

**PEMBUATAN MODEL 3D STRATIFIKASI LAPISAN SEDIMEN DASAR LAUT  
MENGUNAKAN DATA BATHYMETRI DAN BACKSCATTER MBES  
(STUDI KASUS: TANJUNG BENOA, KABUPATEN BADUNG, PROVINSI BALI)**

**3D MODELING OF SEAFLOOR SEDIMENT STRATIFICATION USING MBES  
BATHYMETRY AND BACKSCATTER DATA**

*(Case Study: Tanjung Bena, Badung Regency, Bali Province)*

Zulkarnain<sup>1</sup>, Hery Purwanto, S.T., M.Sc.<sup>2</sup>, Krishna Himawan Subiyanto, S.T., M.Sc.<sup>3</sup>  
<sup>1,2,3</sup>Teknik Geodesi S-1, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Malang  
izulzulkarnain009@gmail.com

**ABSTRACK**

*The stratification of marine sediments plays a crucial role in various fields such as resource exploration, offshore infrastructure planning, and disaster mitigation. This study aims to construct a three-dimensional (3D) stratification model of seabed sediment layers in the Tanjung Bena waters, Badung Regency, Bali Province, using Multibeam Echosounder (MBES) data, including bathymetry and backscatter. The Angular Response Analysis (ARA) method was applied to classify sediments based on the relationship between backscatter intensity and acoustic beam angle, while the Angle-Varying Gain (AVG) algorithm was used to normalize backscatter intensity relative to the incidence angle. The sediment classification results were validated using borehole data to assess the model's accuracy. The 3D stratification model was developed using Leapfrog software, providing a vertical visualization of seabed sediment layers. The results demonstrate that integrating MBES data with the AVG and ARA algorithms can produce an accurate, efficient, and representative sediment stratification model compared to conventional borehole-based methods. This approach offers a cost-effective alternative for seabed sediment mapping with wider spatial coverage.*

**Keywords:** *Sediment Stratification, Multibeam Echosounder, Backscatter, AVG, ARA, 3D Model.*

**ABSTRAK**

Stratifikasi sedimen dasar laut memiliki peran penting dalam berbagai aspek seperti eksplorasi sumber daya, perencanaan infrastruktur lepas pantai, dan mitigasi bencana. Penelitian ini bertujuan untuk membangun model tiga dimensi (3D) stratifikasi lapisan sedimen dasar laut di wilayah Tanjung Bena, Kabupaten Badung, Provinsi Bali, menggunakan data *Multibeam Echosounder* (MBES) berupa batimetri dan backscatter. Metode *Angular Response Analysis* (ARA) diterapkan untuk klasifikasi sedimen berdasarkan hubungan antara intensitas hambur balik dan sudut pancaran akustik, sedangkan koreksi *Angle Varying Gain* (AVG) digunakan untuk menormalkan intensitas *backscatter* terhadap sudut insidensi. Hasil klasifikasi sedimen kemudian divalidasi menggunakan data pengeboran untuk menguji keakuratan model. Model 3D stratifikasi disusun menggunakan perangkat lunak Leapfrog, menghasilkan visualisasi vertikal dari lapisan sedimen dasar laut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi data MBES dengan algoritma AVG dan ARA mampu menghasilkan pemodelan stratifikasi yang cukup akurat, efisien, dan representatif dibanding metode konvensional berbasis bor. Pendekatan ini diharapkan dapat menjadi alternatif dalam pemetaan sedimen dasar laut dengan cakupan spasial yang lebih luas dan biaya yang lebih rendah.

**Kata Kunci:** Stratifikasi Sedimen, Multibeam Echosounder, Hamburan Balik, AVG, ARA, Model 3D.

**I PENDAHULUAN**

**1.1 Latar Belakang**

Stratifikasi sedimen dasar laut berperan penting dalam eksplorasi sumber daya, perencanaan infrastruktur lepas pantai, dan

mitigasi bencana. Salah satu teknologi yang kini banyak digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik dasar laut adalah *Multibeam Echosounder* (MBES), yang mampu menghasilkan data batimetri dan intensitas

pantulan akustik (*backscatter*). Data ini memungkinkan interpretasi spasial dan vertikal lapisan sedimen secara lebih efisien dibandingkan metode konvensional seperti pengeboran.

Namun, klasifikasi sedimen dari data *backscatter* memiliki tantangan, terutama akibat variasi sudut pancaran yang memengaruhi intensitas sinyal. Untuk mengatasi hal ini, digunakan algoritma *Angle Varying Gain* (AVG) untuk koreksi intensitas dan *Angular Response Analysis* (ARA) untuk klasifikasi sedimen berdasarkan hubungan sudut dan intensitas.

Penelitian ini dilakukan di perairan Tanjung Benoa, Kabupaten Badung, Provinsi Bali, yang merupakan wilayah pesisir dengan dinamika sedimentasi aktif akibat aktivitas antropogenik dan alami. Kawasan ini menjadi lokasi ideal untuk penerapan metode MBES karena kondisi batimetri yang dangkal serta adanya data pembanding berupa data *borehole* yang memungkinkan validasi hasil klasifikasi sedimen secara vertikal.

Hasil klasifikasi dari data *backscatter* yang telah dikoreksi kemudian diintegrasikan dengan data batimetri dan *borelog* untuk membangun model 3D stratifikasi lapisan sedimen dasar laut menggunakan perangkat lunak Leapfrog. Model ini tidak hanya menunjukkan sebaran horizontal sedimen, tetapi juga struktur vertikalnya, yang sangat dibutuhkan untuk perencanaan berbasis ruang dan pengelolaan wilayah laut secara berkelanjutan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan paparan pada bagian latar belakang di atas, rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil penerapan algoritma *Angular Response Analysis* (ARA) dalam analisis data *backscatter* yang telah dikoreksi menggunakan algoritma *Angle-Varying Gain* (AVG) untuk karakterisasi sedimen dasar laut?
2. Bagaimana visualisasi model 3D stratifikasi lapisan sedimen dasar laut?

## 1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

### Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis karakteristik sedimen dasar laut menggunakan data *backscatter* dengan

algoritma *Angle-Varying Gain* (AVG) dalam koreksi data *backscatter* dan algoritma *Angular Response Analysis* (ARA) untuk analisis karakterisasi lapisan sedimen.

2. Menghasilkan model visualisasi 3D stratifikasi lapisan sedimen dasar laut melalui integrasi data batimetri dan hasil klasifikasi *backscatter*, serta membandingkannya dengan data *borehole* sebagai referensi validasi.

### Manfaat

Manfaat yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi yang lebih akurat mengenai distribusi dan struktur vertikal sedimen dasar laut di wilayah perairan Tanjung Benoa
2. Menyediakan model 3D stratifikasi lapisan sedimen dasar laut yang dapat dimanfaatkan untuk keperluan eksplorasi sumber daya, perencanaan wilayah pesisir.
3. Menawarkan alternatif metode pemetaan sedimen yang lebih efisien dan ekonomis dibandingkan metode pengeboran dengan tetap mempertahankan tingkat akurasi yang baik melalui validasi titik bor.

## 1.4 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Penelitian dilakukan di perairan Tanjung Benoa.
2. Data yang digunakan terbatas pada data MBES dan pengeboran sebagai pembanding.
3. Model yang dibuat hanya mencakup lapisan sedimen dangkal.

## II METODOLOGI

### 2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di wilayah perairan Tanjung Benoa, Kabupaten Badung, Provinsi Bali. Lokasi penelitian berada dalam rentang koordinat (-8.756933, 115.213944) hingga (-8.760137, 115.215554) dengan luas area penelitian sekitar 4,2 km<sup>2</sup>. Lokasi penelitian merupakan perairan laut dangkal, yang dipengaruhi oleh tingginya laju sedimentasi di daerah tersebut. Proses sedimentasi ini

menyebabkan variasi karakteristik lapisan sedimen di dasar laut, yang menjadi objek utama dalam penelitian ini.



Gambar 1 lokasi penelitian di Tanjung Benoa Bali

## 2.2 Alat dan Bahan

### 1. Alat

Dalam penelitian tugas akhir yang dilakukan terdapat peralatan yang digunakan, antara lain:

- a. Perangkat Keras
  - PC Lenovo ThinkStation PX Workstation
  - Laptop Dell Inspiron 15-7000
- b. Perangkat Lunak
  - Software CARIS HIPS and SIPS
  - Software ArcGIS
  - Microsoft Office
  - Software Leapfrog

### 2. Bahan

Dalam penelitian tugas akhir yang dilakukan terdapat bahan berupa data yang digunakan, antara lain:

- Data Batimetri *Multibeam Echosounder*
- Data *Backscatter Multibeam Echosounder*
- Data *Sound Velocity Profiler (SVP)*
- Data Pasang Surut
- Data *Borehole Log*

## 2.3 Diagram Alir

Penelitian ini menggunakan beberapa tahapan yang diringkasi dan ditampilkan dalam gambar diagram alir sebagaimana berikut:

