

ANALISIS POLA EROSI-DEPOSISI TERHADAP DAMPAK PERUBAHAN DEBIT BANJIR BELOKAN SUNGAI WONOKROMO MENGGUNAKAN SOFTWARE DELFT3D

by Fauzi Almudhoqi Akhmad

TUGAS AKHIR

ANALISIS POLA EROSI-DEPOSISI TERHADAP DAMPAK PERUBAHAN DEBIT BANJIR BELOKAN SUNGAI WONOKROMO MENGGUNAKAN *SOFTWARE* DELFT3D



Disusun Oleh:

AKHMAD FAUZI ALMUDHOQI

1432200022

²PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA

2026

TUGAS AKHIR

ANALISIS POLA EROSI-DEPOSISI TERHADAP DAMPAK PERUBAHAN DEBIT BANJIR BELOKAN SUNGAI WONOKROMO MENGGUNAKAN *SOFTWARE* DELFT3D

6

Disusun sebagai Syarat Meraih Gelar Sarjana Teknik (S.T.)
Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya



Disusun Oleh:

AKHMAD FAUZI ALMUDHOQI

1432200022

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA
2026**

FINAL PROJECT

ANALYSIS OF EROSION-DEPOSITION PATTERNS ON THE IMPACT OF FLOOD DISCHARGE CHANGES WONOKROMO RIVER BEND USING DELFT3D SOFTWARE

6

Prepared as a Requirement to Obtain a Bachelor of Engineering Degree (S.T.)
Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya



by:

AKHMAD FAUZI ALMUDHOQI

1432200022

2

**CIVIL ENGINEERING PROGRAM
FACULTY OF ENGINEERING
UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA
2026**

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR
TAHUN AKADEMIK GENAP 2025/2026

Nama : Akhmad Fauzi Almudhoqi
NBI : 1432200022
Program Studi : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Judul : ANALISIS POLA EROSI-DEPOSISI TERHADAP DAMPAK PERUBAHAN DEBIT BANJIR BELOKAN SUNGAI WONOKROMO MENGGUNAKAN *SOFTWARE* DELFT3D

Surabaya, 23 Juni 2026

Disetujui Oleh,
Dosen Pembimbing

Dr. Andi Patriadi, S.T., M.T.
NPP. 20430.17.0751

Mengetahui

²
Dekan
Fakultas Teknik
Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya

Ketua
Program Studi Teknik Sipil
Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya

Dr. Ir. Ar. R. A. Retno Hastijanti, M.T.,
IPU., IAI., APEC Eng
NPP. 20440.91.0218

²
Ir. Michella Beatrix, S.T., M.T.
NPP. 2043F.15.0660

SURAT PERNYATAAN

KEASLIAN DAN KESETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : Akhmad Fauzi Almudhoqi
NBI/NPM : 1432200022
Alamat : Dsn. Jogasan Ds. Batembat Kec. Pace Kab. Nganjuk
Telpon/HP : 087745791667

² Menyatakan bahwa “**TUGAS AKHIR**” yang telah saya buat untuk memenuhi persyaratan kelulusan Strata (S1) Teknik Sipil – Program Sarjana – Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya dengan judul:

“ANALISIS POLA EROSI-DEPOSISI TERHADAP DAMPAK PERUBAHAN DEBIT BANJIR BELOKAN SUNGAI WONOKROMO MENGGUNAKAN *SOFTWARE* DELFT3D”

⁶ Adalah karya saya sendiri, dan bukan duplikasi dari karya orang lain. Selanjutnya apabila di kemudian hari terdapat klaim dari pihak lain bukan tanggung jawab pembimbing dan atau pengelola program, tetapi menjadi tanggung jawab saya sendiri.

Atas hal tersebut saya bersedia menerima sanksi, sesuai dengan hukum atau aturan yang berlaku di Indonesia. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun.

Surabaya, 23 Juni 2026
yang menyatakan,

Akhmad Fauzi Almudhoqi
NBI. 1432200022



**UNIVERSITAS
17 AGUSTUS 1945
SURABAYA**

BADAN PERPUSTAKAAN
JL. SEMOLOWARU 45 SURABAYA
TELP. 031 593 1800 (Ext. 311)
Email : perpus@untag-sby.ac.id

LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai Civitas Akademik Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Akhmad Fauzi Almudhoqi
NBI : 1432200022
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Sipil
Jenis Karya : Tugas Akhir Strata 1

Demi perkembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Badan Perpustakaan Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Nonexclusive)** karya ilmiah saya yang berjudul:

“ANALISIS POLA EROSI-DEPOSISI TERHADAP DAMPAK PERUBAHAN DEBIT BANJIR BELOKAN SUNGAI WONOKROMO MENGGUNAKAN *SOFTWARE* DELFT3D”

² Dengan **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Nonexclusive Royalty-Free Right)**, Badan Perpustakaan Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya berhak menyimpan mengalihkan media atau memformatkan, mengolah dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, mempublikasikan karya ilmiah saya selama tetap tercantum.

