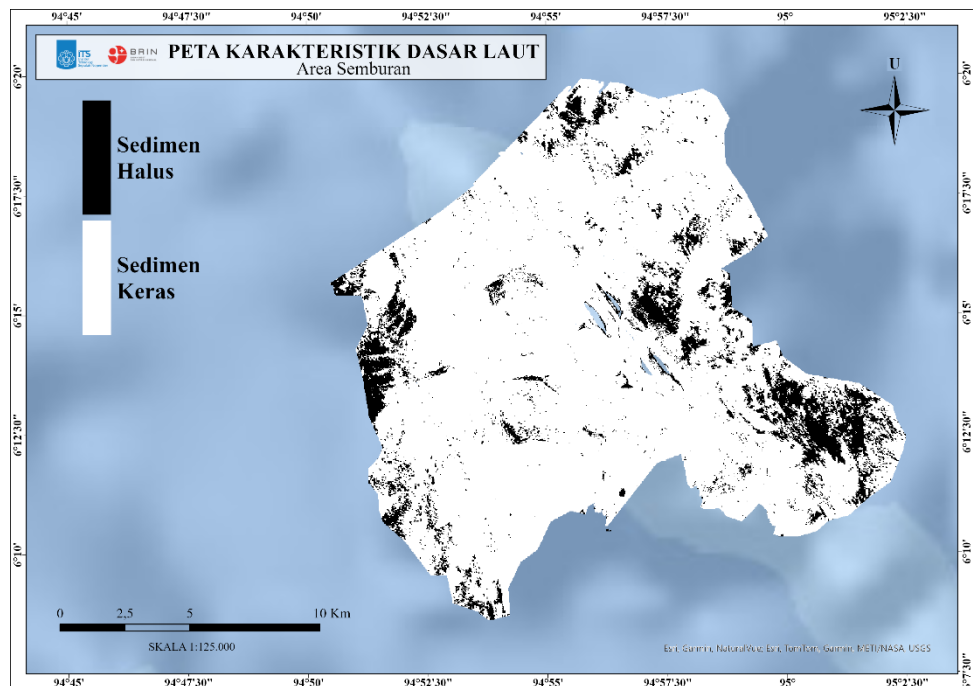
Analisis variasi *backscatter* merupakan salah satu tujuan dalam penelitian ini untuk memahami karakteristik akustik dasar laut dan menghubungkannya dengan jenis sedimen yang ada. Intensitas *backscatter* yang direkam oleh MBES mencerminkan besarnya energi akustik yang dipantulkan kembali ke transduser dari dasar laut, yang dipengaruhi oleh sifat fisik sedimen seperti kekerasan, kekasaran permukaan, ukuran butir, dan kandungan gas. Untuk mengidentifikasi sebaran jenis sedimen secara spasial, dilakukan penetapan *threshold* intensitas *backscatter* berdasarkan batas nilai yang membedakan sedimen kasar dan sedimen halus. Perlu dicatat bahwa *threshold* ini hanya mampu memisahkan dua kategori secara umum, yaitu sedimen kasar dan sedimen halus. Dalam penelitian ini, penetapan *threshold* tidak dapat membedakan secara spesifik antara pasir, lanau, dan lumpur, karena perbedaan nilai *backscatter* di antara sub-kelas tersebut yang tidak cukup kontras untuk dipisahkan secara jelas hanya dari nilai intensitas.

A. Area Semburan

Pada Peta *Backscatter* area semburan (Gambar 4.15), terdapat beberapa area yang tidak memiliki data *backscatter* dan tampak sebagai celah atau lubang (*data gap*) pada peta. Hal tersebut, dapat disebabkan oleh jarak atau gap antara dua lajur survei yang berdekatan terlalu lebar sehingga MBES tidak merekam data secara optimal. Apabila jarak antara ujung satu lintasan dan awal lintasan berikutnya tidak dirancang dengan *overlap* yang cukup, maka area tersebut tidak tertutupi oleh

rekaman dari lintasan mana pun sehingga menghasilkan celah data pada mosaik akhir. Dalam survei MBES, setiap lintasan seharusnya memiliki *overlap* lateral minimal 20% dengan lintasan di sebelahnya untuk menjamin tidak ada area yang terlewat (IHO, 2020). Apabila jarak antarlintasan terlalu lebar relatif terhadap lebar sapuan (*swath width*) MBES pada kedalaman setempat, area di antara dua lintasan tersebut tidak terliput oleh satu pun lintasan sehingga membentuk celah. Keberadaan *data gap* ini perlu dicatat sebagai salah satu keterbatasan data dalam penelitian ini, karena area tersebut tidak dapat dianalisis lebih lanjut baik dari segi intensitas *backscatter* maupun klasifikasi sedimen, sehingga interpretasi pola sebaran sedimen pada area semburan tidak dapat dilakukan secara menyeluruh untuk seluruh area semburan.

Gambar 4.15 menunjukkan variasi nilai intensitas dari -54 dB hingga -3 dB. Rentang yang lebar ini mengindikasikan keragaman kondisi fisik dasar laut yang tinggi di area semburan. Nilai *backscatter* yang tinggi merepresentasikan permukaan yang keras dan kasar seperti batuan (*Gravel*), sedangkan nilai yang rendah mengindikasikan sedimen halus yang lunak seperti pasir (*Sand*), lanau (*Silt*), dan sejenisnya. Variasi nilai yang sangat besar ini secara spasial kemungkinan berkaitan dengan keberadaan eksposur batuan dan endapan pasir di lereng, serta akumulasi sedimen halus di depresi atau cekungan antar tonjolan. Pada area semburan nilai *threshold* yang digunakan untuk memisahkan sedimen kasar dengan halus adalah -27 dB. Nilai sedimen kasar (batuan) berada pada rentang -27 dB hingga -3 dB, sedangkan sedimen halus (pasir dan lanau) berada pada rentang -54 dB hingga -27 dB. Hasil *threshold* ini divisualisasikan menjadi Peta Karakteristik Dasar Laut yang menampilkan sebaran zona sedimen kasar dan halus secara spasial yang ditunjukkan pada Gambar 4.35.



Gambar 4.35 Karakteristik Sedimen pada Area Semburan

Pada area semburan, zona sedimen halus lebih luas dan tersebar di cekungan pada fitur *Submarine Ridge*, sementara zona sedimen kasar mendominasi area

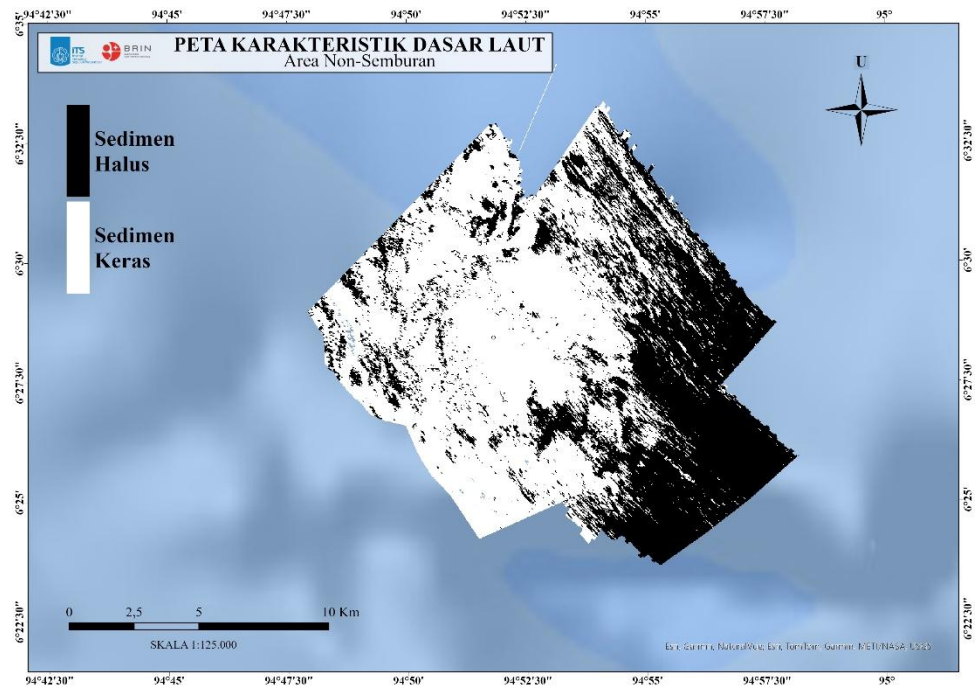
semburan pada kelas *Open slope* dan *narrow crest*. Kondisi ini menjelaskan bahwa puncak punggung cenderung memiliki karakteristik batuan keras, sementara sedimen halus mengendap di zona yang lebih terlindung. Keberadaan semburan gas di area ini juga dapat menghalangi akumulasi sedimen halus di sekitar titik semburan, sehingga dapat mengakibatkan nilai *backscatter* yang lebih tinggi di zona-zona tersebut (Liu dkk., 2019). Jika dilihat pada Gambar 4.17, memperlihatkan bahwa sebaran pasir terkonsentrasi di bagian timur hingga tenggara area, yaitu di zona lereng yang berada pada sisi timur *Submarine Ridge*. Pola sebaran ini berkaitan dengan orientasi lereng dominan di area semburan. Peta *Aspect* (Gambar 4.5) menunjukkan bahwa sisi timur *Submarine Ridge* memiliki orientasi lereng yang menghadap ke timur hingga tenggara, sehingga material sedimen yang bergerak mengikuti gradien kemiringan secara alami bergerak menuju arah tersebut. Kondisi ini diperkuat oleh pola *Convergence Index* (CI) pada area semburan (Gambar 4.9) yang menunjukkan zona CI positif membentuk jalur konvergensi di bagian tenggara lereng *Ridge*, mengindikasikan bahwa aliran material dari berbagai sisi lereng bertemu dan mengumpul di zona tersebut. Keberadaan zona konvergensi inilah yang menjadikan bagian tenggara lereng *Ridge* sebagai lokasi akumulasi pasir yang lebih dominan dibandingkan sisi barat yang didominasi eksposur batuan pada kelas *Narrow Crest* dan *Steep Slope*.

Selain itu, nilai ambang batas yang telah ditetapkan pada area semburan dapat mengonfirmasi hasil klasifikasi sedimen menggunakan metode *Angular Response Analysis* (ARA). Pada Gambar 4.17 menunjukkan bahwa ARA mengidentifikasi tiga kelas sedimen, yaitu batuan, pasir, dan lanau. Kelas batuan mendominasi sebagian besar area yang berada di bagian tengah hingga timur laut, yang ditandai dengan nilai *backscatter* tinggi pada Gambar 4.15. Dominasi batuan pada area semburan berkaitan dengan aktivitas tektonik dan semburan yang sering kali mengekspos material keras seperti batuan dasar atau fragmen-fragmen padat yang terbawa ke permukaan akibat tekanan fluida dari bawah. Sementara itu, kehadiran lanau mengindikasikan adanya zona deposisi material halus yang mungkin berasal dari material semburan yang telah mengalami pengendapan setelah tersebar di kolom air. Sementara itu, kelas pasir umumnya tersebar di zona transisi antara area batuan dan lanau, sedangkan kelas lanau berada di bagian pinggir dan cekungan di antara punggung di area tersebut. Distribusi seperti ini cukup umum dijumpai pada area yang mengalami aktivitas geologi aktif, dimana material-material dari bawah laut dapat terangkat ke permukaan dan membentuk pola sebaran sedimen yang tidak seragam (Sklar dkk., 2024).

B. Area Non-Semburan

Pada area non-semburan (Gambar 4.16), rentang nilai intensitas *backscatter* lebih sempit, yaitu -40 dB hingga -6 dB. Perbedaan batas bawah dengan area semburan menunjukkan bahwa area non-semburan tidak memiliki sedimen sehalus dan selembut yang ada di area semburan. Hal ini wajar mengingat area non-semburan didominasi oleh *seamount* dengan lereng-lereng yang cenderung mengalirkan sedimen, sehingga tidak terdapat endapan halus akibat energi arus yang lebih aktif di sekelilingnya. Di sisi lain, batas atas *backscatter* yang sedikit lebih rendah mengindikasikan bahwa batuan dengan permukaan paling keras di area non-semburan memberikan reflektivitas akustik yang sedikit lebih rendah dibandingkan batuan di area semburan. Pada area non-semburan, nilai sedimen

kasar berada pada rentang -26 dB hingga -6 dB, sedangkan sedimen halus berada pada rentang -40 dB hingga -26 dB. Hasil penetapan threshold pada area non-semburan ditunjukkan oleh Gambar 4.36.



Gambar 4.36 Karakteristik Sedimen pada Area Non-Semburan

Pada area non-semburan, sebaran sedimen kasar hanya mendominasi di sekitar *Seamount*. Sedangkan sebaran sedimen halus mendominasi pada bagian dataran kelas *Broad Flat* dengan nilai kemiringan yang rendah. Sebaran sedimen juga memiliki pola jenis sedimen yang dihasilkan oleh ARA di area non-semburan pada Gambar 4.18. ARA hanya menghasilkan dua kelas sedimen, yaitu batuan dan pasir. Pola persebaran pasir yang terkonsentrasi ke arah tenggara pada area non-semburan (Gambar 4.18) dapat dijelaskan kontrol topografi dari *Seamount*, arah gradien kemiringan lereng, dan pola arus regional. Kontrol topografi *Seamount* berperan sebagai barier fisik yang mengarahkan transpor sedimen. Lereng *Seamount* pada bagian barat dan tengah area non-semburan memiliki kemiringan tinggi (hingga $\sim 35^\circ$) dengan orientasi *aspect* yang dominan menghadap tenggara berdasarkan peta *Aspect* (Gambar 4.6). Material sedimen yang tererosi atau lepas dari permukaan lereng *Seamount* akan bergerak mengikuti gradien kemiringan, yaitu dari titik tertinggi *Seamount* menuju dataran yang lebih rendah. Arah pergerakan ini secara alami mengarah ke tenggara mengikuti orientasi lereng dominan, sehingga pasir yang berasal dari erosi lereng *Seamount* terakumulasi di zona *Broad Flat* sebelah tenggara.