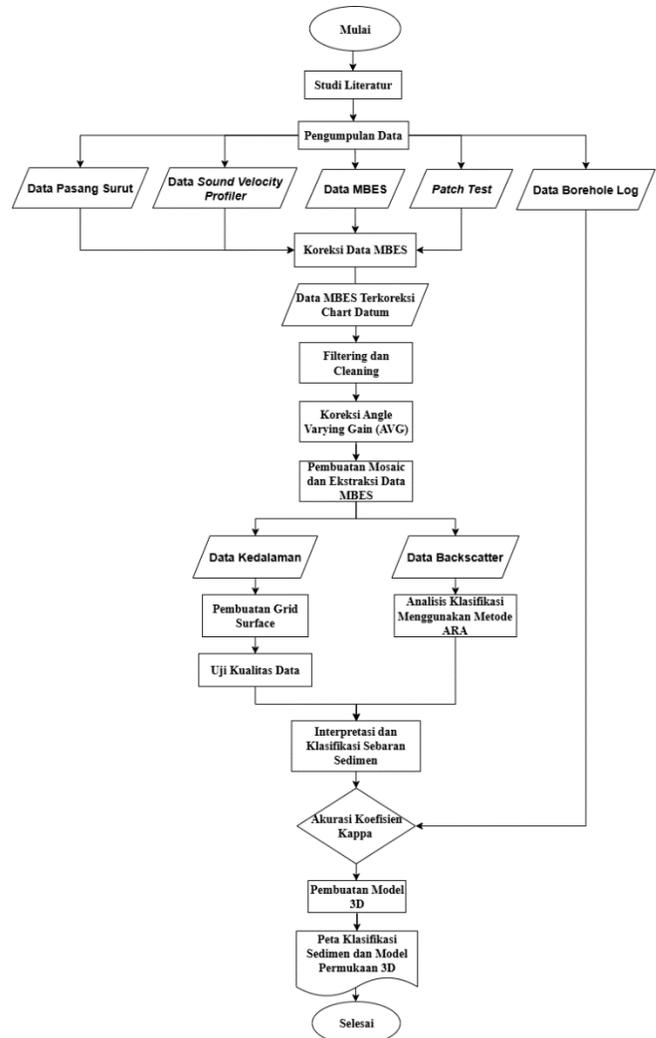


Diagram 2.1. Diagram alir pelaksanaan

## 2.4 Pengolahan Data Batimetri

Pengolahan data *Multibeam Echosounder* (MBES) dilakukan menggunakan perangkat lunak CARIS HIPS and SIPS. Tahapan pengolahan mengikuti prosedur standar mulai dari pembuatan proyek hingga menghasilkan data kedalaman terproses (*processed depth*). Tahap awal adalah pembuatan proyek baru dengan format HIPS File. Pada tahap ini, ditentukan nama proyek serta direktori penyimpanan file. Selanjutnya, dilakukan proses impor data mentah dengan memilih menu Import → Sensor Data, menyesuaikan format file mentah (raw data) yang digunakan, yaitu (.all), kemudian memasukkan berkas data mentah, file kapal (*vessel file*), serta mengaitkannya dengan proyek yang telah dibuat.

Setelah data berhasil diimpor, dilakukan georeferensi batimetri (*Georeference Bathymetry*) untuk memberikan informasi koordinat pada data yang belum memiliki referensi posisi. Input sumber data yang digunakan adalah seluruh track line hasil akuisisi. Proses ini dilanjutkan dengan koreksi kecepatan suara (*sound velocity correction*) dan referensi datum vertikal menggunakan data pasang surut (*tide*). Data *Sound Velocity Profile* (SVP) dimasukkan untuk mengoreksi kecepatan rambat gelombang suara di kolom air, sedangkan data pasang surut digunakan untuk mengoreksi elevasi kedalaman.

Tahap berikutnya adalah pembuatan *surface* model dengan memilih seluruh *track line*, menentukan resolusi grid, metode gridding (*Cube*), sistem koordinat, dan nama file keluaran. Setelah *surface* terbentuk, dilakukan pembersihan data dari *noise* (*cleaning noise*) melalui pembuatan subset tiles. Area yang mengandung *noise* diidentifikasi secara visual, kemudian ditandai dan dihapus menggunakan fungsi *reject*. Proses ini diulang hingga seluruh area bebas dari *noise* dan diberi status *complete area*.

Sebagai tahap akhir, data kedalaman diproses menjadi *Processed Depth* dengan menerapkan filter berdasarkan kriteria tertentu, seperti *surface*, *polygon*, dan *noise confidence*. Tahapan ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas data kedalaman yang akan digunakan pada analisis selanjutnya, seperti pemodelan batimetri, klasifikasi sedimen, dan integrasi ke dalam model 3D.

## 2.5 Pengolahan Data Backscatter

Pengolahan data multibeam backscatter menggunakan SIPS *Backscatter* (WMA with Area Base AVG) merupakan tahapan lanjutan setelah pengolahan *surface* data batimetri. Proses ini bertujuan menghasilkan citra mosaik *backscatter* yang merepresentasikan intensitas reflektivitas akustik dasar laut dalam format georeferensi.

Tahapan dimulai dengan memilih jalur survei (*track line*) yang telah melalui proses koreksi dan pembersihan data. Selanjutnya, dijalankan perintah SIPS *Backscatter* dengan metode *Weighted Mean Average* (WMA) with Area Base AVG, mengatur resolusi mosaik sesuai kebutuhan analisis

menentukan direktori penyimpanan hasil, serta memberi nama file untuk setiap jalur yang diproses.

Hasil pengolahan berupa citra mosaik *backscatter* dalam skala abu-abu, di mana perbedaan tingkat kecerahan menunjukkan variasi pantulan akustik sedimen dasar laut. Hasil mosaik ini kemudian diekspor menjadi data koordinat X, Y, Z melalui menu *Export* → *Coverages* → ASCII untuk digunakan pada tahap analisis klasifikasi sedimen atau integrasi ke dalam model tiga dimensi.

## 2.6 Uji Kualitas Data Batimetri

Uji kualitas data batimetri dilakukan untuk memastikan ketelitian vertikal hasil pengukuran *Multibeam Echosounder* (MBES) sesuai dengan standar *International Hydrographic Organization* (IHO) S-44 edisi ke-5.

**Tabel 1** minimum standar pengukuran batimetri

Orde	Spesial	1a	1b	2
Deskripsi area	Area dimana wilayah di bawah lunas kapal harus terpetakan seluruhnya	Area yang lebih dangkal dari 100 meter dan wilayah di bawah lunas kapal tidak harus terpetakan seluruhnya.	Area yang lebih dangkal dari 100 meter dan objek halangan dari wilayah bawah kapal tidak terlalu perlu dipetakan.	Area yang lebih dalam dari 100meter dimana secara umum gambaran dasar laut dianggap memadai.
Nilai TVU maksimum pada tingkat kepercayaan 95%	a = 0,25 meter b = 0,0075	a = 0,5 meter b = 0,013	a = 0,5 meter b = 0,0013	a = 1 meter b = 0,0023
Pemeriksaan dasar laut	Diperlukan	Diperlukan	Tidak diperlukan	Tidak diperlukan

Parameter yang digunakan adalah *Total Vertical Uncertainty* (TVU), yaitu nilai ketidakpastian vertikal maksimum yang dapat diterima dengan tingkat kepercayaan 95% (*confidence level* 95%). Penelitian ini menggunakan standar Order 1a/1b yang diperuntukkan bagi area survei umum atau keperluan selain pelayaran komersial berskala besar. Nilai TVU maksimum dihitung dengan persamaan  $TVU = \sqrt{a^2 + (b \times d)^2}$  di mana  $a = 0,5$  merupakan komponen kesalahan tetap,  $b = 0,013$  adalah koefisien kesalahan proporsional terhadap kedalaman, dan  $d$  adalah kedalaman perairan dalam meter.

Proses uji kualitas diawali dengan ekstraksi seluruh titik hasil pengukuran MBES yang telah melalui koreksi gerakan kapal (*roll, pitch, yaw, heave*), koreksi pasang surut, serta koreksi

kecepatan rambat suara (*Sound Velocity Profile*). Selanjutnya, nilai TVU dihitung untuk setiap titik dan dibandingkan dengan ambang batas TVU maksimum standar Order 1a/1b. Titik data dinyatakan memenuhi kriteria jika nilai TVU  $\leq$  TVU maksimum, dan tidak memenuhi jika nilai TVU melebihi ambang batas tersebut. Tahap akhir dilakukan analisis statistik untuk mengetahui jumlah, persentase, dan sebaran nilai TVU dari titik yang memenuhi dan tidak memenuhi standar. Melalui tahapan ini, data batimetri yang digunakan pada proses analisis lanjutan dapat dipastikan memiliki akurasi vertikal sesuai standar internasional sehingga layak digunakan untuk klasifikasi sedimen dan pembangunan model 3D stratifikasi lapisan sedimen dasar laut.

## 2.7 Pengelompokan dan Pengklasifikasian Sedimen Berdasarkan Ukuran (Wentworth, 1922)

Klasifikasi Wentworth (1922) merupakan sistem yang digunakan secara luas dalam sedimentologi untuk membedakan jenis sedimen berdasarkan ukuran butirnya. Dalam penelitian ini, hasil *Angular Response Analysis* (ARA) dari data *backscatter* kemudian dikelompokkan menjadi empat kelas utama, yaitu gravel, sand, silt, dan clay.