Dibuat : Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya
Pada Tanggal : 23 Juni 2026

Surabaya, 23 Juni 2026
yang menyatakan,

Akhmad Fauzi Almudhoqi
NBI. 1432200022

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT, karena dengan rahmat, taufik, dan hidayahnya Peneliti dapat menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir dengan judul **“Analisis Pola Erosi-Deposisi Terhadap Dampak Perubahan Debit Banjir Belokan Sungai Wonokromo Menggunakan Software Delft3D”**

Penyusunan Tugas Akhir ini dilakukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program studi Strata-1 pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya. Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini, Peneliti banyak memperoleh bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini Peneliti ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa, Allah Swt., atas segala limpahan rahmat, karunia, dan kekuatan-Nya.
2. Kedua orang tua, adik-adik, dan keluarga besar tercinta atas doa, kasih sayang, serta dukungan moral maupun material yang tidak pernah berhenti diberikan. Senyum dan tawamu yang telah memberikan semangat terhadap peneliti dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Andi Patriadi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang dengan sabar telah memberikan arahan, bimbingan, dan motivasi selama proses penyusunan tugas akhir ini.
4. Ibu Ir. Michella Beatrix, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya.
5. Ibu Ir. Faradlillah Saves, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing jurnal tugas akhir Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya.
6. Ibu Dr. Ir. Dika Ayu Safitri, S.T., M.T., Ph.D. selaku Koordinator Tugas Akhir Program Studi Teknik Sipil Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya.
7. Bapak Mochamad Firmansyah, S.T., M.T. selaku Koordinator Tugas Akhir Program Studi Teknik Sipil Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya.
8. Seluruh dosen dan staff administrasi/umum Program Studi Teknik Sipil Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya yang telah memberikan bekal ilmu dan pelayanan terbaik selama peneliti menempuh perkuliahan.
9. Perum Jasa Tirta I, Divisi Jasa ASA Wilayah Sungai Brantas, yang telah memberikan data debit Pintu Air Jagir Surabaya.
10. Kepala dan Laboran Laboratorium Hidroteknik dan Surveying Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) yang telah membantu mengambil data lapangan dan melakukan uji *sample* sedimen dalam penelitian ini.

11. Pimpinan dan segenap rekan kerja di PT Mitra Cipta Engineering yang telah memberikan dukungan serta kelonggaran waktu bagi Peneliti untuk menyeimbangkan antara pekerjaan dan studi.
12. Saudari Nur Izzah Elsa Nanda yang telah membantu peneliti dan memberikan masukan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
13. Saudara Toriq Pamungkas dan Nauval Usa Maulana yang telah membantu peneliti dalam memberikan data penelitian sebelumnya.

Peneliti berharap semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan menjadi referensi yang bermanfaat bagi semua pihak yang membacanya.

Surabaya, 23 Juni 2026
yang menyatakan

Akhmad Fauzi Almudhoqi
1432200022

ANALISIS POLA EROSI-DEPOSISI TERHADAP DAMPAK PERUBAHAN DEBIT BANJIR BELOKAN SUNGAI WONOKROMO MENGGUNAKAN *SOFTWARE* DELFT3D

Nama : Akhmad Fauzi Almudhoqi
NBI : 1432200022
Program Studi : Teknik Sipil
Dosen Pembimbing : Dr. Andi Patriadi, ST., MT

ABSTRAK

21

Sungai Wonokromo merupakan salah satu sungai utama di Kota Surabaya yang berfungsi sebagai Aliran drainase dan pengendali banjir. Perubahan debit aliran dan pengaruh pasang surut menyebabkan perubahan karakteristik hidrodinamika, angkutan sedimen, dan morfologi sungai, terutama pada daerah tikungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik hidrodinamika, sedimen, angkutan sedimen, serta perubahan morfologi menggunakan model HEC-RAS dan Delft3D.