Perbedaan jumlah kelas sedimen antara area semburan dan non-semburan dapat dikaitkan dengan pengaruh karakteristik morfologi dasar laut di kedua area dan adanya aktivitas semburan pada area semburan. Aktivitas semburan diduga dapat membawa material halus seperti lanau ke kolom air yang kemudian terendapkan di sekitar cekungan yang ada di area semburan, sehingga menambah keragaman jenis sedimen di area tersebut. Sedangkan di area non-semburan, pasir sebagai sedimen paling halus di area tersebut terkonsentrasi di zona *Broad Flat* atau

dataran abisal yang sangat luas di bagian tenggara, di mana tidak ada energi vulkanik aktif yang menghambat akumulasi material halus dari kolom air. Variasi intensitas *backscatter* dan sebaran jenis sedimen pada kedua area memiliki perbedaan yang signifikan, Tabel 4.4 merupakan komparasi perbedaan pada kedua area.

Tabel 4. 4 Perbandingan Intensitas *Backscatter* dan jenis Sedimen

Aspek	Area Semburan	Area Non-Semburan
Rentang Intensitas <i>Backscatter</i>	-54 dB s.d. -3 dB	-40 dB s.d. -6 dB
Nilai <i>Threshold</i>	-27 dB	-26 dB
Jenis Sedimen	Batuan, Pasir, Lanau	Batuan, Pasir

Apabila Peta Karakteristik Dasar Laut hasil dari penetapan nilai *threshold* dibandingkan dengan Peta Klasifikasi Sedimen di kedua area, terdapat perbedaan dalam jumlah kelas sedimen yang dapat diidentifikasi. *Threshold* hanya mampu membedakan dua kelas sedimen, yaitu sedimen kasar dan sedimen halus. Sedangkan, klasifikasi ARA dapat menghasilkan sedimen kasar, serta beberapa kelas sedimen halus yang teridentifikasi pada kedua area. Kelemahan *threshold* dalam memisahkan kelas sedimen halus merupakan salah satu kelemahan dalam melakukan klasifikasi sedimen jika hanya mengandalkan nilai intensitas *backscatter* saja. Nilai intensitas *backscatter* sendiri dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu impedansi akustik yang bergantung pada densitas dan kecepatan suara, yang kedua adalah kekasaran permukaan dasar laut.

Perbedaan antara kedua pendekatan dalam melakukan klasifikasi sedimen yang menutupi permukaan dasar laut di kedua area menggambarkan bahwa ARA memiliki kemampuan yang lebih baik dalam memisahkan kelas sedimen karena menggunakan informasi tambahan berupa pola respons sudut (*angular response*), bukan sekadar nilai intensitas rata-rata. Namun demikian, ARA pun memiliki batas kemampuan yang serupa ketika berhadapan dengan sedimen yang sifat akustiknya sangat mirip, terutama pada kelas sedimen halus. Oleh karena itu, dalam penelitian ini Peta Karakteristik Dasar Laut dari *threshold* digunakan untuk melengkapi analisis sebaran sedimen dari hasil klasifikasi sedimen menggunakan ARA.

Tidak hanya itu, berdasarkan hasil Peta Klasifikasi Sedimen pada kedua area (Gambar 4.17 dan Gambar 4.18) menunjukkan pola yang unik. Batas antarkelas sedimen yang terbentuk menunjukkan transisi yang tidak halus dan tidak mengikuti pola pada Peta *Backscatter*. Pola yang dihasilkan membentuk kotak-kotak lurus yang secara visual menyerupai batas-batas *swath* MBES. Seharusnya, sebaran sedimen di dasar laut memiliki transisi lebih mulus dan mengikuti pola yang dihasilkan oleh nilai intensitas *backscatter* yang menggambarkan tingkat kekerasan permukaan dasar laut. Pola yang seolah mengikuti batas *swath* ini merupakan indikasi kuat adanya artefak sistematis dalam proses klasifikasi sedimen. Salah satu dugaan untuk menjelaskan hal tersebut adalah adanya variasi nilai intensitas *backscatter* antar-*swath* pada jenis sedimen yang sama.

Dalam sistem MBES, setiap *swath* merekam data dengan geometri sudut yang berbeda bergantung pada posisi dan orientasi kapal pada saat perekaman. Apabila proses normalisasi dan koreksi geometri tidak sepenuhnya sempurna, perbedaan nilai intensitas

backscatter pada area yang seharusnya memiliki jenis sedimen yang sama dapat muncul di batas antar-*swath*. Hal tersebut, menyebabkan algoritma ARA mengklasifikasikan *swath* yang bersebelahan ke dalam kelas sedimen yang berbeda meskipun substrat dasarnya identik, sehingga menghasilkan batas klasifikasi yang memiliki pola kotak mengikuti geometri akuisisi data, bukan mengikuti pola sebaran sedimen yang sebenarnya.

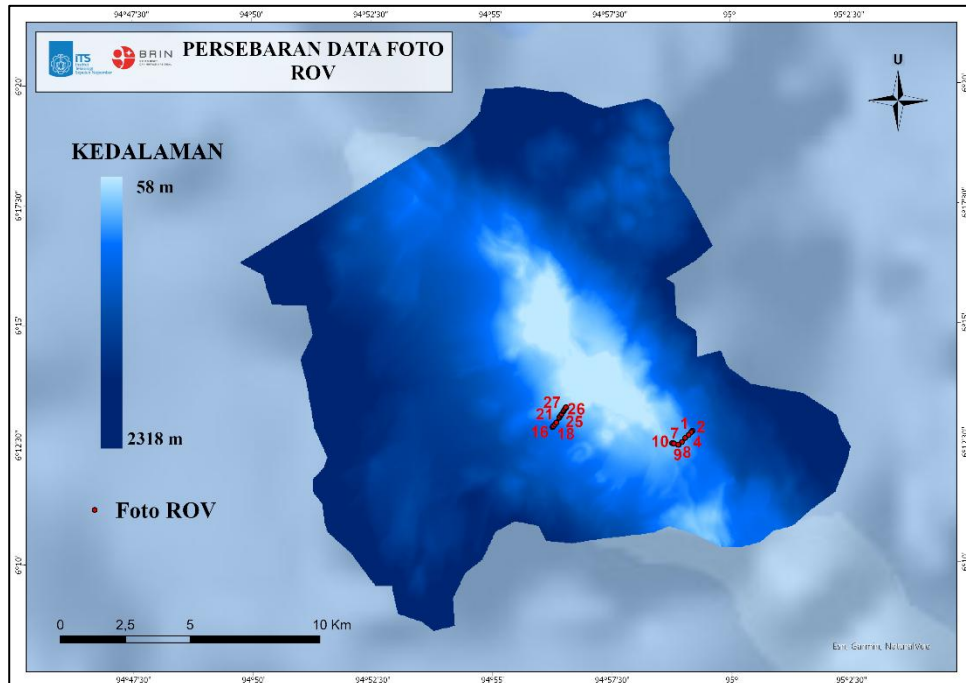
Permasalahan ini berkaitan erat dengan asumsi mendasar yang melandasi metode ARA, yaitu bahwa ARC yang dihasilkan oleh MBES dianggap hanya mencerminkan karakteristik sedimen dasar laut, bukan pengaruh geometri akuisisi. Secara konseptual, metode ARA dirancang untuk kondisi dasar laut yang relatif datar (*flat*) dimana energi akustik yang dipancarkan pada sudut tertentu dapat diasumsikan mengenai bidang datar yang homogen sehingga nilai reflektivitas akustik yang diterima benar-benar merepresentasikan sifat fisis sedimen (Fonseca & Mayer, 2007). Pada kondisi datar, kurva respons sudut dari setiap jenis sedimen memiliki bentuk yang konsisten dan dapat dibedakan dengan baik.

Kondisi di kedua area penelitian memiliki struktur morfologi yang kompleks dengan nilai *slope* mulai dari 0° hingga lebih dari 45°. Pada kondisi morfologi yang kompleks dengan perubahan elevasi yang signifikan, sudut datang yang mengenai dasar laut berbeda dengan sudut ketika gelombang akustik dipancarkan oleh transduser. Akibatnya, ARC yang direkam oleh MBES terdistorsi oleh pengaruh kemiringan permukaan dasar laut, dan ARA tidak mampu sepenuhnya untuk melakukan klasifikasi sedimen berdasarkan sifat sedimen dalam nilai *backscatter* yang diterima. Dalam kondisi seperti ini, dua titik yang memiliki jenis sedimen yang sama tetapi berada pada kemiringan lereng yang berbeda dapat menghasilkan ARC yang berbeda pula, sehingga diklasifikasikan ke kelas yang berbeda oleh ARA. Hal tersebut, secara tidak langsung dapat menurunkan tingkat kepercayaan dari hasil klasifikasi menggunakan ARA.

Hasil klasifikasi sedimen menggunakan ARA dalam penelitian ini dapat dijadikan sebagai estimasi yang memberikan gambaran umum sebaran kelas sedimen pada kedua area. Kombinasi keterbatasan ARA pada morfologi yang kompleks, adanya artefak antar-*swath*, dan ketiadaan data ground truth menjadi faktor-faktor yang membatasi hasil klasifikasi dalam penelitian ini.

4.2.4 Evaluasi Akurasi Klasifikasi Sedimen

Identifikasi dan pemetaan jenis sedimen dasar laut menggunakan *Angular Response Analysis* (ARA) diproses dengan perangkat lunak *Fledermaus Geocoder Toolbox* (FMGT). Metode ini menganalisis variasi intensitas *backscatter* dalam setiap sudut pantulan (*grazing angle*) MBES untuk mengklasifikasikan jenis sedimen dasar laut secara otomatis. Validasi terhadap hasil klasifikasi ARA dilakukan menggunakan 30 titik data foto sedimen dasar laut, sebagaimana sebaran titik foto tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.37.



Gambar 4.37 Titik Foto ROV

Validasi hasil klasifikasi sedimen dilakukan dengan membandingkan *output* klasifikasi ARA terhadap data titik foto sedimen lapangan menggunakan *Confusion Matrix*. Hasil evaluasi menunjukkan nilai *Overall Accuracy* (OA) sebesar 0,867 dan nilai *Cohen's Kappa* sebesar 0,444. Berdasarkan Tabel 4.5, dari 24 titik aktual batuan, seluruhnya berhasil diklasifikasikan dengan benar sebagai batuan, dengan tidak ada satu pun misklasifikasi sebagai pasir. Sementara itu, dari 6 titik aktual pasir, hanya 2 titik yang berhasil terklasifikasi dengan benar sebagai pasir, sedangkan 4 titik sisanya salah terklasifikasi sebagai batuan. Secara keseluruhan, model berhasil mengklasifikasikan 26 dari 30 titik dengan benar.

Tabel 4.5 Perbandingan Data Foto Sedimen dengan ARA

No	Jenis Sedimen	
	Data Foto	Hasil ARA
1	Pasir	Pasir
2	Pasir	Pasir
3	Pasir	Batuan
4	Pasir	Batuan
5	Pasir	Batuan
6	Pasir	Batuan
7	Batuan	Batuan
8	Batuan	Batuan
9	Batuan	Batuan
10	Batuan	Batuan
11	Batuan	Batuan

No	Jenis Sedimen	
	Data Foto	Hasil ARA
12	Batuan	Batuan
13	Batuan	Batuan
14	Batuan	Batuan
15	Batuan	Batuan
16	Batuan	Batuan
17	Batuan	Batuan
18	Batuan	Batuan
19	Batuan	Batuan
20	Batuan	Batuan
21	Batuan	Batuan
22	Batuan	Batuan
23	Batuan	Batuan
24	Batuan	Batuan
25	Batuan	Batuan
26	Batuan	Batuan
27	Batuan	Batuan
28	Batuan	Batuan
29	Batuan	Batuan
30	Batuan	Batuan

Dari 6 titik aktual pasir, 4 titik salah terklasifikasi sebagai batuan oleh ARA. dapat disebabkan oleh beberapa faktor yang saling berhubungan. Faktor pertama adalah sifat akustik antara pasir kasar dan batuan pada rentang sudut tertentu. Berdasarkan teori ARA, kurva respons sudut (ARC) dari pasir kasar (nilai ϕ dalam rentang 0–1) memiliki karakteristik yang sebagian tumpang tindih dengan ARC dari batuan pada sudut oblique ($>30^\circ$). Pada sudut-sudut ini, baik pasir kasar maupun batuan menunjukkan penurunan intensitas backscatter yang serupa karena komponen hamburan difus (diffuse scattering) mendominasi, sementara komponen spekuler yang membedakan keduanya hanya signifikan pada sudut kecil ($<15^\circ$). Jika beam MBES pada lokasi titik foto tersebut tidak merekam data sudut kecil secara optimal. misalnya karena lokasi berada di sisi swath, maka ARC yang terbentuk kehilangan komponen pembeda utama antara pasir kasar dan batuan, sehingga ARA mengklasifikasikannya sebagai batuan yang secara statistik lebih dominan dalam dataset.

Faktor kedua adalah pengaruh kompleksitas morfologi terhadap sudut datang efektif. Keempat titik pasir yang salah diklasifikasi semuanya terletak pada kelas morfologi Open Slopes berdasarkan Gambar 4.38. Pada area berlereng, sudut datang efektif gelombang akustik yang mengenai dasar laut berbeda dengan sudut nominal yang dipancarkan oleh transduser. Perbedaan ini dikenal sebagai local incidence angle distortion dan dapat menyebabkan ARC yang direkam tidak sesuai dengan ARC teoritis untuk kelas tersebut. Secara konkret, lereng yang menghadap ke transduser akan meningkatkan sudut datang efektif (sehingga membuatnya tampak lebih keras dari yang

sesungguhnya), sedangkan lereng yang menjauhi transduser akan menurunkan sudut datang efektif (Fonseca & Mayer, 2007). Kondisi ini menyebabkan pasir pada lereng terjal memiliki ARC yang terdistorsi ke arah ARC batuan, sehingga ARA mengklasifikasikannya ke kelas yang lebih keras.