**Tabel 2** Ketentuan Sedimen Berdasarkan Ukuran (Wentworth, 1922)

Unified Soils Classification	ASTM Mesh	mm Size	Phi Value	Wentworth Classification	
COBBLE		256.0	-8.0	BOULDER	
		76.0	-6.25	COBBLE	
COARSE GRAVEL		64.0	-6.0	PEBBLE	
		19.0	-4.25		
FINE GRAVEL		4	4.76	GRAVEL	
	coarse	5	4.0		-2.0
SAND		10	2.0	very coarse	
	medium	18	1.0	0.0	coarse
		25	0.5	1.0	medium
	fine	40	0.425	1.25	fine
		60	0.25	2.0	
SILT		120	0.125	3.0	very fine
		200	0.074	3.75	
CLAY		230	0.062	4.0	SILT
			0.0039	8.0	CLAY
			0.0024	12.0	COLLOID

Proses klasifikasi dilakukan dengan menghubungkan nilai intensitas hambur balik (*backscatter*) terhadap karakter kekerasan permukaan dasar laut. Nilai *backscatter* yang tinggi menunjukkan sedimen berbutir kasar dan keras (misalnya *gravel*), sedangkan nilai yang rendah mengindikasikan sedimen halus dan lunak (misalnya *clay*).

Data intensitas *backscatter* yang telah dihasilkan dari *mosaicking* diekspor menjadi format X, Y, Z, lalu diolah menggunakan Microsoft Excel untuk menentukan batasan setiap kelas sedimen. Rentang nilai intensitas untuk tiap kelas mengacu pada referensi hasil penelitian terdahulu dan disesuaikan dengan kondisi akustik wilayah studi. Hasil klasifikasi ini menjadi dasar dalam pembuatan peta distribusi sedimen yang merepresentasikan persebaran spasial material dasar laut di perairan Tanjung Benoa.

## 2.8 Validasi Klasifikasi Sedimen dengan Data Boring

Validasi hasil klasifikasi sedimen dilakukan untuk memastikan bahwa peta distribusi sedimen yang diperoleh dari analisis *backscatter* MBES memiliki tingkat akurasi yang memadai terhadap kondisi sebenarnya di lapangan. Tahap ini memanfaatkan data pengeboran sebagai pembandingan. Data koordinat titik pengeboran yang telah disiapkan dalam format *comma separated values* (.csv) dimasukkan ke dalam perangkat lunak ArcGIS menggunakan menu Add Data → Add XY Data. Pada proses ini, kolom koordinat X (*longitude*), Y (*latitude*), dan kedalaman (*depth*) disesuaikan agar titik pengeboran dapat ditampilkan dengan posisi yang tepat di atas peta klasifikasi sedimen.

Setelah titik pengeboran ditampilkan, dilakukan proses *spatial join* untuk menggabungkan informasi kelas sedimen hasil klasifikasi ke setiap titik pengeboran. Proses ini dilakukan melalui *ArcToolbox* → *Analysis Tools* → *Overlay* → *Spatial Join*, dengan pengaturan *Target Features* pada layer titik pengeboran dan *Join Features* pada layer peta klasifikasi sedimen.

Hasil *spatial join* menghasilkan layer baru yang berisi atribut koordinat, kedalaman, dan

kelas sedimen untuk masing-masing titik pengeboran. Data ini kemudian dianalisis lebih lanjut dengan membandingkan kelas sedimen hasil klasifikasi *backscatter* MBES dengan deskripsi sedimen dari hasil pengeboran. Perbandingan ini digunakan untuk menilai tingkat kesesuaian dan akurasi metode klasifikasi berbasis data MBES terhadap kondisi geologi dasar laut yang sebenarnya.

### 2.9 Uji Akurasi Menggunakan Matriks Konfusi

Matriks konfusi (*confusion matrix*) merupakan salah satu metode statistik yang digunakan untuk mengevaluasi akurasi hasil klasifikasi dalam pengolahan data spasial, khususnya dalam penginderaan jauh. Matriks ini berbentuk tabel persegi yang menunjukkan perbandingan antara data hasil klasifikasi dengan data referensi atau kebenaran lapangan (*ground truth*) (BIG, 2014).

*Error Matrix/Confusion Matrix* adalah penilaian akurasi menggunakan suatu matriks kontingensi yaitu suatu matriks bujur sangkar yang memuat hubungan antara sampel terklasifikasi dan hasil uji lapangan (BIG, 2014).

Untuk kasus multi-kelas (lebih dari dua), nilai-nilai tersebut dikembangkan dalam bentuk matriks, dengan diagonal utama menunjukkan klasifikasi yang benar dan nilai di luar diagonal menunjukkan klasifikasi yang salah (Foody, 2002).

**Tabel 3** Bentuk Confussion Matrix (BIG, 2014)

DATA TERKLASIFIKASI	DATA			Total Baris	Ketelitian Pembuat
	a	b	c		
A	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{1+}$	$X_{11}/X_{1+}$
B	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	$X_{2+}$	$X_{22}/X_{2+}$
C	$X_{31}$	$X_{32}$	$X_{33}$	$X_{3+}$	$X_{33}/X_{3+}$
Total Kolom	$X_{+1}$	$X_{+2}$	$X_{+3}$	$N$	
Ketelitian Pengguna	$X_{11}/X_{+1}$	$X_{22}/X_{+2}$	$X_{33}/X_{+3}$		

Beberapa persamaan fungsi yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\text{User's Accuracy} = \frac{X_{11}}{X_{1+}} \times 100\%$$

$$\text{Producer's Accuracy} = \frac{X_{11}}{X_{+1}} \times 100\%$$

$$\text{Overall Accuracy} = \left( \sum_{i=1}^r X_{ii} / N \right) \times 100\%$$

$$\text{Koefisien kappa} = \hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}$$

Keterangan:

- A,B,C = Atribut objek pada peta
- a,b,c = Atribut objek di lapangan
- N = Banyaknya piksel dalam contoh
- X<sub>1+</sub> = Jumlah piksel dalam baris ke-i
- X<sub>+1</sub> = Jumlah piksel dalam kolom ke-i
- X<sub>ii</sub> = Nilai diagonal dari matriks kontingensi baris ke-i dan kolom ke-i

Koefisien kappa mengukur tingkat kesepakatan antara hasil klasifikasi dan data referensi, dikoreksi terhadap kesepakatan yang terjadi.

**Tabel 4** Interpretasi nilai Kappa (Landis dan Koch, 1977)

Kappa Statistic	Strength Of Agreement
< 0.00	Poor
0.00 – 0.20	Slight
0.21 – 0.40	Fair
0.41 – 0.60	Moderate
0.61 – 0.80	Substantial
0.81 – 1.00	Almost perfect

### 2.10 Permodelan 3D pada Software Leapfrog

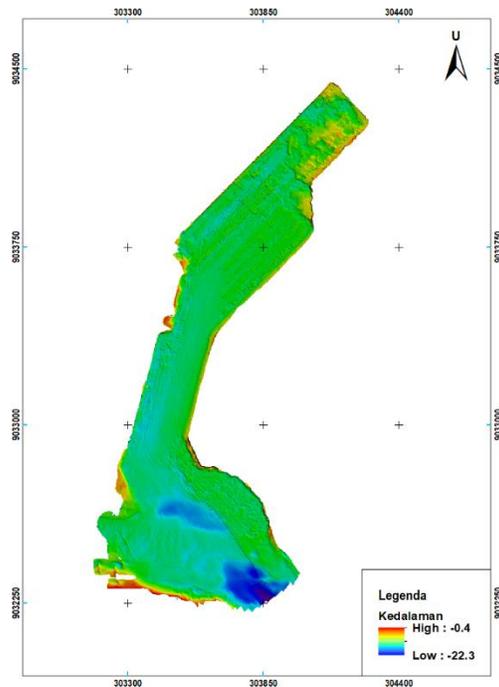
Pemodelan stratifikasi sedimen dilakukan menggunakan perangkat lunak Leapfrog 5.1. Tahap awal dimulai dengan membuat project baru dan menyimpannya pada direktori yang diinginkan. Selanjutnya, data *collar* yang berisi informasi koordinat dan elevasi serta data litologi (jenis sedimen) diimpor ke dalam perangkat lunak. Format kolom disesuaikan dengan standar Leapfrog, dan dilakukan pemeriksaan awal untuk memastikan tidak terdapat data kosong, kesalahan penulisan, atau duplikasi.

Data topografi dalam format .xyz kemudian diimpor sebagai batas atas model. Integrasi data bor dengan permukaan topografi dilakukan agar posisi lapisan sedimen merepresentasikan kondisi sebenarnya di lapangan. Berdasarkan data litologi, dibuat permukaan antar lapisan untuk memisahkan unit sedimen, dengan lapisan sand ditempatkan di atas *clay* sesuai urutan

sedimentasi alami. Resolusi permukaan diatur agar model memiliki detail yang memadai namun tetap efisien saat divisualisasikan. Proses pemodelan menghasilkan representasi tiga dimensi lapisan geologi yang memperlihatkan stratifikasi sedimen secara jelas, sehingga dapat dianalisis dari berbagai sudut pandang untuk interpretasi geologi yang lebih akurat.