Data penelitian meliputi debit aliran, pasang surut, kecepatan aliran, batimetri, sedimen dasar, dan sedimen melayang. Hasil validasi model menunjukkan kinerja sangat baik dengan nilai NSE 0,865–0,993 dan RSR 0,081–0,368. Karakteristik sedimen dasar didominasi pasir sebesar 83,12% dengan nilai D50 sebesar 0,44 mm dan D65 sebesar 0,61 mm. Konsentrasi sedimen hasil simulasi mencapai 356,09 mg/L pada HEC-RAS dan 365,56 mg/L pada Delft3D.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan debit banjir menyebabkan peningkatan angkutan sedimen serta perubahan morfologi dasar sungai berupa erosi dan deposisi pada tikungan sungai. Angkutan sedimen meningkat dari 1.052–1.592 ton/hari pada Skenario 1 menjadi 16.557–93.970 ton/hari pada Skenario 2. Temuan ini menunjukkan bahwa debit banjir memiliki pengaruh signifikan terhadap dinamika sedimen dan perubahan morfologi Sungai Wonokromo, sehingga perlu menjadi perhatian dalam pengelolaan dan perencanaan sungai secara berkelanjutan.

Kata Kunci: Perubahan morfologi, Erosi, Deposisi, Tikungan Sungai, Sungai Wonokromo, Angkutan Sedimen, Transportasi Sedimen, HEC-RAS, Delft3D.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALYSIS OF EROSION-DEPOSITION PATTERNS ON THE IMPACT OF FLOOD DISCHARGE CHANGES WONOKROMO RIVER BEND USING DELFT3D SOFTWARE

Name of Student : Akhmad Fauzi Almudhoqi
Number of Student : 1432200022
Study Program : Civil Engineering
Supervisor : Dr. Andi Patriadi, ST., MT

ABSTRACT

The Wonokromo River is one of the main rivers in Surabaya City, serving as a drainage channel and flood control system. Variations in river discharge and tidal influences cause changes in hydrodynamic characteristics, sediment transport, and river morphology, particularly in meander sections. This study aims to analyze hydrodynamic characteristics, sediment properties, sediment transport, and morphological changes using the HEC-RAS and Delft3D models.

The research data include river discharge, tidal fluctuations, flow velocity, bathymetry, bed sediment, and suspended sediment. Model validation results indicate excellent performance, with NSE values ranging from 0.865 to 0.993 and RSR values ranging from 0.081 to 0.368. The bed sediment is predominantly sand (83.12%), with D50 and D65 values of 0.44 mm and 0.61 mm, respectively. Simulated sediment concentrations reached 356.09 mg/L in HEC-RAS and 365.56 mg/L in Delft3D.

Simulation results show that increased flood discharge leads to higher sediment transport rates and riverbed morphological changes in the form of erosion and deposition within the river bend. Sediment transport increased from 1,052–1,592 tons/day in Scenario 1 to 16,557–93,970 tons/day in Scenario 2. These findings indicate that flood discharge significantly affects sediment dynamics and river morphology in the Wonokromo River, highlighting the importance of considering these factors in sustainable river management and planning.

Keywords: Morphology Changes, Erosion, Deposition, Meander, Wonokromo River, Sediment Transport, HEC-RAS, Delft3D.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR.....	i
SURAT PERNYATAAN.....	iii
LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
KATA PENGANTAR	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR RUMUS.....	xxiii
DAFTAR LAMPIRAN	xxv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan Masalah.....	5
1.5. Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Tinjauan Pustaka	7
2.2. Teori Dasar	18
2.2.1. Definisi Sungai.....	18
2.2.2. Definisi Tikungan Sungai (<i>Meander</i>).....	21
2.2.3. Perubahan Morfologi Sungai	22
2.2.4. Faktor Penyebab Perubahan Morfologi Sungai	23
2.2.5. Proses Erosi dan Deposisi	25
2.2.6. Karakteristik Hidrodinamika.....	25
2.2.7. Sedimen.....	31
2.2.8. Transport Sedimen (Angkutan Sedimen)	34
2.2.9. Metode Perhitungan Angkutan Sedimen.....	38
2.2.10. Batimetri.....	49
2.2.11. Sistem Informasi Geografis.....	50
2.2.12. Transport Sedimen Menggunakan HEC-RAS	51
2.2.13. Metode Numerik	52
2.2.14. Pemodelan Numerik Delft3D.....	53
2.2.15. Kriteria Validasi Kinerja Model	58

BAB III METODE PENELITIAN..... 61

3.1. Kerangka Alir Penelitian (<i>Flowchart</i>)	61
3.2. Kerangka Alir Simulasi A (HEC-RAS)	62
3.3. Kerangka Alir Simulasi B (Delft3D)	63
3.4. Penjelasang Kerangka Alir Penelitian	64
3.5. Bahan dan Peralatan Penelitian	90
3.6. Sumber Data	91
3.7. Desain Pemodelan Awal	92
3.7.1. Desain Pemodelan HEC-RAS	92
3.7.2. Desain Pemodelan Delft3D	93