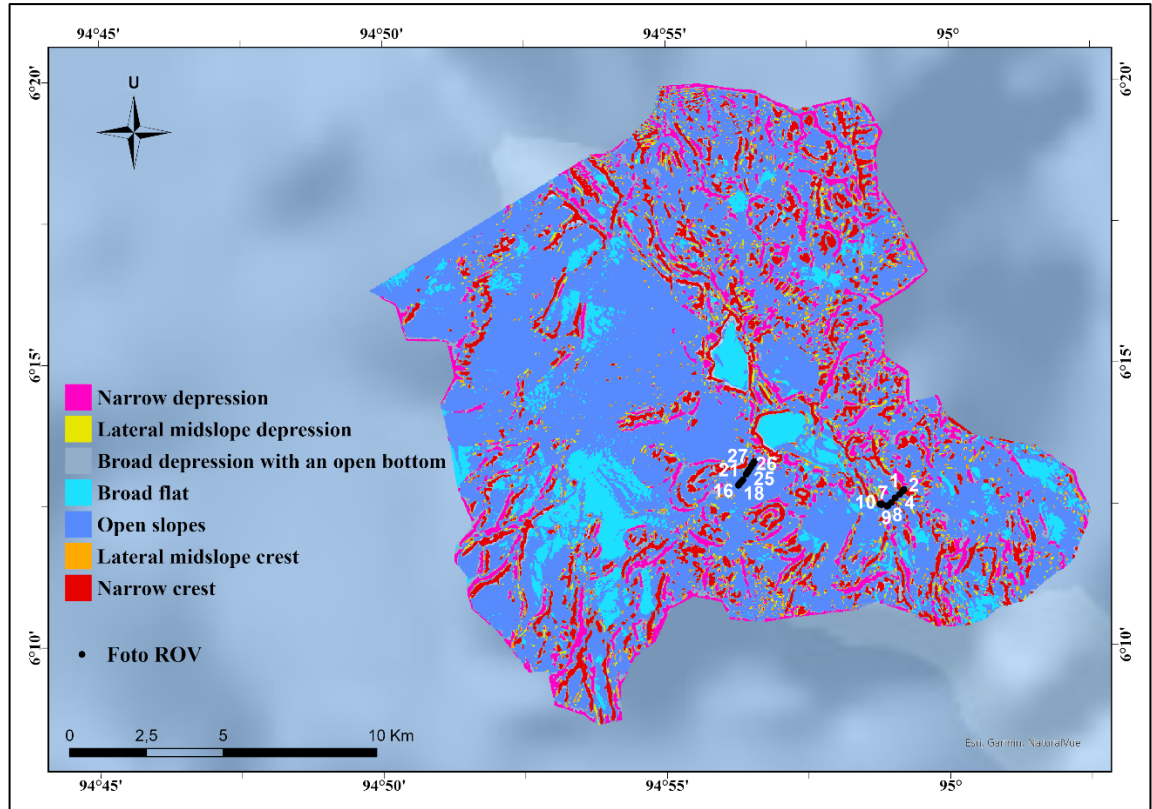
Faktor ketiga adalah ketidakseimbangan kelas dalam proses klasifikasi ARA. Algoritma klasifikasi dalam FMGT melakukan curve fitting berdasarkan seluruh dataset backscatter di area penelitian untuk membangun referensi ARC per kelas. Dalam kondisi di mana kelas batuan mendominasi 80% keseluruhan sampel (24 dari 30 titik), algoritma cenderung memiliki ambang batas klasifikasi yang bias ke arah batuan. Titik-titik yang berada di batas antara ARC pasir dan batuan akan lebih sering jatuh ke kelas batuan karena distribusi probabilitas prior-nya lebih besar untuk kelas dominan tersebut. Ketidakseimbangan kelas menjadi salah satu alasan mengapa nilai *Overall Accuracy* tampak tinggi, namun nilai *Kappa*-nya relatif lebih rendah. Secara umum, nilai OA di atas 80% sering dijadikan ambang batas yang cukup baik dalam evaluasi klasifikasi penginderaan jauh. Namun, nilai OA saja tidak cukup untuk menilai performa model secara menyeluruh, terutama ketika distribusi kelas tidak seimbang.

Hal ini terbukti dari nilai *Cohen's Kappa* yang hanya mencapai 0,444. Nilai *Kappa* dalam rentang 0,41–0,60 yang dikategorikan sebagai *moderate agreement* (Landis & Koch, 1977), yang berarti tingkat kesepakatan antara klasifikasi ARA dengan data lapangan masih dalam kategori sedang. Rendahnya nilai *Kappa* daripada OA disebabkan oleh ketidakseimbangan jumlah sampel antar kelas. Ketidakseimbangan distribusi kelas (*class imbalance*) menyebabkan nilai OA menjadi terpengaruh secara dominan oleh akurasi kelas batuan dan tidak merepresentasikan performa klasifikasi secara keseluruhan. Nilai *Kappa* yang lebih rendah dapat menggambarkan performa aktual model pada kondisi data yang tidak seimbang ini. Selain distribusi kelas, faktor sebaran spasial titik foto juga perlu dipertimbangkan. Apabila titik-titik foto terkonsentrasi di satu zona tertentu dan tidak tersebar secara merata ke seluruh area klasifikasi, maka hasil validasi tidak dapat merepresentasikan seluruh kondisi sebenarnya di lapangan. Distribusi dan jumlah titik sampel yang tidak merata ini merupakan salah satu keterbatasan dalam penelitian ini.

Hal yang sangat penting untuk ditekankan adalah bahwa data validasi yang digunakan dalam penelitian ini hanya berupa foto yang diakuisisi melalui *Remotely Operated Vehicle* (ROV) dan bukan merupakan data *ground truth* dalam arti sesungguhnya. Data *ground truth* yang ideal seharusnya berupa analisis granulometri (ukuran butir) dari sampel sedimen yang diambil langsung dari dasar laut menggunakan alat seperti *grab sampler* atau *box corer*. Foto ROV bersifat estimatif karena interpretasi kelas sedimen dari foto masih memiliki subjektivitas dan keterbatasan. Oleh karena itu, hasil validasi dalam penelitian ini lebih tepat dipandang sebagai *indicative assessment* daripada validasi absolut. Namun, hasil ini tetap memberikan gambaran awal yang berguna. Nilai OA 86,7% yang cukup tinggi dan dikombinasikan dengan konteks data yang ada menunjukkan bahwa metode ARA memiliki potensi yang baik dalam mengklasifikasikan jenis sedimen dasar laut. Untuk penelitian lanjutan, disarankan agar jumlah titik sampel foto ditingkatkan, distribusinya dibuat lebih merata ke seluruh area dan kelas sedimen, serta idealnya dilengkapi dengan pengambilan sampel sedimen fisik untuk validasi yang lebih akurat.

4.2.5 Keterkaitan Sebaran Sedimen dengan Kondisi Morfologi

Keterkaitan antara jenis sedimen dan kondisi morfologi dasar laut dilihat berdasarkan *overlay* antara distribusi spasial 30 titik foto ROV terhadap Peta Klasifikasi Struktur Morfologi BPI pada area semburan, sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 4.38.



Gambar 4.38 *Overlay* Titik Foto ROV dengan Klasifikasi Struktur Morfologi

Hasil *overlay* tersebut diperjelas melalui Tabel 4. Yang merangkum informasi jenis sedimen, kedalaman, nilai *slope* dan kelas struktur morfologi BPI pada setiap titik foto. Analisis difokuskan pada identifikasi pola hubungan antara kelas morfologi yang teridentifikasi oleh BPI dengan jenis sedimen yang teramati secara langsung di tiap titik foto.

Tabel 4.6 Data Jenis Sedimen, Kedalaman, Slope, dan Struktur Morfologi BPI pada Setiap Titik Foto ROV

No	Jenis Sedimen	Kedalaman (m)	Nilai Slope (°)	Struktur Morfologi
1	Pasir	580.63	45	<i>Narrow crest</i>
2	Pasir	580.63	45	<i>Narrow crest</i>
3	Pasir	550.06	30	<i>Narrow crest</i>
4	Pasir	550.06	30	<i>Narrow crest</i>

No	Jenis Sedimen	Kedalaman (m)	Nilai Slope (°)	Struktur Morfologi
5	Pasir	524.27	15	<i>Local crest in depression</i>
6	Pasir	506.59	15	<i>Narrow depression</i>
7	Batuan	437.28	15	<i>Narrow crest</i>
8	Batuan	443.39	15	<i>Lateral midslope depression</i>
9	Batuan	440.79	15	<i>Lateral midslope depression</i>
10	Batuan	411.61	15	<i>Lateral midslope depression</i>
11	Batuan	403.62	30	<i>Lateral midslope depression</i>
12	Batuan	391.51	30	<i>Lateral midslope crest</i>
13	Batuan	403.62	30	<i>Local crest in depression</i>
14	Batuan	411.97	15	<i>Lateral midslope depression</i>
15	Batuan	440.79	15	<i>Lateral midslope depression</i>
16	Batuan	683.18	30	<i>Local crest in depression</i>
17	Batuan	683.18	30	<i>Local crest in depression</i>
18	Batuan	664.17	30	<i>Local crest in depression</i>
19	Batuan	635.9	30	<i>Local crest in depression</i>
20	Batuan	635.9	30	<i>Local crest in depression</i>
21	Batuan	600.42	30	<i>Local crest in depression</i>
22	Batuan	521.97	30	<i>Local crest in depression</i>
23	Batuan	491.1	30	<i>Local crest in depression</i>
24	Batuan	465.31	30	<i>Local crest in depression</i>
25	Batuan	455.86	30	<i>Local crest in depression</i>

No	Jenis Sedimen	Kedalaman (m)	Nilai Slope (°)	Struktur Morfologi
26	Batuan	404.16	45	<i>Local crest in depression</i>
27	Batuan	384.97	45	<i>Lateral midslope crest</i>
28	Batuan	349.2	30	<i>Narrow crest</i>
29	Batuan	326.44	30	<i>Narrow crest</i>
30	Batuan	326.5	30	<i>Narrow crest</i>

Ke-30 titik foto ROV yang di *overlay* dengan hasil klasifikasi struktur morfologi menggunakan BPI (Gambar 4.38) memperlihatkan pola yang jelas antara jenis sedimen dan kelas morfologi. Batuan mendominasi 24 dari 30 titik dan hadir di hampir semua kelas morfologi, yaitu *Narrow crest*, *Local crest in depression*, *Lateral midslope depression*, dan *Lateral midslope crest*. Pasir hanya ditemukan pada tiga kelas morfologi, yaitu *Narrow crest* (titik 1–4), *Local crest in depression* (titik 5), dan *Narrow depression* (titik 6), seluruhnya berada pada kedalaman 506–581 m. Perbedaan sebaran mencerminkan bahwa kondisi morfologi dapat mengontrol jenis sedimen yang berada di permukaan dasar laut.

Kelas *Narrow crest* menjadi satu-satunya kelas morfologi yang memuat dua jenis sedimen, yaitu pasir dan batuan, pada titik-titik yang terletak dalam rentang kedalaman berbeda. Pasir ditemukan pada titik 1–4 di kedalaman 550–581 m dengan *slope* 30–45°, sedangkan batuan ditemukan pada titik 7 dan 28–30 di kedalaman 326–437 m dengan *slope* 15–30°. Perbedaan kedalaman antara kedua kelompok titik tersebut berperan dalam membedakan kondisi arus yang memengaruhi persebaran sedimen di kelas ini. Pada kedalaman yang lebih dangkal (326–437 m), kecepatan arus bawah laut yang relatif lebih tinggi mempertahankan kondisi erosi sehingga substrat keras seperti batuan berada disana dan material halus seperti pasir tidak dapat mengendap di rentang kedalaman tersebut. Pada kedalaman lebih dalam (550–581 m), energi arus yang lebih lemah memungkinkan pasir bertahan di permukaan puncak meskipun nilai *slope*-nya justru lebih tinggi. Pola ini menunjukkan bahwa kedalaman dapat mengesampingkan pengaruh kemiringan lereng dalam menentukan jenis sedimen pada kelas morfologi yang sama.

Kelas-kelas depresi menunjukkan menunjukkan karakter yang berbeda antar kelasnya. Kelas *Lateral midslope depression* seluruhnya didominasi batuan (titik 8–11, dan 14–15) pada kedalaman 403–443 m dengan *slope* 15–30°. Meskipun kelas ini merupakan zona cekung secara lokal, posisinya di sisi lereng aktif menjadikannya jalur aliran material ke bawah, bukan zona akumulasi, sehingga material halus tidak dapat mengendap karena terus terbawa oleh aliran gravitasional di sepanjang lereng. Berbeda dengan kelas *Narrow depression*, pada kelas ini ditemukan pasir (titik 6) yang berada pada kedalaman 506 m dengan *slope* 15°. Kelas *Narrow depression* memiliki nilai BPI fine scale dan broad scale negatif, artinya posisinya merupakan yang terendah baik secara lokal maupun regional, sehingga menjadi zona jebakan material (trap zone) tempat partikel pasir mengendap karena energi arus sangat lemah. Perbandingan antara kedua

kelas depresi ini menunjukkan bahwa tidak semua depresi berfungsi sebagai zona akumulasi sedimen, dimana karakteristiknya bergantung pada konteks topografi regional, bukan hanya posisi lokal.

Berdasarkan data 30 titik foto ROV, sebaran sedimen di area semburan dikendalikan oleh dua faktor yang bekerja secara bersamaan. Pertama, kedalaman mengontrol energi arus sehingga menentukan apakah suatu permukaan bersifat erosif atau akumulatif yang dibuktikan pada kelas *Narrow crest* di mana pasir hanya muncul di segmen yang lebih dalam meskipun *slope*-nya lebih curam. Kedua, posisi topografi relatif yang tercermin dari nilai BPI menentukan apakah suatu zona berfungsi sebagai area erosif atau akumulatif. Posisi tonjolan (BPI *fine scale* positif) secara konsisten berasosiasi dengan batuan karena energi lokal tinggi, sedangkan posisi depresi yang bersifat regional (BPI *fine scale* dan *broad scale* negatif) berasosiasi dengan pasir karena berfungsi sebagai zona akumulasi. Keterkaitan ini menegaskan bahwa sebaran sedimen di area semburan tidak dikontrol oleh satu parameter morfologi tunggal, melainkan oleh kombinasi posisi topografi relatif dan kedalaman yang secara bersama-sama menentukan intensitas energi hidrodinamika di setiap titik.

4.2.6 Korelasi Intensitas *Backscatter* dengan Jenis Sedimen

Uji korelasi antara intensitas *backscatter* dan nilai phi (ϕ) pada skala Wentworth dilakukan untuk menguantifikasi hubungan antara respons akustik dasar laut dengan ukuran butir sedimen. Nilai phi (ϕ) merupakan transformasi logaritmik negatif dari ukuran butir dalam milimeter (Persamaan 2.1), sehingga nilai phi yang tinggi merepresentasikan sedimen yang lebih halus seperti pasir, lanau, dan lumpur, sedangkan nilai phi yang rendah atau negatif merepresentasikan sedimen yang lebih kasar seperti kerikil dan batuan. Secara teori, semakin kasar sedimen maka semakin tinggi intensitas *backscatter* (nilai dB mendekati 0), dan sebaliknya semakin halus sedimen maka semakin rendah intensitas *backscatter* (nilai dB semakin negatif) (Khomsin dkk., 2024). Hal ini disebabkan oleh sedimen kasar memiliki impedansi akustik dan kekasaran permukaan yang lebih tinggi sehingga lebih banyak energi akustik yang dipantulkan kembali ke transduser. Berdasarkan hasil uji korelasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.19 (area semburan) dan Gambar 4.20 (area non-semburan), kedua area menunjukkan hubungan negatif antara intensitas *backscatter* dan nilai phi, yang konsisten dengan teori tersebut. Persamaan regresi linier, nilai koefisien determinasi (R^2), dan koefisien korelasi Pearson (r) yang diperoleh berbeda antara kedua area menunjukkan adanya perbedaan kekuatan dan karakteristik hubungan di masing-masing lingkungan.