### III HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Analisis Surface Batimetri Data MBES



Gambar 2 Tampilan Surface Batimetri MBES

Setelah seluruh data MBES dikoreksi, termasuk koreksi posisi, kecepatan suara (*sound velocity*), pasang surut (*tide correction*), dan gerakan kapal (*motion*), dilakukan proses pembuatan *surface* batimetri. Hasil visualisasi menunjukkan model permukaan dasar laut di wilayah Tanjung Bena memiliki sebaran kedalaman yang bervariasi, dengan rentang antara 0,4 meter hingga 22,3 meter. Pewarnaan permukaan berdasarkan kedalaman menggunakan skema warna *Rainbow Map*, di mana warna biru tua merepresentasikan area terdalam, yang tampak berada di bagian selatan area studi dan kemungkinan merupakan alur

pelayaran atau palung lokal. Sementara itu, warna hijau hingga kuning mendominasi area

tengah dengan kedalaman sedang, dan warna merah hingga oranye menunjukkan area dangkal di bagian tepi, yang kemungkinan besar merupakan zona pesisir atau endapan dangkal seperti bar pasir atau terumbu.

Secara visual, model *surface* yang dihasilkan tampak halus dan kontinu tanpa adanya artefak seperti *striping* atau *noise*, yang menandakan bahwa proses koreksi data telah dilakukan dengan baik dan interpolasi berjalan optimal. *Surface* batimetri ini memberikan representasi topografi dasar laut yang akurat dan dapat digunakan sebagai dasar untuk analisis lanjutan, seperti identifikasi morfologi dasar laut dan pemodelan stratifikasi sedimen dalam tiga dimensi.

#### 3.2 Hasil Uji Kualitas Data Batimetri Berdasarkan Nilai TVU

Tabel 5 Hasil Perhitungan Kualitas Data TVU

Perhitungan TVU Survei MBES									
IHO Order 1 (Confidence Level 95%)							Confidence Level 95%	1.96	
a	0.5					Jumlah Data	9719	Persentase	
b	0.013					Jumlah Diter	9410	96.82%	=
						Jumlah Ditolak	309	3.18%	Order 1a/ab
ID Cross	X	Y	Depth_Cross	Depth_Utama	STDEV	Standard Error	Confidence Interval	TVU	KETERANGAN
C1	303265.25	9032420.75	-12.320382	-12.26	0.0427	0.0302	0.0592	0.5248	DITERIMA
C2	303264.75	9032421.75	-11.992415	-11.99	0.0017	0.0012	0.0024	0.5237	DITERIMA
C3	303264.75	9032421.25	-12.21306	-12.14	0.0502	0.0355	0.0696	0.5243	DITERIMA

Berdasarkan uji kualitas data batimetri dari hasil survei Multibeam Echosounder (MBES) yang dilakukan dengan mengacu pada standar Total Vertical Uncertainty (TVU) yang ditetapkan oleh *International Hydrographic Organization* (IHO) S-44 edisi ke-5. Parameter ini digunakan untuk mengukur ketidakpastian vertikal maksimum yang masih dapat diterima pada pengukuran kedalaman laut, dengan tingkat kepercayaan 95% (*confidence level* 95%).

Berdasarkan hasil pengolahan dan evaluasi terhadap 9.888 titik pengamatan, diperoleh bahwa sebanyak 9.410 titik (96.82%) dinyatakan memenuhi kriteria ambang batas TVU Order 1a/1b, sedangkan 309 titik (3.18%) dinyatakan tidak memenuhi. Seluruh titik yang diterima memiliki nilai TVU berkisar antara 0.5017 hingga 0.5374 meter.

Nilai-nilai ini dihasilkan setelah data melalui proses koreksi, yaitu koreksi gerakan kapal (*roll, pitch, yaw, heave*), koreksi pasang surut, dan koreksi kecepatan rambat suara (SVP). Hal ini menunjukkan bahwa pengolahan data MBES

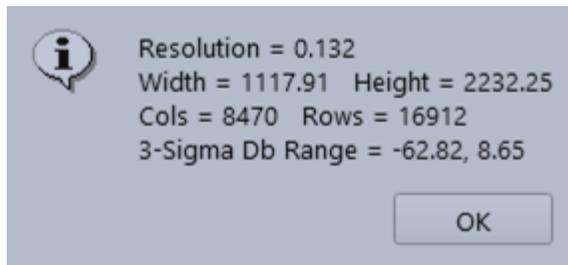
dilakukan dengan benar dan sistematis, serta mampu menghasilkan data batimetri dengan tingkat ketelitian vertikal yang tinggi. Dengan capaian ini, dapat disimpulkan bahwa data batimetri hasil survei MBES di wilayah Tanjung Benoa layak digunakan untuk proses lanjutan seperti klasifikasi sedimen, hingga pembangunan model 3D stratifikasi sedimen dasar laut.

### 3.3 Hasil Penerapan Algoritma *Angle Varying Gain* pada Data *Backscatter*

#### a. Hasil Penerapan *Mosaic Backscatter* tanpa Koreksi *Angle Varying Gain* (AVG)



**Gambar 3** Hasil backscatter tanpa algoritma AVG



**Gambar 4** Nilai statistic backscatter tanpa koreksi AVG

Setelah data batimetri diperoleh, dilakukan pemrosesan mosaik *backscatter* untuk menggambarkan distribusi intensitas pantulan dasar laut. Pada tahap awal, *mosaic backscatter* dihasilkan tanpa penerapan algoritma *Angle-Varying Gain* (AVG), sehingga variasi intensitas masih sangat dipengaruhi oleh sudut pancaran sinyal akustik.

Hasil *mosaic backscatter* tanpa koreksi AVG memperlihatkan citra yang cenderung kasar, tidak homogen, serta terdapat pola strip antar lintasan yang jelas terlihat. Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan sudut sapuan beam sonar saat proses akuisisi data, di mana intensitas pantulan dari arah nadir cenderung lebih kuat, sedangkan dari sudut luar semakin melemah. Variasi ini menghasilkan distribusi nilai intensitas *backscatter* yang tidak konsisten, sehingga memunculkan artefak visual yang dapat mengganggu interpretasi sedimen dasar laut.

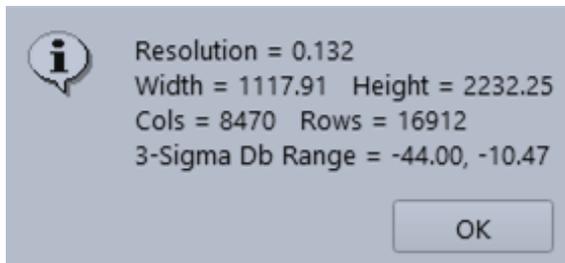
Berdasarkan analisis statistik, rentang 3-Sigma dB pada hasil mosaik *backscatter* non-AVG berada di kisaran -62.82 dB hingga 8.65 dB, di mana nilai maksimum yang positif menunjukkan adanya distorsi data akibat noise dan artefak pantulan yang tidak berasal dari karakteristik alami dasar laut. Hal ini sesuai dengan teori yang dijelaskan pada Bab II, di mana sinyal pantulan yang tidak dikoreksi dapat menampilkan variasi intensitas yang tidak merepresentasikan kondisi sebenarnya (Fonseca & Calder, 2007).

Kondisi ini membuktikan bahwa hasil *mosaic backscatter* tanpa koreksi AVG belum dapat digunakan secara optimal dalam interpretasi distribusi dan klasifikasi sedimen dasar laut karena tingkat kehomogenan data yang rendah dan adanya distorsi visual.

#### b. Hasil Penerapan *Mosaic Backscatter* dengan Koreksi *Angle-Varying Gain* (AVG)



**Gambar 5** Hasil backscatter dengan algoritma AVG



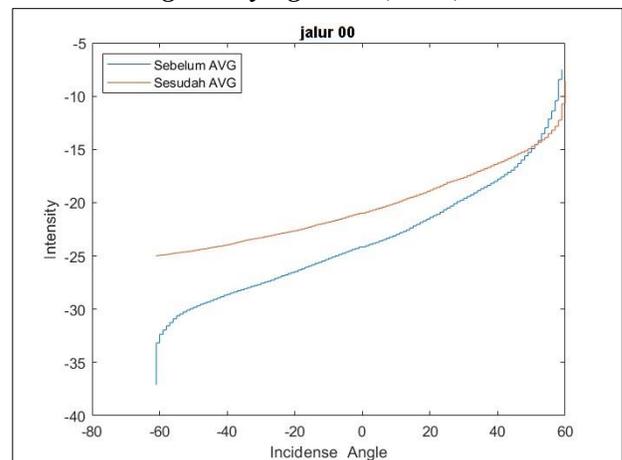
**Gambar 6** Hasil statistic backscatter dengan koreksi AVG

Setelah diterapkan koreksi *Angle-Varying Gain* (AVG) pada data *mosaic backscatter*, hasil yang diperoleh menunjukkan perbaikan signifikan dalam kualitas visual dan interpretasi distribusi intensitas pantulan dasar laut. Hasil *mosaic backscatter* hasil koreksi AVG tampak jauh lebih homogen, dengan persebaran intensitas yang konsisten di seluruh area cakupan. Pola strip antar lintasan yang sebelumnya sangat terlihat menjadi sangat berkurang, sehingga artefak visual akibat perbedaan sudut sapuan beam sonar pada saat akuisisi data dapat diminimalisir.

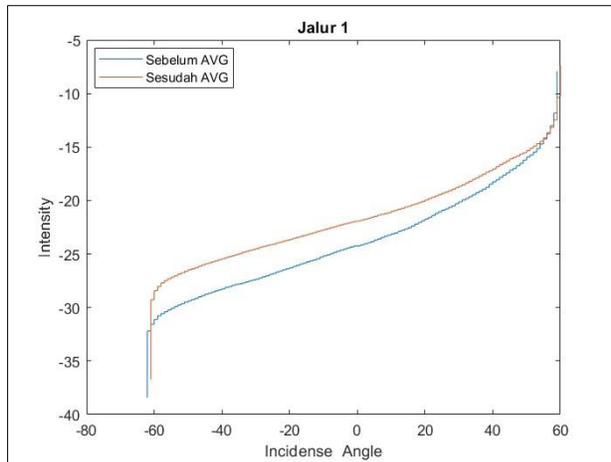
Koreksi AVG juga berhasil mengurangi variasi intensitas yang dipengaruhi oleh sudut pancaran, terutama perbedaan yang signifikan antara intensitas nadir dan sisi luar beam sonar. Dengan demikian, hasil visual menjadi lebih halus dan natural tanpa pola-pola tegas atau striping yang dapat mengganggu interpretasi sedimen. Berdasarkan tampilan statistik, rentang 3-Sigma dB setelah koreksi AVG berada di kisaran -44.00 dB hingga -10.47 dB, yang jauh lebih realistis dan tidak menunjukkan adanya nilai ekstrem akibat. Hal ini menjadikan data lebih representatif terhadap karakteristik alami dasar laut.

Dengan distribusi intensitas yang lebih homogen dan tanpa distorsi berarti, hasil *mosaic backscatter* setelah koreksi AVG sudah layak digunakan untuk analisis lebih lanjut, seperti klasifikasi dan pemetaan distribusi sedimen dasar laut. Nilai reflektivitas yang didapat menjadi lebih kredibel untuk mengidentifikasi perbedaan substrat dan tekstur sedimen. Temuan ini sesuai dengan teori dalam literatur, misalnya Fonseca & Calder (2007), yang menegaskan bahwa koreksi AVG adalah langkah penting dalam pengolahan data *backscatter* untuk memastikan interpretasi sifat akustik dasar laut tidak bias oleh artefak akuisisi.

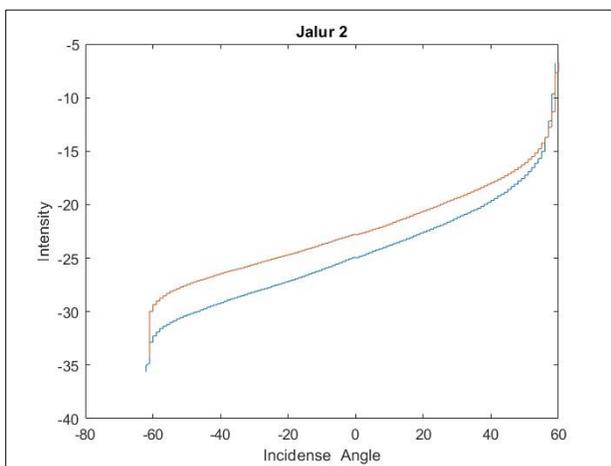
### c. Grafik *Angle Varying Gain* (AVG)



**Gambar 7** Hasil Grafik Koreksi AVG



**Gambar 8** Hasil Grafik Koreksi AVG



**Gambar 9** Hasil Grafik Koreksi AVG

Beberapa contoh grafik pada gambar 4.7- 4.9 dari Jalur 00, Jalur 1, dan Jalur 2 menunjukkan perbedaan bentuk kurva sebelum dan sesudah diterapkan koreksi AVG. Sebelum koreksi, kurva tampak menurun tajam di bagian sudut ekstrim, namun setelah dikoreksi, bentuk kurva menjadi lebih halus dan konsisten di seluruh rentang sudut. Hal ini menunjukkan bahwa efek sudut telah berhasil dikompensasi dengan baik.

Peningkatan juga terlihat secara visual pada *mosaic backscatter*. Sebelum AVG, citra mosaik masih menunjukkan pola striping antar lintasan akibat perbedaan intensitas. Namun setelah dilakukan koreksi, mosaik menjadi lebih halus dan homogen, tanpa adanya pola belang yang mengganggu. Distribusi intensitas *backscatter* setelah koreksi juga lebih representatif terhadap kondisi fisik dasar laut, seperti variasi jenis dan tekstur sedimen.

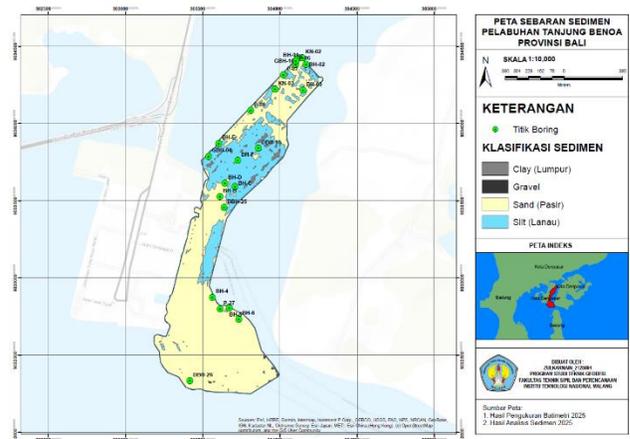
Secara statistik, rentang 3 sampel dari nilai intensitas *backscatter* hasil koreksi berada pada kisaran -44.00 dB hingga -10.47 dB, seluruhnya berada dalam nilai negatif yang umum untuk hamburan balik dasar laut. Rentang ini menunjukkan bahwa data sudah terstandarisasi dan noise sudah berkurang.

Selain meningkatkan kualitas visual, penerapan AVG juga berpengaruh langsung pada akurasi klasifikasi sedimen. Setelah dikoreksi, pola hubungan antara intensitas dan sudut dapat dianalisis dengan lebih akurat melalui metode *Angular Response Analysis* (ARA), sehingga hasil klasifikasi sedimen menjadi lebih valid dan mendekati kondisi geologi sebenarnya.

Dengan demikian, penggunaan AVG merupakan tahapan penting dalam pengolahan data MBES. Koreksi ini tidak hanya memperbaiki kualitas data secara visual dan statistik, tetapi juga meningkatkan keandalan interpretasi dalam proses pemodelan 3D stratifikasi lapisan sedimen dasar laut.

### 3.4 Hasil Analisis Klasifikasi Sedimen Menggunakan Algoritma *Angular Response Analysis* (ARA)

FID	Shape *	Id	gridcode	Nilai_Phi	Kelas	Luas (Ha)
3	Polygon	17	1	(-8) - (-1)	Gravel	0.130718
2	Polygon	4	2	(-1) - (4)	Sand	58.00981
0	Polygon	1	3	(4) - (8)	Silt	20.334887
1	Polygon	3	4	(8) - (14)	Clay	0.923406



**Gambar 10** Hasil Klasifikasi Sedimen

Gambar hasil klasifikasi sebaran sedimen dasar laut di wilayah perairan Tanjung Benoa,

Bali, diperoleh melalui analisis data *backscatter* MBES yang telah dikoreksi menggunakan algoritma *Angle-Varying Gain* (AVG) dan diklasifikasikan dengan metode *Angular Response Analysis* (ARA). Koreksi AVG berfungsi untuk menormalkan intensitas pantulan terhadap variasi sudut pancaran, sehingga distribusi nilai *backscatter* yang dihasilkan benar-benar mencerminkan karakteristik fisik dasar laut dan tidak terdistorsi oleh efek sistemik dari sensor MBES. Hal ini sesuai dengan teori yang dijelaskan dalam Bab II, di mana koreksi AVG merupakan tahap krusial dalam standardisasi data akustik sebelum proses klasifikasi (Fonseca & Calder, 2007).

Selanjutnya, metode ARA diterapkan untuk mengidentifikasi jenis sedimen berdasarkan pola hubungan antara sudut pancaran dan intensitas pantulan. Tiap jenis sedimen memiliki respons sudut yang unik, yang memungkinkan pengelompokan secara kuantitatif berdasarkan nilai pantulan akustiknya. Sebagaimana dijelaskan dalam Bab II, sedimen kasar seperti gravel menghasilkan pantulan tinggi pada sudut kecil, sedangkan sedimen halus seperti clay memiliki respons yang lebih lemah dan merata (Setiawan et al., 2023).

Awalnya, hasil klasifikasi menghasilkan 11 kelas nilai intensitas *backscatter*, namun demi kejelasan interpretasi, kelas tersebut disederhanakan menjadi empat kategori utama berdasarkan nilai Phi ( $\Phi$ ), yaitu *gravel* ( $\Phi$ : -8 s.d -1), *sand* ( $\Phi$ : -1 s.d 4), *silt* ( $\Phi$ : 4 s.d 8), dan *clay* ( $\Phi$ : 8 s.d 14). Setiap kelas direpresentasikan dalam peta dengan warna berbeda: kuning untuk *sand*, biru untuk *silt*, hijau cerah untuk *clay*, dan coklat gelap untuk *gravel*.