Sebaran titik data pada *scatter plot* area semburan (Gambar 4.19) menunjukkan pola yang khusus pada setiap jenis sedimen yang ada. Titik-titik data kelas batuan seluruhnya terkonsentrasi pada nilai phi -1 dengan rentang intensitas *backscatter* yang cukup lebar (sekitar -15 dB hingga -25 dB). Rentang nilai *backscatter* yang lebar pada phi yang sama mengindikasikan bahwa kelas batuan di area semburan memiliki variasi kekerasan dan kekasaran permukaan yang cukup tinggi. titik-titik data kelas sedimen halus (pasir dan lanau) menunjukkan dua klaster yang terpisah pada grafik. Klaster pasir berada pada nilai phi sekitar $1-3$ dengan nilai *backscatter* yang relatif lebih tinggi, dan klaster lanau berada pada phi sekitar $4-6$ dengan nilai *backscatter* yang lebih rendah. Klaster pasir pada phi rendah dengan nilai *backscatter* yang lebih tinggi kemungkinan merepresentasikan pasir kasar atau pasir berkepadatan tinggi yang masih memiliki impedansi akustik cukup besar, sedangkan klaster lanau memiliki nilai intensitas yang lebih rendah merepresentasikan sedimen yang lebih halus dari pasir. Namun, pada grafik

tersebut (Gambar 4.19), kelas pasir dan lanau memiliki nilai rentang intensitas yang hampir sama (*overlap*) satu sama lain yang tidak terbedakan secara spesifik oleh ARA. Hal tersebut dapat menjadi salah satu indikasi keterbatasan metode ARA dalam memisahkan sub-kelas sedimen halus yang memiliki sifat akustik yang berdekatan, sebagaimana yang telah dibahas sebelumnya.

Pada area semburan, uji korelasi menghasilkan persamaan regresi linier $y = -1,74x - 24,08$, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,603 dan koefisien korelasi Pearson (r) sebesar -0,777. Nilai R^2 sebesar 0,603 menunjukkan bahwa sekitar 60,3% variasi intensitas *backscatter* dapat dijelaskan oleh perubahan ukuran butir sedimen (nilai ϕ), sedangkan 39,7% sisanya dipengaruhi oleh faktor-faktor lain. Nilai r sebesar -0,777 mengindikasikan korelasi negatif yang kuat antara kedua variabel. Koefisien regresi sebesar -1,74 berarti setiap kenaikan satu satuan ϕ maka jenis sedimen semakin halus, serta diikuti oleh penurunan intensitas *backscatter* sebesar 1,74 dB. Nilai R^2 yang tidak mencapai 0,7 dan sebaran titik data yang cukup lebar pada scatter plot mengindikasikan adanya faktor lain yang cukup berpengaruh di area ini. Salah satu faktor yang paling relevan adalah adanya keberadaan gas bawah permukaan, yang diketahui dapat meningkatkan nilai *backscatter* secara anomali pada zona-zona semburan (Judd & Hovland, 2007), sehingga titik-titik data di sekitar zona semburan cenderung menjadi outlier yang melemahkan kekuatan korelasi secara keseluruhan. Pada area non-semburan, uji korelasi menghasilkan persamaan regresi linier $y = -3,94x - 21,40$, dengan nilai (R^2) sebesar 0,761 dan koefisien korelasi Pearson (r) sebesar -0,872. Dibandingkan area semburan, kedua nilai ini secara konsisten lebih tinggi. Nilai R^2 sebesar 0,761 menunjukkan bahwa 76,1% variasi intensitas *backscatter* dapat dijelaskan oleh ukuran butir sedimen, dan nilai r sebesar -0,872 mengindikasikan korelasi negatif yang sangat kuat. Distribusi dua kelas sedimen (batuan dan pasir) yang terbatas pada area non-semburan juga menghasilkan sebaran titik data yang lebih teratur dan terkonsentrasi pada dua klaster yang jelas terpisah, sehingga garis regresi dapat mendeskripsikan pola data dengan lebih baik.

Sebaran titik data pada *scatter plot* area non-semburan (Gambar 4.20) memperlihatkan pola yang secara keseluruhan lebih teratur dibandingkan area semburan. Kelas batuan terkonsentrasi pada nilai ϕ -1 dengan rentang *backscatter* yang lebih sempit dan nilai yang lebih tinggi (sekitar -10 dB hingga -22 dB), sedangkan kelas pasir tersebar pada ϕ sekitar 1-3 dengan nilai *backscatter* yang lebih rendah (sekitar -26 dB hingga -35 dB). Pemisahan antara kedua klaster ini jauh lebih terlihat dibandingkan area semburan, yang tercermin dari kemiringan garis regresi yang lebih curam (-3,94) dan nilai R^2 yang lebih tinggi. Tidak adanya kelas lanau di area non-semburan juga menyebabkan tidak ada titik data yang mengisi rentang ϕ tinggi ($\phi > 4$), sehingga tidak terdapat ambiguitas akustik antara pasir halus dan lanau yang terjadi di area semburan. Kondisi ini menegaskan bahwa tanpa gangguan gas bawah permukaan dan dengan morfologi yang lebih teratur, hubungan antara intensitas *backscatter* dan ukuran butir sedimen dapat tergambar dengan lebih bersih dan lebih dapat diprediksi secara linier.

Perbedaan kemiringan garis regresi antara kedua area dapat memberikan temuan yang penting. Area non-semburan memiliki kemiringan yang jauh lebih curam (-3,94) dibandingkan area semburan (-1,74), yang berarti setiap perubahan satu satuan ϕ di area non-semburan menghasilkan perubahan intensitas *backscatter* yang lebih dari dua kali lipat dibandingkan area semburan. Perbedaan kemiringan ini mencerminkan perbedaan sensitivitas respons akustik terhadap perubahan ukuran butir di kedua lingkungan. Di area

non-sembruran yang didominasi oleh batuan dan pasir tanpa pengaruh gas, perbedaan impedansi antarkelas sedimen lebih signifikan dan tergambar dengan baik dalam nilai *backscatter*. Sebaliknya, di area semburan, pengaruh gas dan kompleksitas morfologi dapat meredam perbedaan impedansi sehingga garis regresi menjadi lebih landai. Secara keseluruhan, hasil uji korelasi di kedua area menegaskan bahwa intensitas *backscatter* memiliki hubungan yang signifikan dan negatif dengan ukuran butir sedimen, dengan R^2 berkisar antara 0,603 hingga 0,761 dan r berkisar antara -0,777 hingga -0,872. Perbedaan kekuatan korelasi antara area semburan dan non-sembruran secara tidak langsung mencerminkan pengaruh nyata aktivitas gas bawah laut dalam mendistorsi hubungan akustik-sedimen yang seharusnya lebih linear dan mengonfirmasi bahwa kondisi morfologi merupakan faktor yang tidak dapat diabaikan dalam interpretasi data *backscatter* untuk tujuan klasifikasi sedimen.

4.2.7 Faktor Penyebab Perbedaan Morfologi dan Sebaran Sedimen antara Area Semburan dan Non-Semburan

Area semburan dan area non-sembruran di Cekungan Weh memiliki perbedaan morfologi dan jenis sedimen yang dapat dijelaskan melalui tiga faktor utama, yaitu perbedaan *setting* tektonik, pengaruh aktivitas semburan gas, dan perbedaan rentang kedalaman. Keempat faktor ini tidak bekerja secara terpisah, melainkan saling berkaitan dalam membentuk karakteristik morfologi dan sebaran sedimen yang berbeda di masing-masing area. Area semburan terletak pada jalur patahan aktif rhubung dengan sistem Sesar Segmen Aceh (ACF) dan Sesar Seulimeum (SLF) (Aswini dkk., 2021). Aktivitas sesar ini menghasilkan deformasi kompresional dan ekstensional yang membentuk struktur *Submarine Ridge* dengan morfologi puncak-puncak memanjang (*Narrow Crest*), lereng curam ($slope > 45^\circ$), dan nilai *rugosity* tinggi (hingga 0,3). Pembentukan *ridge* pada zona tektonik aktif berlangsung secara episodik akibat pergerakan sesar, sehingga topografi yang terbentuk bersifat kasar, tidak beraturan, dan dicirikan oleh transisi elevasi yang tajam (*curvature* -0,49 hingga 0,42). Sebaliknya, area non-sembruran didominasi oleh fitur *Seamount* yang terbentuk melalui proses vulkanisme titik panas (*hotspot volcanism*) atau akumulasi material vulkanik *intraplate* di lingkungan yang lebih stabil secara tektonik. Proses pembentukan *Seamount* menghasilkan morfologi yang relatif ekuidimensional, lebih simetris, dan memiliki lereng yang lebih teratur ($slope < 35^\circ$) dengan nilai *rugosity* rendah (maks. 0,05). Perbedaan genesis morfologi inilah yang menjadi akar penyebab kontras parameter kuantitatif morfologi antara kedua area.

Kehadiran semburan gas aktif di area semburan memiliki dampak langsung dan tidak langsung terhadap morfologi. Secara langsung, tekanan fluida bawah permukaan yang dilepaskan melalui rekahan sesar yang dapat mengangkat material dasar laut, memperlebar rekahan yang ada, dan mempertahankan kekasaran permukaan di sekitar titik semburan. Proses ini dikenal sebagai *fluid-driven deformation* dan menghasilkan fitur-fitur mikromorfologi seperti *mounds*, depresi lokal, dan zona kolaps yang berkontribusi pada nilai *rugosity* tinggi (Judd & Hovland, 2007). Secara tidak langsung, semburan gas menghalangi akumulasi sedimen halus di zona sekitar titik semburan karena arus ke atas yang dihasilkan plum gas mendorong partikel tersuspensi ke kolom air, mengurangi fluks pengendapan sedimen halus di zona tersebut (Liu dkk., 2019). Mekanisme ini menjelaskan mengapa area semburan memiliki tiga kelas sedimen (batuan, pasir, lanau) dengan kehadiran lanau yang terlokalisasi di cekungan antar-tonjolan,

sementara area non-semburan hanya memiliki dua kelas (batuan dan pasir) dengan distribusi yang lebih teratur mengikuti gradien morfologi.

Perbedaan rentang kedalaman yang cukup signifikan antara kedua area juga memengaruhi jenis sedimen yang dapat terakumulasi. Pada kedalaman > 3.000 m, area non-semburan mendekati Carbonate Compensation Depth (CCD), yaitu kedalaman di mana laju pelarutan kalsit melebihi laju pengendapannya. Di atas CCD, partikel-partikel berkarbonat (seperti cangkang foraminifera) dapat mengendap dan membentuk lapisan sedimen pelagis yang berkontribusi pada karakteristik backscatter pasir halus di zona Broad Flat. Sebaliknya, area semburan yang berada pada rentang kedalaman lebih dangkal berpotensi mengakumulasi material terigenous yang lebih kasar dari lereng kontinen dan material vulkanik dari zona patahan aktif, menghasilkan keragaman jenis sedimen yang lebih tinggi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini merupakan bagian penutup dari penelitian yang merangkum seluruh temuan yang diperoleh. Bagian kesimpulan menjawab secara langsung ketiga tujuan penelitian. Bagian saran menyampaikan rekomendasi yang ditujukan untuk penelitian selanjutnya guna mengatasi keterbatasan yang dijumpai dalam penelitian ini.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisis penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan analisis parameter kuantitatif morfologi yang diturunkan dari data batimetri MBES, area semburan dan non-sembrun menunjukkan karakteristik morfologi yang berbeda secara signifikan. Area semburan berada pada rentang kedalaman 58 m hingga 2318 m dengan nilai *slope* mencapai lebih dari 45° , *rugosity* maksimum 0,3, dan rentang *curvature* -0,49 hingga 0,42, serta distribusi *aspect* yang dominan ke arah Barat mencerminkan morfologi yang kompleks, kasar, dan berarah tertentu. Area non-sembrun berada pada kedalaman yang lebih dalam, yaitu 1854 m hingga 3528 m, dengan *slope* tidak melebihi 35° , *rugosity* maksimum hanya 0,05, dan rentang *curvature* yang sangat sempit (-0,015 hingga 0,015) serta distribusi *aspect* yang merata ke segala arah mencerminkan morfologi yang lebih mulus dan simetris. Hasil klasifikasi struktur morfologi menggunakan BPI menunjukkan pada area semburan didominasi kelas *Narrow Crest* dan *Open Slopes*, sedangkan pada area non-sembrun didominasi kelas *Open Slopes* dan *Broad Flat*. Berdasarkan integrasi parameter kuantitatif, klasifikasi *Bathymetry Position Index* (BPI), dan model 3D, serta mengacu pada kriteria IHO-GEBCO *Cookbook for Generic Terms of Undersea Feature Names*, fitur morfologi utama pada area semburan teridentifikasi sebagai *Submarine Ridge* sedangkan pada area non-sembrun teridentifikasi sebagai *Seamount* dengan fitur sekunder berupa *Knoll*.
2. Mosaik *backscatter* MBES menunjukkan perbedaan rentang nilai intensitas yang jelas antara kedua area. Area semburan memiliki rentang intensitas yang lebih lebar, yaitu -54 dB hingga -3 dB, sedangkan area non-sembrun memiliki rentang yang lebih sempit, yaitu -40 dB hingga -6 dB. Rentang yang lebih lebar di area semburan menunjukkan jenis sedimen yang lebih bervariasi dibandingkan area non-sembrun. Penetapan nilai *threshold* menghasilkan batas pemisah sedimen kasar dan halus pada nilai -27 dB untuk area semburan dan -26 dB untuk area non-sembrun. Klasifikasi sedimen menggunakan *Angular Response Analysis* (ARA) menghasilkan tiga kelas sedimen berdasarkan skala Wentworth pada area semburan (batuan, pasir, dan lanau) dan dua kelas pada area non-sembrun (batuan dan pasir).
3. Uji korelasi antara intensitas *backscatter* dan nilai phi (ϕ) skala Wentworth pada kedua area menunjukkan hubungan negatif yang konsisten dengan teori akustik sedimen, di mana semakin kasar sedimen (nilai phi rendah) maka semakin tinggi nilai *backscatter* (mendekati 0 dB). Pada area semburan, hubungan tersebut dinyatakan dengan persamaan regresi $y = -1,74x - 24,08$, dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,603 dan koefisien korelasi Pearson (r) sebesar -0,777, yang mengindikasikan korelasi negatif kuat. Pada area non-sembrun, hubungan yang lebih erat ditemukan dengan persamaan $y = -3,94x - 21,40$, koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,761, dan koefisien korelasi Pearson (r) sebesar -0,872, yang mengindikasikan korelasi negatif sangat kuat.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Penelitian selanjutnya, disarankan mengintegrasikan data seismik *sub-bottom profiler* guna memetakan struktur bawah permukaan dan mengonfirmasi hubungan antara jalur patahan aktif, migrasi gas, dan morfologi dasar laut yang terbentuk di area penelitian.
2. Penelitian ini hanya menggunakan foto ROV sebagai data validasi, sehingga bersifat estimatif. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar dilakukan pengambilan sampel sedimen fisik secara langsung menggunakan *grab sampler* atau *box corer* pada titik-titik yang tersebar merata di seluruh area.
3. Pemerataan sebaran titik validasi yang proporsional terhadap luasan area penelitian, sehingga setiap kelas sedimen memiliki jumlah sampel yang cukup untuk menghasilkan evaluasi akurasi yang lebih baik dan seimbang.
4. Melakukan proses normalisasi dan adjust swath pada saat pengolahan untuk meminimalkan perbedaan nilai *backscatter* antar-swath dengan mempertimbangkan manuver lajur survei.