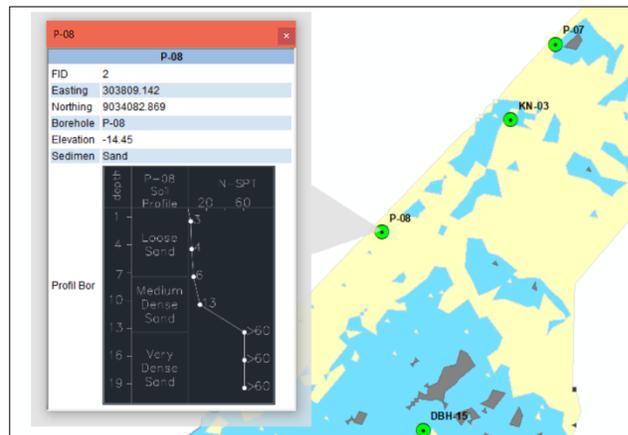
Berdasarkan peta hasil klasifikasi, sedimen sand (pasir) merupakan jenis yang paling luas tersebar dengan total luasan mencapai 58,01 hektar. Pasir banyak ditemukan di bagian selatan dan sepanjang tepi wilayah survei, yang merupakan zona dengan energi tinggi akibat arus laut dan gelombang, sehingga hanya sedimen kasar seperti pasir yang tertinggal. Sedimen *silt* (lanau) dengan luas sekitar 20,33 hektar mendominasi area tengah wilayah, yang merupakan zona dengan energi arus sedang. Sementara itu, sedimen *clay* (lempung) ditemukan secara terbatas di bagian utara wilayah dengan luas hanya 0,92 hektar, mengendap di cekungan tenang

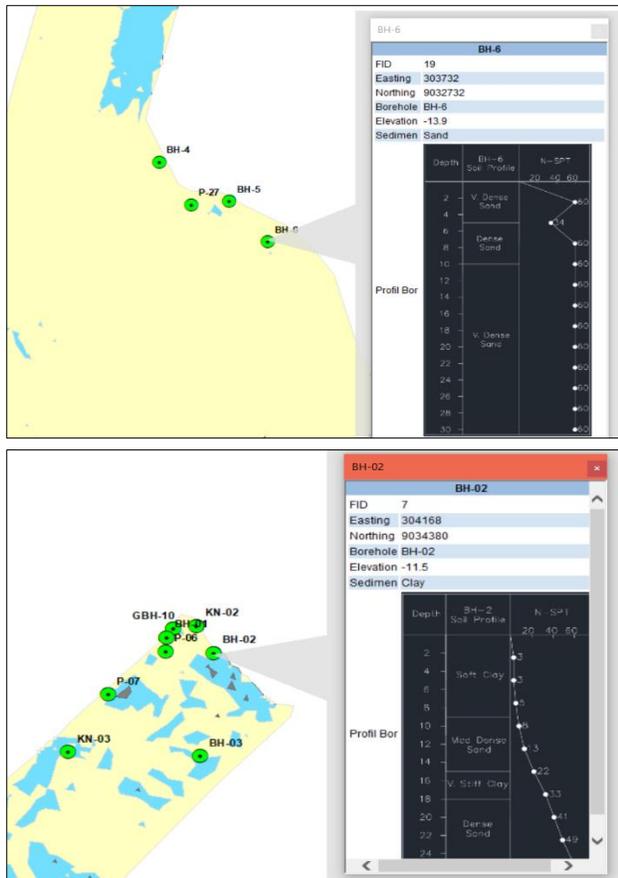
yang terlindung dari dinamika arus. Jenis *gravel* memiliki sebaran yang paling kecil, yakni sekitar 0,13 hektar, dan ditemukan secara lokal. Keberadaan gravel diduga berkaitan dengan substrat keras atau singkapan geologi dasar laut yang tidak tertutupi oleh sedimen halus.

Secara keseluruhan, hasil klasifikasi menunjukkan bahwa sebagian besar dasar laut di wilayah Tanjung Benoa terdiri dari sedimen bertekstur kasar hingga sedang. Penerapan koreksi AVG dan metode ARA terbukti efektif dalam menghasilkan peta klasifikasi sedimen yang akurat dan representatif. Distribusi sedimen yang ditampilkan pada peta sesuai dengan karakteristik lingkungan laut setempat dan mendukung analisis stratifikasi sedimen untuk model 3D yang akan dibangun pada tahap selanjutnya dalam penelitian ini.

Secara keseluruhan, distribusi spasial sedimen mencerminkan kondisi energi lingkungan laut Tanjung Benoa, di mana sedimen halus terakumulasi di zona tenang dan sedimen kasar mendominasi zona berenergi tinggi. Kombinasi antara koreksi AVG dan metode ARA terbukti efektif dalam menghasilkan peta sebaran sedimen yang tidak hanya akurat secara akustik, tetapi juga relevan secara geologi dan geomorfologi. Hasil klasifikasi ini menjadi dasar penting dalam tahapan selanjutnya untuk membangun model 3D stratifikasi lapisan sedimen, yang akan menggambarkan kondisi bawah permukaan laut secara lebih komprehensif.

### 3.5 Analisis Hasil Klasifikasi dengan Data Borehole





**Gambar 11** Tampilan hasil klasifikasi dengan litologi data bor

Berdasarkan tiga gambar *borehole* yang dilampirkan (P-08, BH-6, dan BH-02), Pada titik *borehole* P-08, klasifikasi sedimen menunjukkan dominasi pasir (*Sand*), yang sesuai dengan data *borehole* yang memperlihatkan seluruh lapisan terdiri dari *Loose Sand*, *Medium Dense Sand*, hingga *Very Dense Sand* dari permukaan hingga kedalaman sekitar 18 meter. Hal ini menunjukkan kesesuaian yang sangat baik antara hasil klasifikasi dan kondisi bawah permukaan. Demikian pula pada titik BH-6, klasifikasi sebagai *Sand* juga dikonfirmasi oleh data *borehole* yang seluruhnya terdiri dari pasir dengan kepadatan tinggi (*Dense* hingga *Very Dense Sand*) hingga kedalaman 30 meter. Kedua lokasi ini menunjukkan korelasi yang sangat kuat antara data klasifikasi permukaan dan hasil pengeboran. Sementara itu, pada titik BH-02, klasifikasi permukaan menunjukkan sedimen bertipe lempung (*Clay*). Data *borehole* menunjukkan lapisan *Soft Clay* pada kedalaman 0–6 meter dan *Very Stiff Clay* pada

kedalaman 10–16 meter, yang mendukung klasifikasi tersebut. Namun, keberadaan lapisan *Medium Dense Sand* dan *Dense Sand* pada kedalaman menengah hingga dalam menunjukkan bahwa klasifikasi permukaan tidak sepenuhnya mencerminkan kondisi bawah permukaan secara vertikal. Oleh karena itu, meskipun klasifikasi pada BH-02 cukup sesuai pada bagian atas, validasi menggunakan data *borehole* menunjukkan pentingnya mempertimbangkan variasi vertikal sedimen dalam interpretasi geologi bawah permukaan.

Dari total 22 titik bor yang dianalisis, sebagian besar menunjukkan korelasi yang baik antara hasil klasifikasi sedimen permukaan (berdasarkan interpretasi peta klasifikasi seperti dari citra *backscatter*) dan data *borehole* yang merepresentasikan kondisi bawah permukaan secara vertikal. Namun demikian, terdapat lima titik yang menunjukkan ketidaksesuaian signifikan, yaitu BH-C, BH-02, BH-F, GBH-4, DBH-25, dan BH-5. Pada titik-titik ini, jenis sedimen hasil klasifikasi permukaan tidak mencerminkan litologi yang dominan di data bor. Misalnya, di BH-02 yang diklasifikasikan sebagai *silt*, data bor justru menunjukkan dominasi *clay* dan *sand* pada berbagai kedalaman. Begitu pula pada titik BH-F dan DBH-25 yang secara klasifikasi berada di zona pasir, namun profil bor memperlihatkan keberadaan lapisan lempung atau lanau yang cukup dominan.

### 3.6 Uji Akurasi Matriks Konfusi

Untuk mengetahui seberapa akurat hasil klasifikasi sedimen dasar laut menggunakan metode *Angular Response Analysis* (ARA), dilakukan evaluasi terhadap data klasifikasi dengan membandingkannya terhadap data validasi dari titik bor (*borehole*). Evaluasi ini dilakukan menggunakan *confusion matrix*, yang merupakan metode dasar dalam menilai kinerja klasifikasi.

Berdasarkan Peraturan Kepala BIG No. 15 Tahun 2014, evaluasi hasil klasifikasi tematik (termasuk klasifikasi sedimen dasar laut) dilakukan dengan membandingkan hasil klasifikasi terhadap data acuan lapangan (dalam hal ini data *borehole*). Salah satu cara evaluasinya adalah menggunakan matriks konfusi, yang

mencatat hubungan antara hasil klasifikasi dan kondisi aktual di lapangan.

Pada penelitian ini, digunakan 22 titik bor, dan empat kelas utama sedimen yaitu *gravel* (batuan), *sand* (pasir), *silt* (lanau), dan *clay* (lempung). Matriks konfusi yang disusun dari perbandingan hasil klasifikasi ARA dengan data borehole adalah sebagai berikut:

**Tabel 6** Matrik Konfusi Klasifikasi

Hasil Klasifikasi	Titik Bor				Producer's Accuracy	
	Sand	Silt	Rock	Clay		
Sand	16	0	0	1	17	94.12
Silt	3	0	0	1	4	0.00
Rock	0	0	0	0	0	0.00
Clay	0	0	0	1	1	100.00
User's Accuracy	19	0	0	3	17	
	84.211	0	0	33.333		
Jumlah Total sampel (N)	22					
Overall accuracy (%)	77.273					
Koefisien Kappa	0.304					

Berdasarkan hasil evaluasi terhadap performa klasifikasi sedimentasi menggunakan matriks konfusi, dari total 22 titik sampel yang diuji, sebanyak 16 titik dari kelas Sand berhasil diklasifikasikan secara benar sesuai dengan data titik bor. Selain itu, terdapat 1 titik dari kelas Clay yang juga terklasifikasi dengan tepat. Dengan demikian, jumlah total klasifikasi yang sesuai antara hasil klasifikasi dan kondisi lapangan mencapai 17 titik, yang menghasilkan akurasi keseluruhan (*overall accuracy*) sebesar 77,27%.

Akurasi ini mencerminkan sejauh mana sistem klasifikasi berhasil mengenali kategori sedimen dengan benar, namun belum memperhitungkan peluang kesesuaian yang terjadi secara kebetulan. Oleh karena itu, diperlukan indikator tambahan berupa Koefisien Kappa ( $\kappa$ ) untuk mengukur tingkat kesepakatan antara hasil klasifikasi dan data referensi secara lebih objektif. Nilai  $\kappa$  yang diperoleh dari pengujian ini adalah sebesar 0,304, yang menurut interpretasi Landis dan Koch (1977), termasuk dalam kategori *Fair Agreement* (kesepakatan cukup), dengan rentang nilai antara 0,21 hingga 0,40. Nilai ini menunjukkan bahwa sebagian kesesuaian dalam klasifikasi kemungkinan terjadi secara acak, bukan sepenuhnya akibat dari keandalan model klasifikasi itu sendiri.

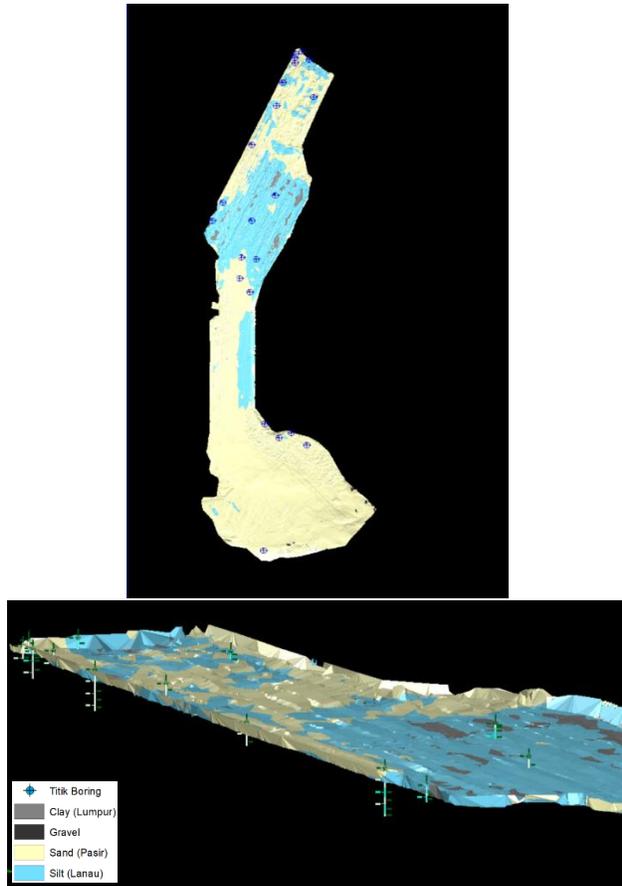
Selanjutnya, bila ditinjau berdasarkan ketepatan klasifikasi per kelas, nilai *User's Accuracy* tertinggi diperoleh oleh kelas Sand, yakni sebesar 84,21%, yang mengindikasikan bahwa sebagian besar prediksi

kelas Sand sesuai dengan kenyataan di lapangan. Sementara itu, kelas *Clay* memiliki *User's Accuracy* sebesar 33,33%, yang menunjukkan masih adanya ketidaktepatan dalam prediksi, karena dari tiga piksel yang diprediksi sebagai *Clay*, hanya satu yang benar. Untuk kelas *Silt* dan *gravel*, *User's Accuracy* bernilai 0%, karena tidak ada klasifikasi yang sesuai dengan label referensi.

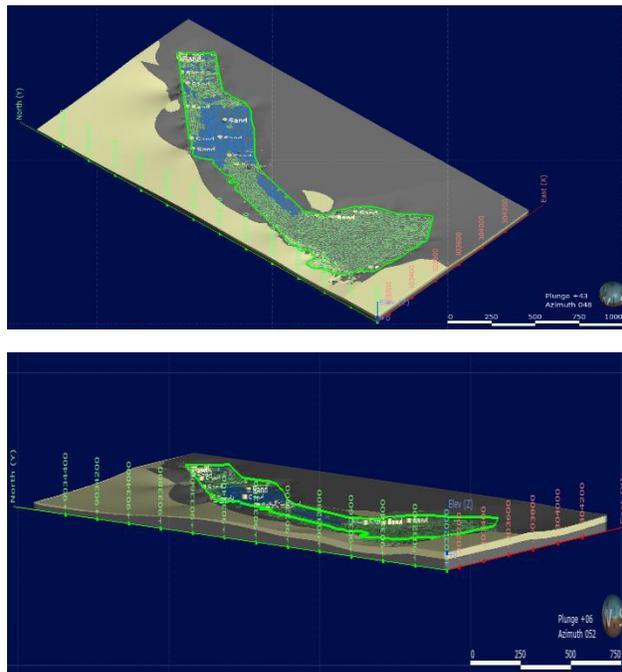
Dari sisi *Producer's Accuracy*, yang menggambarkan kemampuan model dalam mengenali semua sampel yang seharusnya termasuk ke dalam suatu kelas, nilai tertinggi terdapat pada kelas *Clay*, yaitu sebesar 100%. Hal ini berarti bahwa semua titik bor yang sebenarnya merupakan *Clay* berhasil dikenali dengan tepat. Kelas *Sand* juga menunjukkan hasil yang baik dengan *Producer's Accuracy* sebesar 94,12%, karena dari total 17 titik bor yang seharusnya termasuk *Sand*, 16 berhasil diklasifikasikan dengan benar. Sebaliknya, kelas *Silt* dan *gravel* memiliki nilai *Producer's Accuracy* sebesar 0%, menandakan tidak adanya kesesuaian antara klasifikasi dan kenyataan lapangan untuk kedua kelas tersebut.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa sistem klasifikasi memiliki performa yang cukup baik dalam mengenali kelas dominan seperti *Sand* dan *Clay*, namun masih memiliki keterbatasan dalam mengidentifikasi kelas minoritas seperti *Silt* dan *gravel*. Ketidakseimbangan distribusi data pada titik bor menjadi faktor utama yang mempengaruhi hasil evaluasi ini. Hal tersebut juga berdampak pada rendahnya nilai Koefisien Kappa, karena kesepakatan antara hasil klasifikasi dan data referensi tidak merata pada seluruh kelas. Oleh karena itu, peningkatan jumlah dan sebaran titik bor dari semua kelas sedimen, khususnya yang minor, sangat diperlukan untuk meningkatkan reliabilitas klasifikasi serta akurasi evaluasi di masa mendatang.

### 3.7 Model 3D Stratifikasi Sedimen



Gambar 12 Model 3D Surface dengan Titik Bor



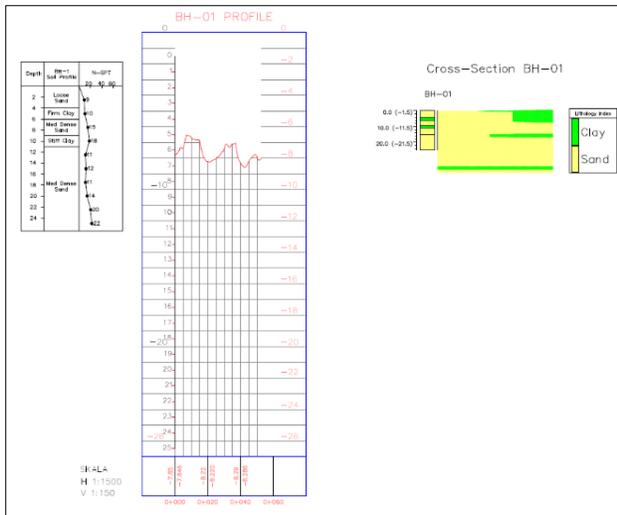
Gambar 13 Tampilan model stratifikasi sedimen

Model 3D stratifikasi sedimen dasar laut yang disusun dalam penelitian ini merupakan hasil akhir dari integrasi antara data klasifikasi sedimen berbasis *backscatter* dan informasi kedalaman batimetri. Data bor digunakan untuk mengontrol dan memverifikasi distribusi vertikal jenis sedimen pada setiap lokasi, yang selanjutnya digunakan sebagai titik acuan untuk interpolasi spasial dalam membentuk volume model. Hasil klasifikasi sedimen permukaan umumnya menunjukkan kesesuaian yang baik dengan data *borehole*. Namun, dari 22 titik yang dianalisis, terdapat 5 titik yaitu BH-C, BH-02, BH-F, GBH-4, DBH-25, dan BH-5 yang menunjukkan ketidaksesuaian antara jenis sedimen hasil klasifikasi dan log bor, baik dari sisi litologi maupun kedalaman lapisan. Ketidaksesuaian ini menandakan pentingnya mempertimbangkan data *subsurface* dalam validasi interpretasi permukaan.