DAFTAR PUSTAKA

- Ackerman, S. D., Pappal, A. L., Huntley, E. C., Blackwood, D. S., & Schwab, W. C. (2015). *Geological sampling data and benthic biota classification: Buzzards Bay and Vineyard Sound, Massachusetts* (Open-File Report). <https://doi.org/10.3133/ofr20141221>
- Aswini, K. K., Kamesh Raju, K. A., Dewangan, P., Yatheesh, V., Singha, P., & Ramakrushana Reddy, T. (2021). Seismotectonic evaluation of off Nicobar earthquake swarms, Andaman Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2021.104948>
- Bellec, V. K., Bøe, R., Rise, L., Lepland, A., Thorsnes, T., & Bjarnadóttir, L. R. (2017). Seabed sediments (Grain size) of nordland vi, offshore north norway. *Journal of Maps*, 13(2), 608–620. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1348307>
- Blott, S. J., & Pye, K. (2001). Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1237–1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Brown, C. J., & Lucieer, V. (2015). *Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars-Guidelines and Recommendations*. <https://www.researchgate.net/publication/275890570>
- Bührig, L. H., Colombero, L., Patacci, M., Mountney, N. P., & McCaffrey, W. D. (2022). Tectonic Influence on the Geomorphology of Submarine Canyons: Implications for Deep-Water Sedimentary Systems. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.836823>
- Chang, J., Li, Y., & Lu, H. (2022). The Morphological Characteristics of Authigenic Pyrite Formed in Marine Sediments. Dalam *Journal of Marine Science and Engineering* (Vol. 10, Nomor 10). MDPI. <https://doi.org/10.3390/jmse10101533>
- Cormier, M. H., & Sloan, H. (2018). Abyssal Hills and Abyssal Plains. Dalam *Springer Geology* (hlm. 389–408). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57852-1_20
- Das, C., Sahoo, A. K., & Pradhan, C. (2022). Multicriteria recommender system using different approaches. Dalam *Cognitive Big Data Intelligence with a Metaheuristic Approach* (hlm. 259–277). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85117-6.00011-X>
- Elson, L., Manik, H. M., Hestirianoto, T., & Pujiyati, S. (2025). Seabed Geacoustic Analysis Using Single Beam Echosounder. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, 17(1). <https://doi.org/10.20473/jipk.v17i1.55832>
- Etioppe, G., Ciotoli, G., Schwietzke, S., & Schoell, M. (2019). Gridded maps of geological methane emissions and their isotopic signature. *Earth System Science Data*, 11(1). <https://doi.org/10.5194/essd-11-1-2019>
- Farihah, R. A., Manik, H. M., & Harsono, G. (2020). PENGUKURAN DAN ANALISIS HAMBUR BALIK AKUSTIK MENGGUNAKAN TEKNOLOGI MULTIBEAM ECHOSOUNDER UNTUK KLASIFIKASI SEDIMEN DASAR LAUT TELUK PALU. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 12(2), 439–455. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v12i2.28465>

- Feizizadeh, B., Darabi, S., Blaschke, T., & Lakes, T. (2022). QADI as a New Method and Alternative to Kappa for Accuracy Assessment of Remote Sensing-Based Image Classification. *Sensors*, 22(12), 4506. <https://doi.org/10.3390/s22124506>
- Folk, R. L. (1954). The Distinction between Grain Size and Mineral Composition in Sedimentary-Rock Nomenclature. *The Journal of Geology*, 62(4), 344–359. <https://doi.org/10.1086/626171>
- Fonseca, L., Brown, C., Calder, B., Mayer, L., & Rzhanov, Y. (2009). Angular range analysis of acoustic themes from Stanton Banks Ireland: A link between visual interpretation and multibeam echosounder angular signatures. *Applied Acoustics*, 70(10), 1298–1304. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.09.008>
- Fonseca, L., & Mayer, L. (2007). Remote estimation of surficial seafloor properties through the application Angular Range Analysis to multibeam sonar data. *Marine Geophysical Research*, 28(2), 119–126. <https://doi.org/10.1007/s11001-007-9019-4>
- Garone, R. V., Birkenes Lønmo, T. I., Schimel, A. C. G., Diesing, M., Thorsnes, T., & Løvstakken, L. (2023). Seabed classification of multibeam echosounder data into bedrock/non-bedrock using deep learning. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1285368>
- Hilmi, N., Sutherland, M., Farahmand, S., Haraldsson, G., van Doorn, E., Ernst, E., Wisz, M. S., Claudel Rusin, A., Elsler, L. G., & Levin, L. A. (2023). Deep sea nature-based solutions to climate change. Dalam *Frontiers in Climate* (Vol. 5). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fclim.2023.1169665>
- IHO. (2020). *International Hydrographic Organization Standards for Hydrographic Surveys S-44 Edition 6.1.0 International Hydrographic Organization Standards for Hydrographic Surveys*. www.iho.int
- International Hydrographic Organization, I. (2022). *International Hydrographic Organization Standards for Hydrographic Surveys S-44 Edition 6.1.0 International Hydrographic Organization Standards for Hydrographic Surveys*. www.iho.int
- Jackson, D. R., & Briggs, K. B. (1992a). High-frequency bottom backscattering: Roughness versus sediment volume scattering. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 92(2), 962–977. <https://doi.org/10.1121/1.403966>
- Jackson, D. R., & Briggs, K. B. (1992b). High-frequency bottom backscattering: Roughness versus sediment volume scattering. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 92(2), 962–977. <https://doi.org/10.1121/1.403966>
- Jakobsson, M., Mayer, L. A., Bringensparr, C., Castro, C. F., Mohammad, R., Johnson, P., Ketter, T., Accettella, D., Amblas, D., An, L., Arndt, J. E., Canals, M., Casamor, J. L., Chauché, N., Coakley, B., Danielson, S., Demarte, M., Dickson, M. L., Dorschel, B., ... Zinglersen, K. B. (2020). The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0. *Scientific Data*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0520-9>
- Janowski, L., Madricardo, F., Fogarin, S., Kruss, A., Molinaroli, E., Kubowicz-Grajewska, A., & Tegowski, J. (2020). Spatial and temporal changes of tidal inlet using object-based

- image analysis of multibeam echosounder measurements: A case from the Lagoon of Venice, Italy. *Remote Sensing*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/rs12132117>
- Judd, A., & Hovland, M. (2007). Seabed fluid flow: The impact on geology, biology, and the marine environment. Dalam *Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535918>
- Khomsin, Mukhtasor, Suntoyo, & Pratomo, D. G. (2024). Seabed Sediment Classification through Multispectral Backscatter Mosaic MBES and Angular Response Analysis. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, 51(5), 118–128. <https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.51.5.12>
- Koethe, R., & Lehmeier, F. (1996). SARA — System zur Automatischen Relief-Analyse [Manual pengguna]. *Dept. of Geography, University of Goettingen*.
- Kurnio, H., Lubis, S., & Widi, H. C. (2015). Submarine Volcano Characteristics in Sabang Waters Karakteristik Gunung Api Bawah Laut di Perairan Sabang. Dalam *Bulletin of the Marine Geology* (Vol. 30, Nomor 2).
- Lamarche, G., & Lurton, X. (2018). Recommendations for improved and coherent acquisition and processing of backscatter data from seafloor-mapping sonars. *Marine Geophysical Research*, 39(1–2), 5–22. <https://doi.org/10.1007/s11001-017-9315-6>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Liu, X., Feng, X., Sun, Y., Chen, Y., Tang, Q., Zhou, X., Dong, L., Fan, S., Jiao, P., Wang, K., Wen, W., & Lu, B. (2019). Acoustic and biological characteristics of seafloor depressions in the North Yellow Sea Basin of China: Active fluid seepage in shallow water seafloor. *Marine Geology*, 414, 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.05.002>
- Lucieer, V., Hill, N. A., Barrett, N. S., & Nichol, S. (2013). Do marine substrates “look” and “sound” the same? Supervised classification of multibeam acoustic data using autonomous underwater vehicle images. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 117, 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.11.001>
- Lundblad, E. R., Wright, D. J., Miller, J., Larkin, E. M., Rinehart, R., Naar, D. F., Donahue, B. T., Anderson, S. M., & Battista, T. (2006). A benthic terrain classification scheme for American Samoa. *Marine Geodesy*, 29(2), 89–111. <https://doi.org/10.1080/01490410600738021>
- Lurton, X., Eleftherakis, D., & Augustin, J. M. (2018). Analysis of seafloor backscatter strength dependence on the survey azimuth using multibeam echosounder data. *Marine Geophysical Research*, 39(1–2), 183–203. <https://doi.org/10.1007/s11001-017-9318-3>
- McGonigle, C., Brown, C., Quinn, R., & Grabowski, J. (2009). Evaluation of image-based multibeam sonar backscatter classification for benthic habitat discrimination and mapping at Stanton Banks, UK. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81(3), 423–437. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.11.017>

- Monteys, X., Hung, P., Scott, G., Garcia, X., Evans, R. L., & Kelleher, B. (2016). The use of multibeam backscatter angular response for marine sediment characterisation by comparison with shallow electromagnetic conductivity. *Applied Acoustics*, 112, 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.05.010>
- Montgomery, D. C., Peck, E., & Vining, G. G. (2012). *INTRODUCTION TO LINEAR REGRESSION ANALYSIS*.
- Mukti, M. M., Arisbaya, I., & Permana, H. (2020). Termination of a Trench-Linked Strike-Slip Fault Zone in the Sumatra–Java Forearc Basin and Accretionary Wedge Complex. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 21(4), 177. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v21i4.492>
- Naudts, L., Greinert, J., Artemov, Y., Beaubien, S. E., Borowski, C., & Batist, M. De. (2008). Anomalous sea-floor backscatter patterns in methane venting areas, Dnepr paleo-delta, NW Black Sea. *Marine Geology*, 251(3–4), 253–267. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.03.002>
- Nugroho, C., Manik, H., Gultom, D., & Firdaus, M. (2022). Implementasi Multibeam Echosounder untuk Pengukuran dan Analisis Data Kedalaman Perairan Teluk Jakarta Berdasarkan Standar International Hydrographic Organization. *POSITRON*, 12(1), 60. <https://doi.org/10.26418/positron.v12i1.51833>
- Ou, X., Zhu, J., Li, S., Jia, Y., Jia, Z., Zhang, S., Zhang, S., Chen, R., Chen, X., Ding, D., Xing, H., Suo, Y., Wang, P., & Liu, Y. (2021). Submarine geomorphological features and their origins analyzed from multibeam bathymetry data in the south china sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/jmse9121419>
- Palomino, D., López-González, N., Vázquez, J. T., Fernández-Salas, L. M., Rueda, J. L., Sánchez-Leal, R., & Díaz-del-Río, V. (2016). Multidisciplinary study of mud volcanoes and diapirs and their relationship to seepages and bottom currents in the Gulf of Cádiz continental slope (northeastern sector). *Marine Geology*, 378, 196–212. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.10.001>
- Pearson, K. (1895). VII. Note on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58(347–352), 240–242. <https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041>
- Prampolini, M., Coratza, P., Rossi, S., Parenti, C., Galea, C., Caruana, A., & Soldati, M. (2021). Geomorphology of the seafloor north east of the Maltese Islands, Central Mediterranean. *Journal of Maps*, 17(2), 465–475. <https://doi.org/10.1080/17445647.2021.1957034>
- Prasetya Adi, A., Manik, H. M., & Pujiyati, S. (2016). INTEGRASI DATA MULTIBEAM BATIMETRI DAN MOSAIK BACKSCATTER UNTUK KLASIFIKASI TIPE SEDIMEN DATA INTEGRATION BATHYMETRY MULTIBEAM AND BACKSCATTER MOSAIC FOR CLASSIFICATION TYPE OF SEDIMEN. Dalam *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan* (Vol. 7, Nomor 1).
- Rachmadhan, H. D., & Jgprism, /. (2023). INTERAKSI VULKANIK DAN TEKTONIK DI PULAU SANGIHE DAN GUNUNG AWU: SEBUAH STUDI INTEGRATIF DALAM