Model 3D yang telah dihasilkan menunjukkan bahwa lapisan pasir (*sand*) merupakan sedimen paling luas secara spasial dan dominan pada lapisan permukaan. Dengan mempertimbangkan data *borehole*, model ini dapat menunjukkan perbedaan ketebalan dan sedimen dengan baik dibandingkan hanya mengandalkan klasifikasi permukaan. Keberadaan lapisan yang tidak teridentifikasi di peta klasifikasi namun muncul pada data bor juga dapat divisualisasikan melalui model ini.

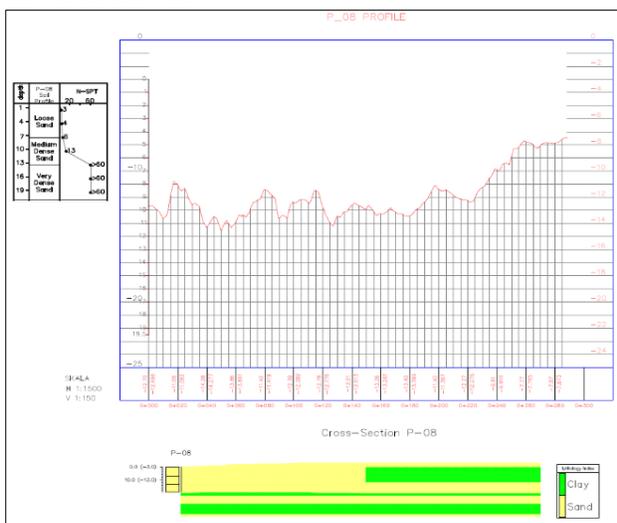
### 3.8 Penampang Lapisan Sedimen

Penampang stratifikasi sedimen dihasilkan untuk memahami karakteristik litologi lokasi penelitian sehingga dapat menggambarkan susunan lapisan sedimen secara vertikal.



**Gambar 14** Tampilan penampang lapisan sedimen

Berdasarkan *sample* permodelan penampang stratifikasi, lokasi BH-01 menunjukkan variasi litologi yang cukup kompleks dengan kombinasi antara pasir dan lempung. Pada kedalaman 0–2 m terdapat lapisan *loose sand*, diikuti oleh *firm clay* pada kedalaman 2–4 m. Selanjutnya, lapisan *medium dense sand* dan *stiff clay* muncul bergantian hingga kedalaman sekitar 12 m, dan dari 12 m hingga 24 m didominasi oleh *medium dense sand*. Penampang *cross-section* BH-01 memperlihatkan distribusi lempung (ditandai warna hijau) yang cukup dominan pada kedalaman menengah, mengindikasikan lingkungan pengendapan dengan energi rendah hingga sedang, seperti lagoon atau area terlindung dari arus utama.



**Gambar 15** Tampilan penampang lapisan sedimen

Sementara itu, profil P-08 menunjukkan dominasi lapisan pasir dengan struktur yang lebih homogen. Pada kedalaman 0–4 m terdapat *loose sand*, diikuti oleh *medium dense sand* hingga kedalaman 10 m, dan lapisan *very dense sand* hingga 19 m dengan nilai N-SPT >60. Penampang menunjukkan sebagian besar sedimen berupa pasir (warna kuning) dengan sedikit sisipan lempung yang tersebar tipis, khususnya di kedalaman sekitar 8–12 m. Hal ini menunjukkan bahwa area P-08 berada dalam lingkungan pengendapan berenergi tinggi, seperti zona pantai atau saluran pasang surut aktif.

## IV KESIMPULAN DAN SARAN

### 4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan pada bab sebelumnya, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Klasifikasi sedimen dasar laut di perairan Tanjung Benoa berhasil dilakukan menggunakan data *backscatter* yang telah dikoreksi dengan algoritma *Angle-Varying Gain* (AVG), kemudian diklasifikasikan menggunakan metode *Angular Response Analysis* (ARA). Koreksi AVG efektif dalam menormalkan intensitas hambur balik dari pengaruh sudut pancaran sonar, sehingga menghasilkan data yang lebih stabil dan representatif untuk analisis klasifikasi sedimen.
2. Validasi hasil klasifikasi sedimen dengan 22 titik borehole menunjukkan bahwa sebanyak 17 titik berhasil terklasifikasi dengan benar dan 5 titik tidak sesuai, sehingga diperoleh tingkat akurasi (*Overall Accuracy*) sebesar 77,27% dan nilai Kappa sebesar 0,304, yang termasuk dalam kategori *Fair*. Hal ini menunjukkan bahwa metode ARA cukup handal dalam mengidentifikasi tipe sedimen berdasarkan sinyal akustik yang diterima.
3. Pemodelan 3D stratifikasi lapisan sedimen dasar laut berhasil dibangun melalui integrasi data batimetri, hasil klasifikasi *backscatter*, dan data borehole sebagai

referensi. Model yang dihasilkan memperlihatkan sebaran sedimen pada permukaan dasar laut yang dangkal secara lebih rinci dan efisien dibandingkan metode konvensional seperti pengeboran penuh, serta memberikan gambaran spasial dan stratigrafi yang bermanfaat dalam eksplorasi, perencanaan wilayah pesisir, dan mitigasi lingkungan.

#### 4.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan kesimpulan yang telah diperoleh, dapat diambil beberapa saran sebagai berikut :

1. Mengingat koreksi *Angle-Varying Gain* (AVG) secara signifikan meningkatkan homogenitas citra *backscatter* dan mengurangi artefak visual seperti striping, maka disarankan agar koreksi ini menjadi tahapan standar dalam pemrosesan data *backscatter* sebelum dilakukan klasifikasi sedimen atau analisis *angular response*.
2. Untuk meningkatkan akurasi validasi klasifikasi sedimen, disarankan agar titik bor ditempatkan secara strategis, terutama di zona transisi antar jenis sedimen yang kompleks atau di area dengan perubahan topografi dasar laut yang tajam.
3. Hasil awal klasifikasi ARA menghasilkan 11 kelas yang kemudian disederhanakan menjadi empat kelompok utama. Untuk kepentingan praktis seperti perencanaan reklamasi, konstruksi lepas pantai, atau konservasi, pendekatan penyederhanaan ini sangat tepat. Namun demikian, untuk tujuan geologi detail atau lingkungan, klasifikasi dengan lebih banyak kelas mungkin perlu dipertahankan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Hafizh, A., Sasmito, B., & Awaluddin, M. (2021). Pemetaan sedimen perairan dangkal menggunakan data multibeam echosounder (studi kasus: pantai kartini, Jepara). *Jurnal Geodesi Undip*, 10(1), 124-132.
- Poerbandono, & Djunarsjah, E. (2005). *Survei Hidrografi*. In R. Herlina (Ed.), (*R. Herlina, Ed.*) (*Cetakan Pe*). Bandung, Indonesia: PT. Refika Aditama. PT. Refika Aditama.
- Ayuningtyas, F. I., & Cahyono, B. K. (2021). Klasifikasi jenis dan sebaran sedimen menggunakan data multibeam echosounder multi-temporal di alur pelayaran barat dan timur Surabaya. *Journal of Geospatial Information Science and Engineering (JGISE)*, 4(2), 140–148. <https://doi.org/10.22146/jgise.62741>
- Adi, A. P., Manik, H. M., & Pujiyati, S. (2016). Integrasi data multibeam batimetri dan mosaik *backscatter* untuk klasifikasi tipe sedimen. *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*, 7(1), 79–86.
- Fahrulian, F., Manik, H. M., Jaya, I., & Udrek. (2016). Angular Range Analysis (ARA) dan K-Means Clustering Data Multibeam Echosounder untuk Penentuan Jenis Sedimen. *Ilmu Kelautan*, 21(4), 177–184. <https://doi.org/10.14710/ik.ijms.21.4.177-184>
- Brammadi, S., Nugraha, A. L., Sudarsono, B., & Mudita, I. (2017). Analisis pengolahan data multibeam echosounder menggunakan perangkat lunak MB-System dan Caris HIPS and SIPS berdasarkan standar S-44 IHO 2008. *Jurnal Geodesi Undip*, 6(4), 351–360.
- Setiawan, S. B., Amarona, Q., & Fadhilah, A. (2023). Kajian data *backscatter* multibeam echosounder dalam pembuatan AML layer environment, seabed and beach (ESB) (studi kasus Teluk Sengiap Natuna). *Jurnal Chart Datum*, 9(1), 49-60.
- Setiadarma, A. P., Sasmito, B., & Amarrohman, F. J. (2019). Analisis pengaruh data SVP (Sound Velocity Profiler) pada hasil pengolahan data multibeam echosounder menggunakan perangkat lunak EIVA (Studi kasus: Marine Station Teluk Awur, Jepara). *Jurnal Geodesi Undip*, 8(1), 83–92.
- Standar Nasional Indonesia Nomor 19-6988-2004 mengenai Jaring kontrol vertikal dengan metode sipatdatar.
- Wentworth, Chester K. 1922. "A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments," *The Journal of Geology* 30, no. 5 (Jul. - Aug., 1922): 377-392.
- Lekkerkerk, H.-J. (2020, 30 Oktober). Canggih dalam multibeam echosounder . *Hidro Internasional* .

<https://www.hydrointernational.com/content/article/state-of-the-art-in-multibeam-echosounders>

Diakses pada 6 Maret 2025.

- BIG (2014). Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar.
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35–46.
- Congalton, R. G., & Green, K. (2009). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. CRC Press.
- Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185–201.
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159–174.