- KONTEKS GEOLOGI INDONESIA. Dalam *Journal Geological Processes, Risks and Integrated Spatial Modeling* (Vol. 01, Nomor 02).
- Rahman, A., Amran Ronny Syam, dan, Riset Konservasi Sumber Daya Laut dan Perairan Darat-BRIN, P., Raya Jakarta-Bogor Km, J., Cibinong, K., & Bogor, K. (2023). *CLASSIFICATION OF MORPHOLOGY STRUCTURE OF BOTTOM WATERS IN KEMUJAN ISLAND, KARIMUNJAWA* (Vol. 21, Nomor 2).
- Runya, R. M., McGonigle, C., Quinn, R., Howe, J., Collier, J., Fox, C., Dooley, J., O'loughlin, R., Calvert, J., Scott, L., Abernethy, C., & Evans, W. (2021). Examining the links between multi-frequency multibeam backscatter data and sediment grain size. *Remote Sensing*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/rs13081539>
- Samant, R., Giorgino, T., Jarochowska, E., & De Vleeschouwer, D. (2025). Enhancing the Accuracy of Dynamic Time Warping by Integrating Stratigraphic Constraints Into the Automated Correlation of Sedimentary Sequences. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 40(8). <https://doi.org/10.1029/2024PA005082>
- Sasmito, B. (2020). *ANALISIS PERUBAHAN GARIS PANTAI AKIBAT KENAIKAN MUKA AIR LAUT PANTAI KABUPATEN DEMAK* (Vol. 3, Nomor 2).
- Schneider Von Deimling, J., & Papenberg, C. (2012). Technical Note: Detection of gas bubble leakage via correlation of water column multibeam images. *Ocean Science*, 8(2), 175–181. <https://doi.org/10.5194/os-8-175-2012>
- Šiljeg, A., Marić, I., Krekman, S., Cukrov, N., Lovrić, M., Domazetović, F., Panda, L., & Bulat, T. (2023). Mapping of marine litter on the seafloor using WASSP S3 multibeam echo sounder and Chasing M2 ROV. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1133751>
- Sklar, E., Bushuev, E., Misiuk, B., Labbé-Morissette, G., & Brown, C. J. (2024). Seafloor morphology and substrate mapping in the Gulf of St Lawrence, Canada, using machine learning approaches. *Frontiers in Marine Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1306396>
- Stagpoole, V., & Mackay, K. (2021). *Cookbook for Generic Terms of undersea feature names*.
- Tarback, E. J. ., & Lutgens, F. K. . (2015). *Earth science*. Pearson.
- Trzcinska, K., Tegowski, J., Pocwiardowski, P., Janowski, L., Zdroik, J., Kruss, A., Rucinska, M., Lubniewski, Z., & von Deimling, J. S. (2021). Measurement of seafloor acoustic backscatter angular dependence at 150 KHz using a multibeam echosounder. *Remote Sensing*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/rs13234771>
- W. C. Krumbein. (1934). Size Frequency Distributions of Sediments. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, Vol. 4. <https://doi.org/10.1306/D4268EB9-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Wang, G., Gao, H., & Zou, H. (2025). Sequence stratigraphy and geometry of the carbonate platform in the Longwangmiao Formation (Toyonian), Cambrian, SW China. *Frontiers in Marine Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1607571>

- Wang, H., Sun, Y., Wang, S., Gao, W., Xu, W., Liu, Z., Yin, X., Ruan, S., & Shao, Y. (2025). Fine-Scale Geomorphologic Classification of Guyots in Representative Areas of the Western Pacific Ocean. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/jmse13040823>
- Wang, H., Zhou, Q., Wei, S., Xue, X., Zhou, X., & Zhang, X. (2023). Research on Seabed Sediment Classification Based on the MSC-Transformer and Sub-Bottom Profiler. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/jmse11051074>
- Wentworth, C. K. (1922). A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*, 30(5), 377–392. <https://doi.org/10.1086/622910>
- Widada, S., Rahardiawan, R., Ilmu Kelautan, J., Perikanan dan Ilmu Kelautan, F., Diponegoro, U., & GeofisikaPusat Penelitian Pengembangan Geologi Kelautan, B. P. (2014). *INTERPRETASI LAPISAN SEDIMEN DASAR LAUT DI PERAIRAN UTARA JAWA (LEMBAR PETA 1310) MENGGUNAKAN SUB BOTTOM PROFILE* (Vol. 3, Nomor 4). <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>
- Wormald, S. C., Wright, I. C., Bull, J. M., Lamarche, G., & Sanderson, D. J. (2012). Morphometric analysis of the submarine arc volcano Monowai (Tofua-Kermadec Arc) to decipher tectono-magmatic interactions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 239–240, 69–82. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.06.004>
- Zevenbergen, L. W., & Thorne, C. R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(1), 47–56. <https://doi.org/10.1002/esp.3290120107>

LAMPIRAN

I. Data foto ROV yang diakuisisi pada saat ekspedisi BRIN-OceanX 2024 Indonesia Mission pada tanggal 16 dan 20 Mei 2024.

Tabel 1 Lampiran Foto ROV
(BRIN-OceanX 2024 Indonesia Mission)

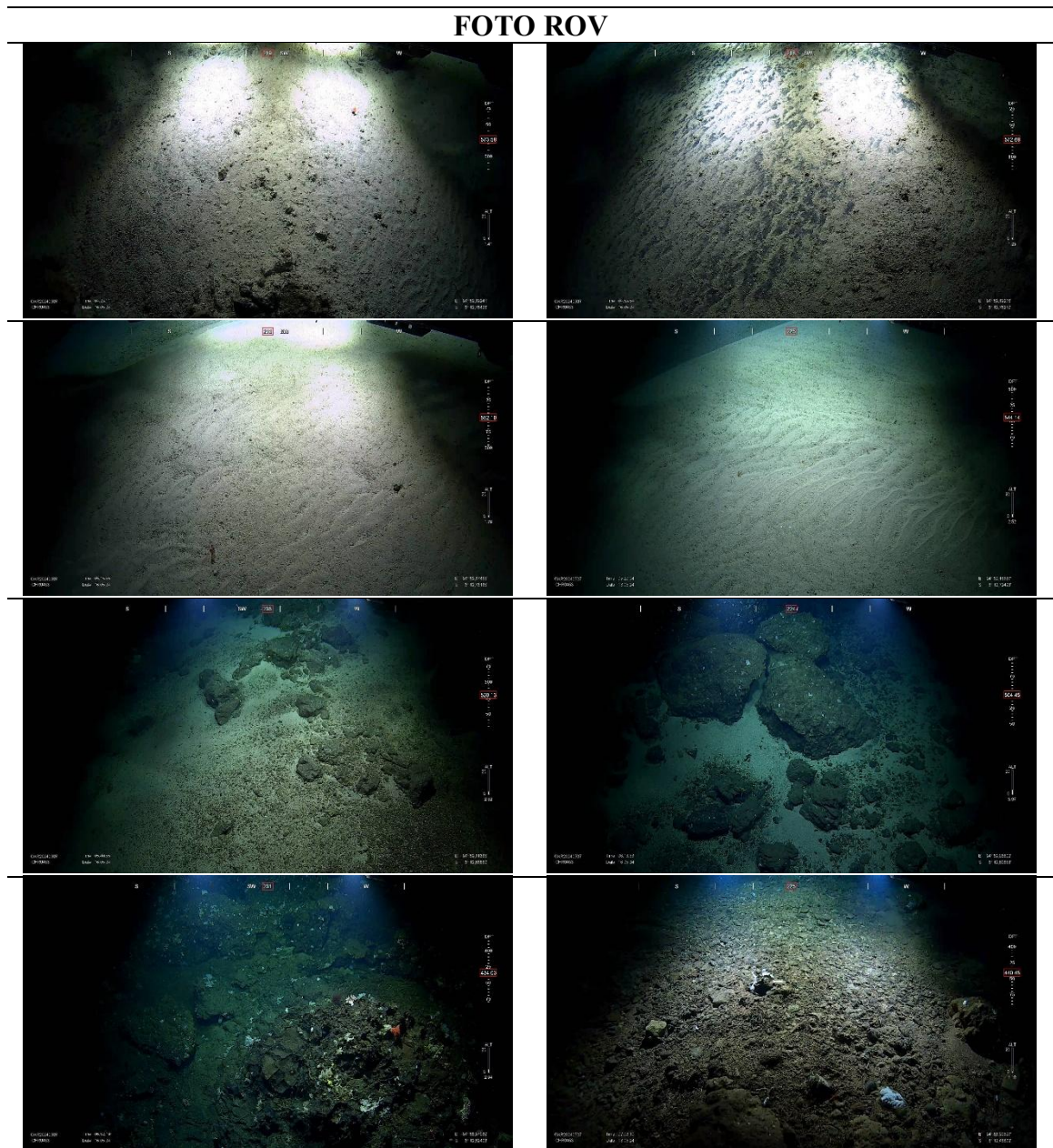


FOTO ROV

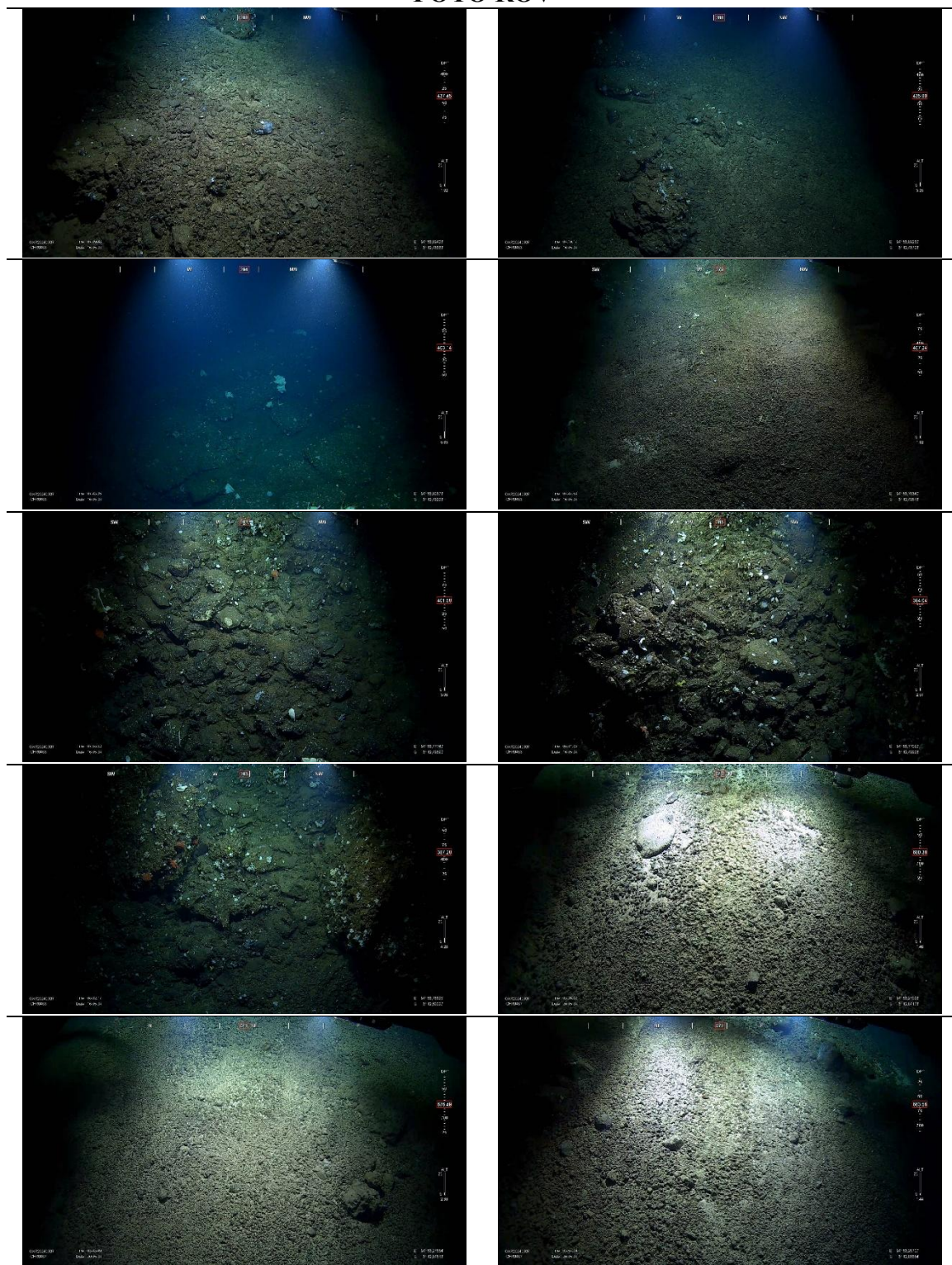


FOTO ROV

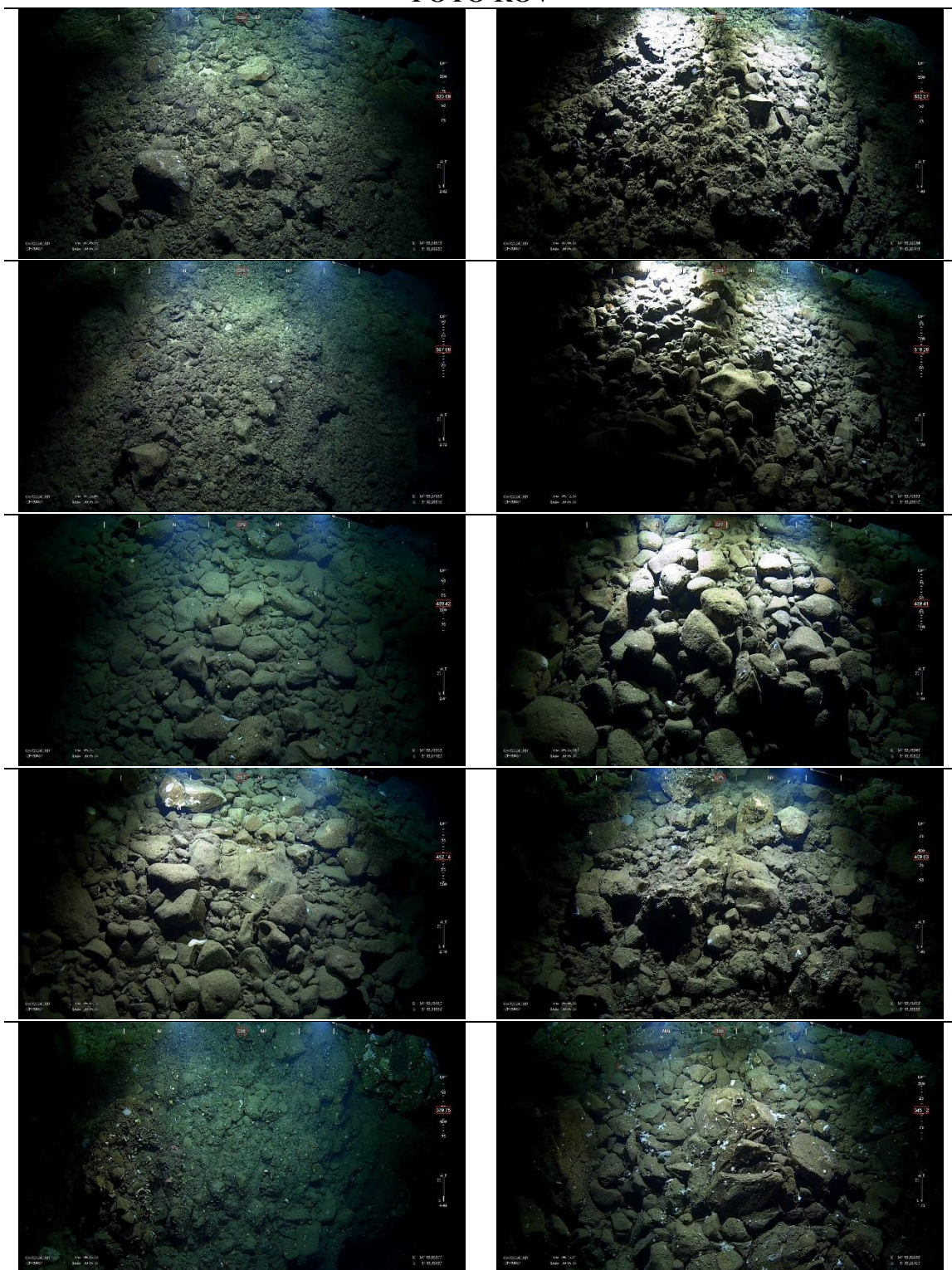
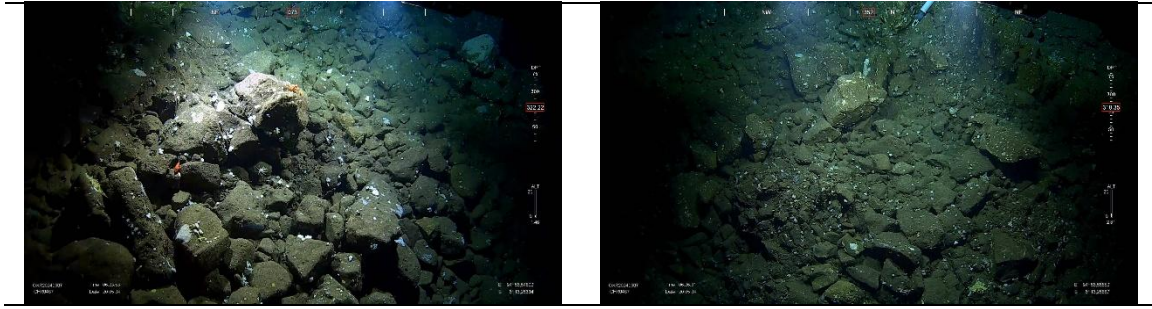
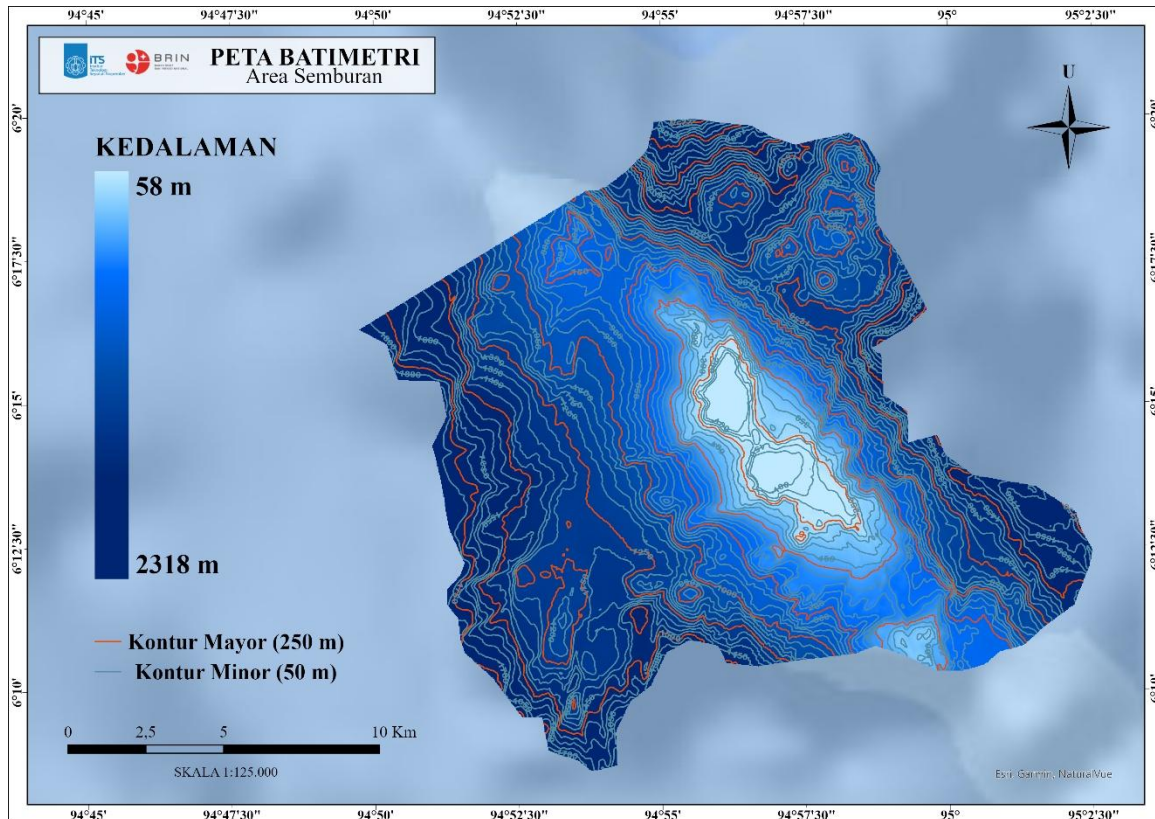
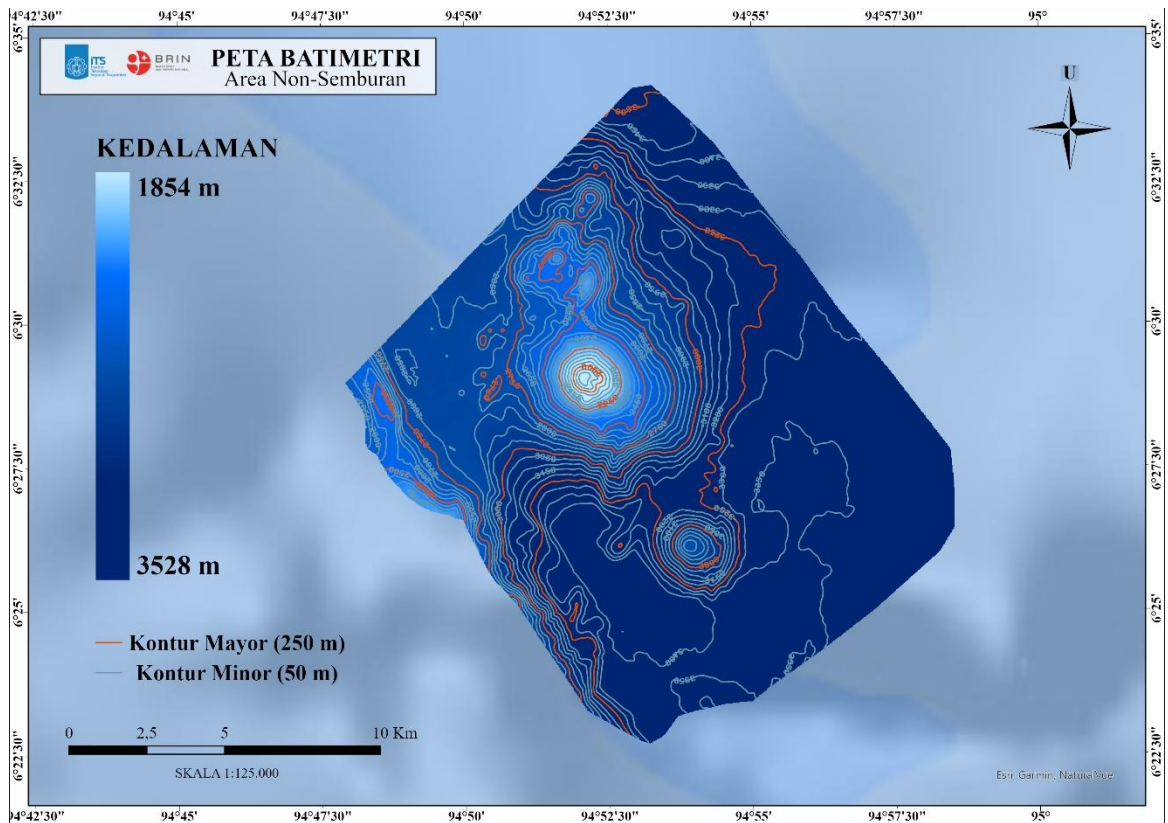


FOTO ROV

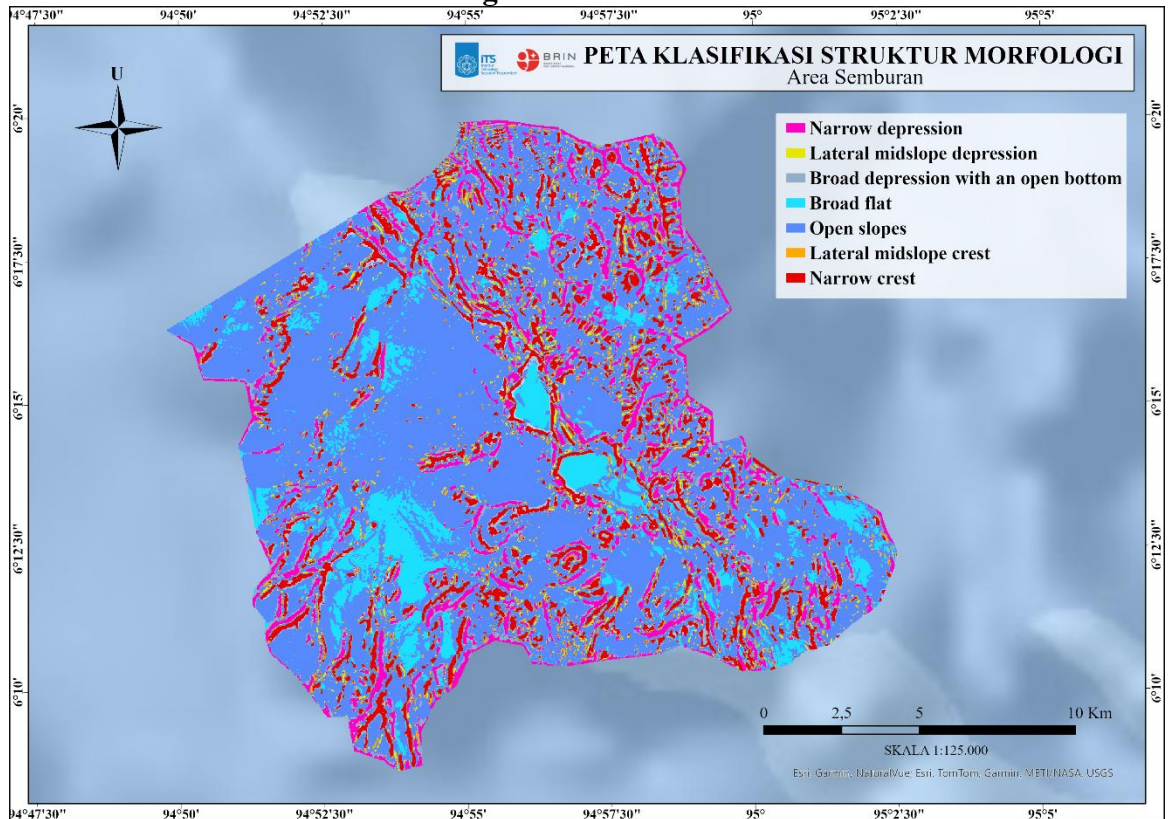


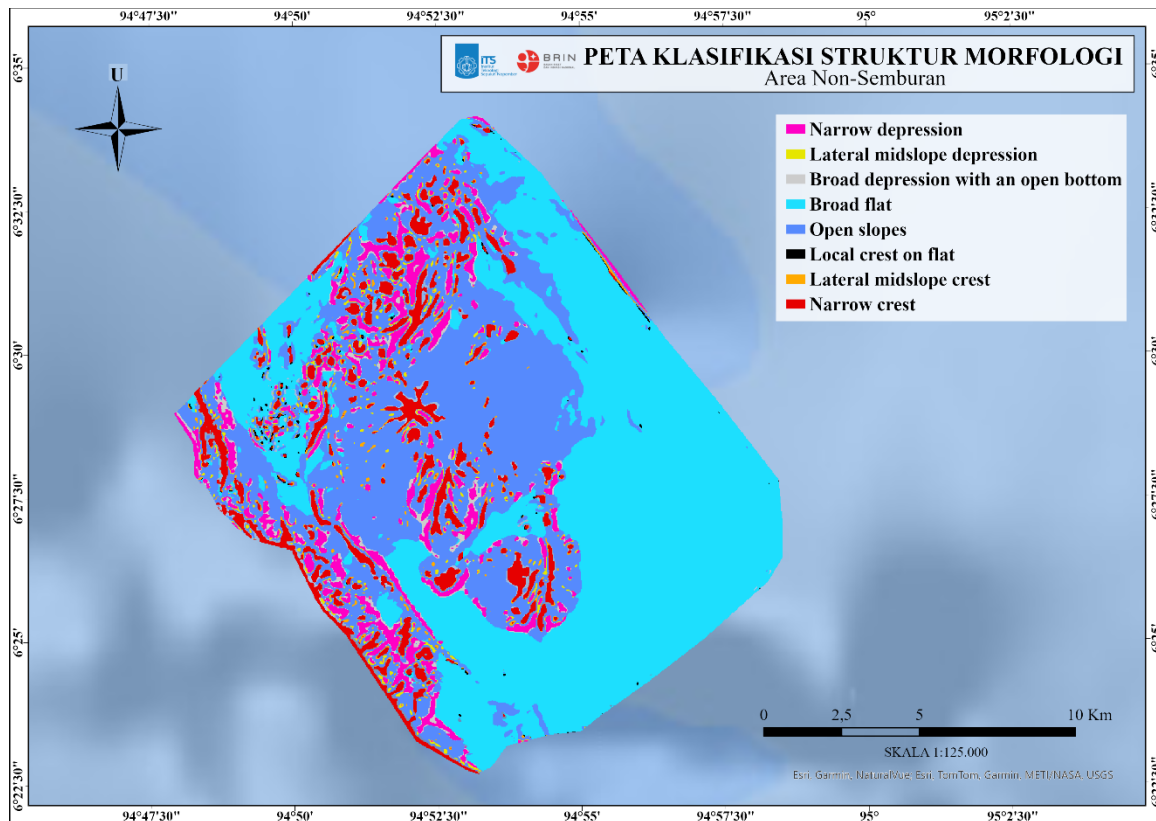
II. Peta Batimetri



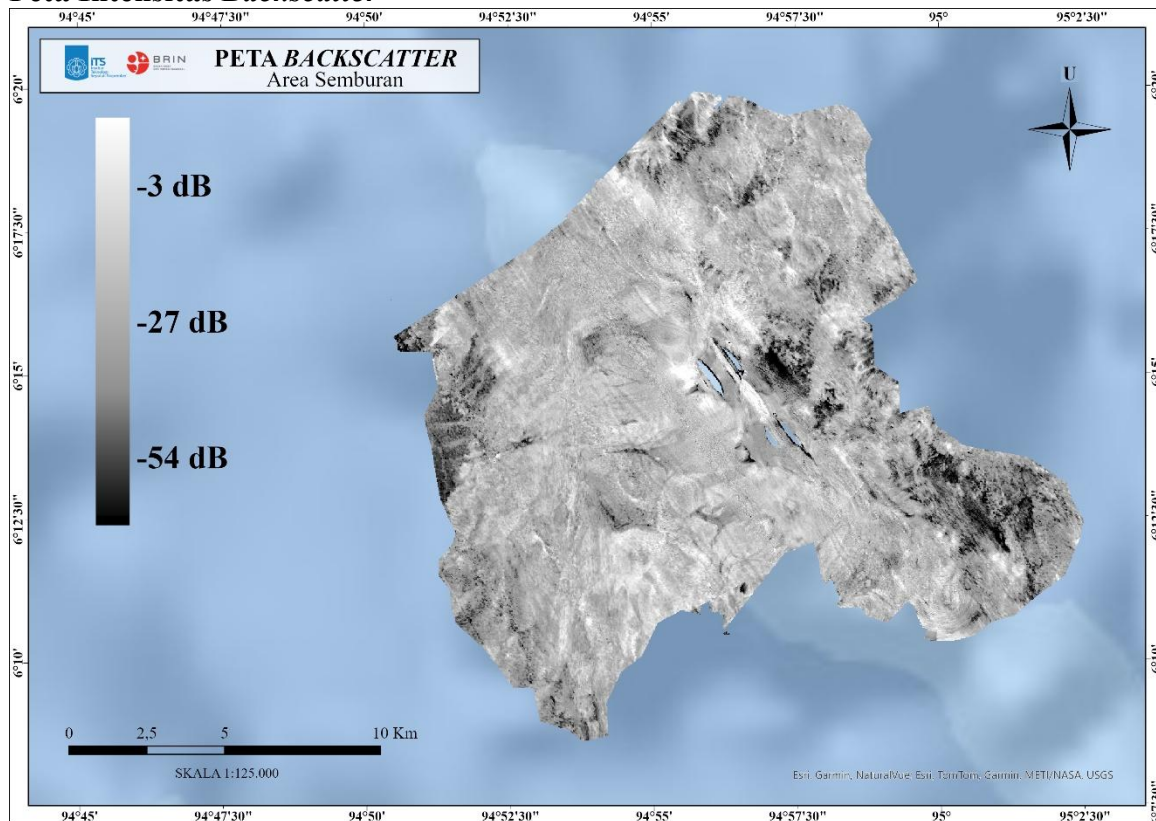


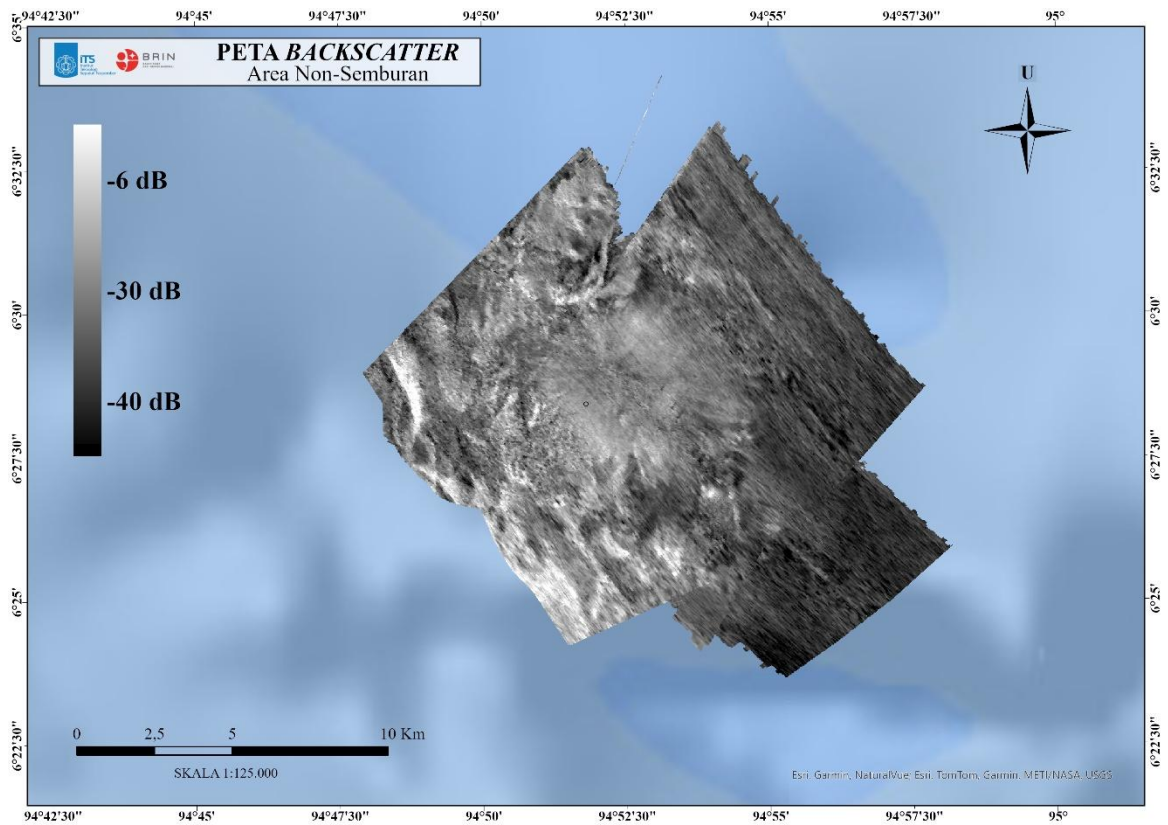
III. Peta Klasifikasi Struktur Morfologi



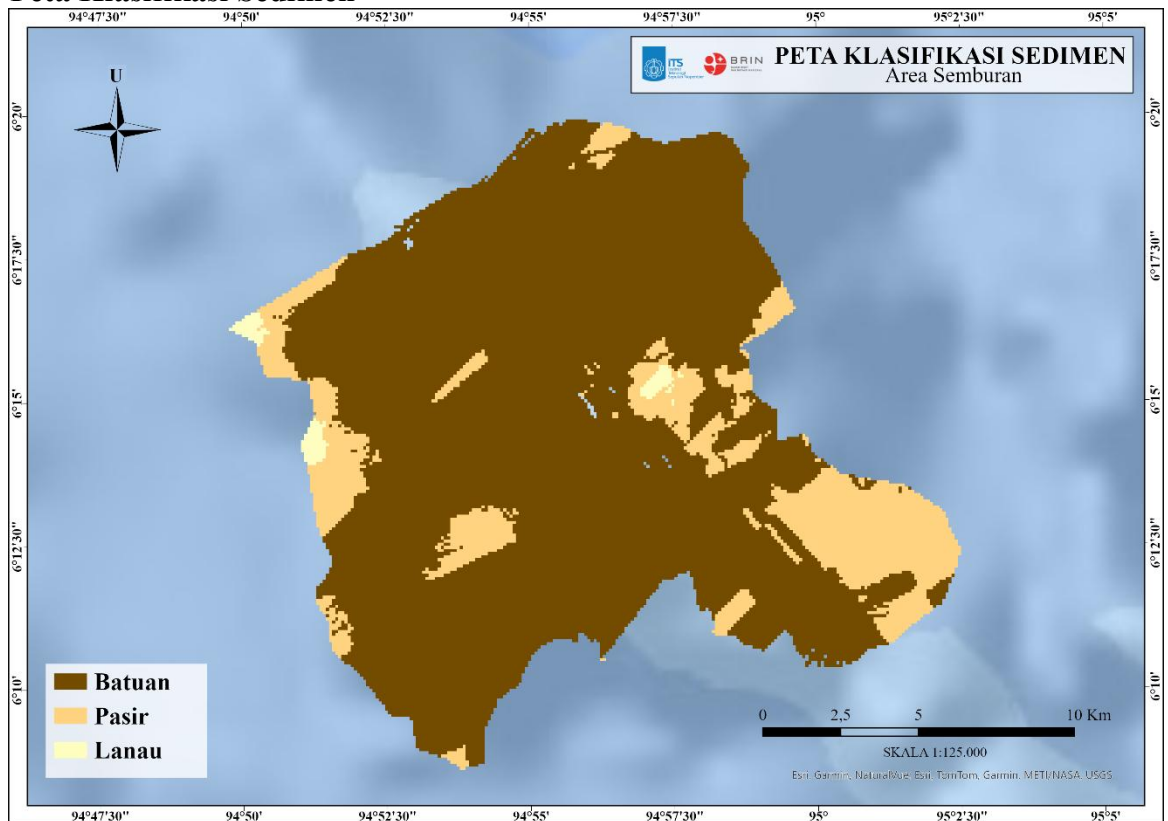


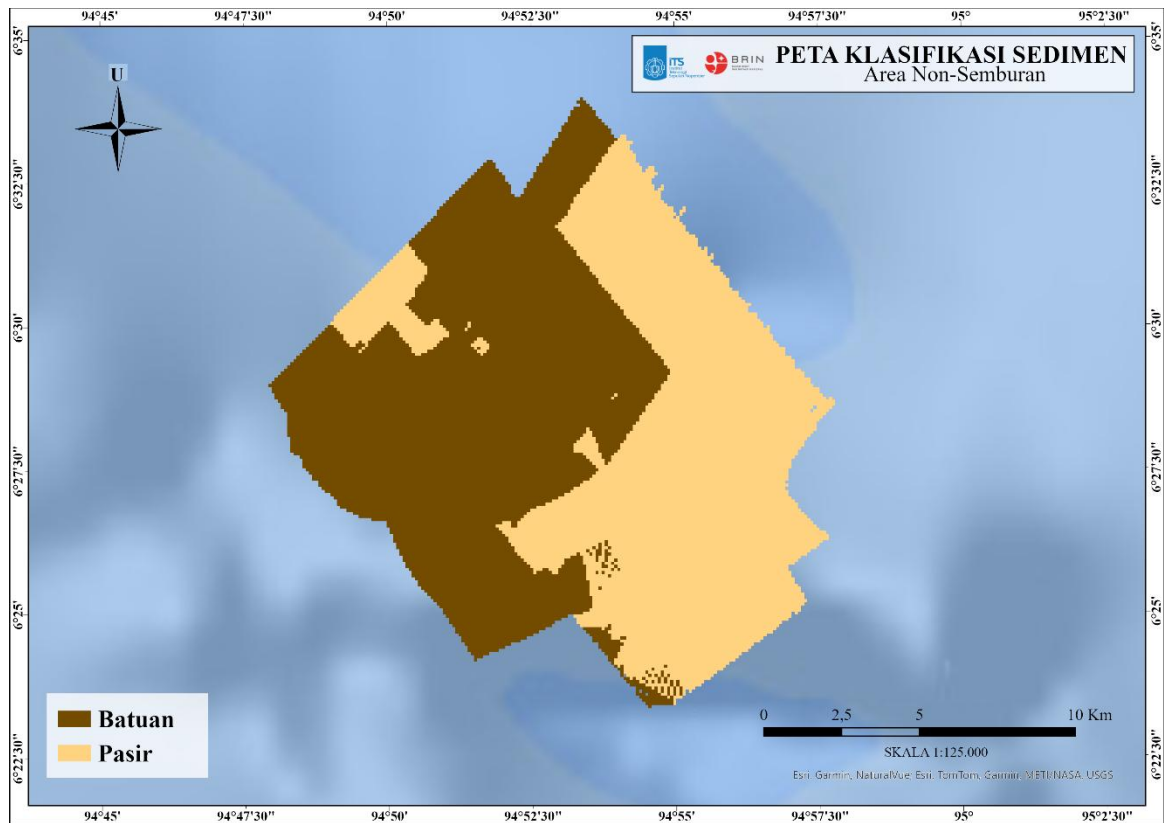
IV. Peta Intensitas *Backscatter*





V. Peta Klasifikasi Sedimen





BIODATA PENULIS



Raka Pediansyah Miharsa Lukito dilahirkan di Surabaya, 5 April 2004. Raka telah menempuh pendidikan formal yaitu di MAN Kota Surabaya. Setelah lulus dari SMA tahun 2022, Penulis mengikuti SBMPTN dan diterima di Departemen Teknik Geomatika FTSPK - ITS pada tahun 2022 dan terdaftar dengan NRP 5016221074. Selama aktivitas perkuliahan, Raka aktif di beberapa kegiatan organisasi yang terdapat di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Raka aktif di Himpunan Mahasiswa Geomatika (Himage) sebagai Badan Perwakilan Mahasiswa Geomatika dan Wakil Kepala Biro Pengembangan Sumber Daya Manusia Tingkat Lanjut Himage-ITS, Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) ITS sebagai Wakil Menteri Lingkungan Hidup dan Kebencanaan BEM ITS. Selain itu, Raka juga aktif dalam Kepanitiaan yang diselenggarakan oleh Departemen Teknik Geomatika dan Institut Teknologi Sepuluh Nopember, yakni dalam acara OKKBK Teknik Geomatika 2023, Geosentric 2023, Diesnatalis ITS ke-63, Civplan Olympic 2024, dan Gerigi ITS 2024. Dalam menyelesaikan syarat tugas akhir jenjang sarjana (S1), Raka memilih bidang keahlian Hidrografi dan Geologi Kelautan dengan judul penelitian “Perbandingan Sebaran Sedimen dan Morfologi Menggunakan Angular Response Analysis dan Bathymetry Position Index pada Zona Semburan dan Non-Semburan Gas”.