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 101

4.1. Analisis Kondisi Hidrodinamika Eksisting.....	101
4.1.1. Pengambilan Data Lapangan	101
4.1.2. Debit Aliran Eksisting	103
4.1.3. Pasang Surut	104
4.1.4. Pasang Surut Simulasi Delft3D	108
4.1.5. Distribusi Kecepatan Aliran Simulasi HEC-RAS	111
4.1.6. Distribusi Kecepatan Aliran Simulasi Delft3D	115
4.2. Validasi Data Pasang Surut dan Kecepatan Aliran	119
4.2.1. Validasi Data Pasut.....	119
4.2.2. Validasi Data Kecepatan Aliran.....	120
4.3. Uji Statistik Kesesuaian Model	122
4.3.1. Uji Statistik Kesesuaian Model Pasut.....	123
4.3.2. Uji Statistik Kesesuaian Model Kecepatan Aliran 1	126
4.3.3. Uji Statistik Kesesuaian Model Kecepatan Aliran 2	129
4.4. Rekapitulasi Hasil Uji Statistik.....	132
4.5. Analisis Karakteristik Sedimen	132
4.5.1. Hasil Uji Gradasi Butiran (<i>Sieve Analysis</i>).....	132
4.5.2. Hasil Uji Hidrometer (<i>Hydrometer Analysis</i>)	133
4.5.3. Penentuan D50 dan D65 Sedimen.....	134
4.6. Perhitungan Angkutan Sedimen	136
4.6.1. Angkutan Sedimen Dasar (<i>Bed Load</i>)	136
4.6.2. Angkutan Sedimen Layang (<i>Suspended Load</i>)	139
4.7. Konsentrasi Sedimen Berdasarkan Hasil Observasi, Hasil Simulasi HEC-RAS dan Delft3D.....	140
4.7.1. Konsentrasi Sedimen Hasil Observasi.....	140
4.7.2. Konsentrasi Sedimen Simulasi HEC-RAS	141
4.7.3. Konsentrasi Sedimen Simulasi Delft3D	142

4.7.4.	Validasi Konsentrasi Sedimen.....	143
4.8.	Pengaruh Transportasi Sedimen Terhadap Perubahan Morfologi yang Terbentuk Dengan Debit Banjir Eksisting (Skenario 1).....	144
4.8.1.	Perubahan Morfologi Simulasi HEC-RAS Dengan Debit Banjir Eksisting (Skenario 1).....	144
4.8.2.	Perubahan Morfologi Simulasi Delft3D Dengan Debit Banjir Eksisting (Skenario 1).....	153
4.9.	Pengaruh Transportasi Sedimen Terhadap Perubahan Morfologi yang Terbentuk Dengan Debit Banjir Rencana (Skenario 2).....	161
4.9.1.	Perubahan Morfologi Simulasi HEC-RAS Dengan Debit Banjir Rencana (Skenario 2).....	161
4.9.2.	Perubahan Morfologi Simulasi Delft3D Dengan Debit Banjir Rencana (Skenario 2).....	170
4.10.	Rekapitulasi Perubahan Morfologi dengan Hasil Pemodelan Skenario 1 dan Skenario 2.....	178
4.11.	Hasil Pemodelan Angkutan Sedimen (Skenario 1).....	178
4.11.1.	Hasil Pemodelan Angkutan Sedimen Simulasi HEC-RAS (Skenario 1)	178
4.11.2.	Hasil Pemodelan Angkutan Sedimen Simulasi Delft3D Dengan Debit Banjir Eksisting (Skenario 1).....	179
4.12.	Hasil Pemodelan Angkutan Sedimen (Skenario 2).....	181
4.12.1.	Hasil Pemodelan Angkutan Sedimen Simulasi HEC-RAS (Skenario 2)	181
4.12.2.	Hasil Pemodelan Angkutan Sedimen Simulasi Delft3D (Skenario 2)	182
4.13.	Rekapitulasi Pemodelan Angkutan Sedimen dengan Hasil Pemodelan Skenario 1 dan Skenario 2	184
4	BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	189
5.1.	Kesimpulan.....	189
5.2.	Saran.....	190
	DAFTAR PUSTAKA.....	191
	BIODATA PENULIS.....	195
	LAMPIRAN	L1

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tikungan Sungai (<i>Meander</i>).....	22
Gambar 2.2 Formasi Erosi-Deposisi	25
Gambar 2.3 Pasang Surut Harian Tunggal (<i>Diurnal Tide</i>).....	26
Gambar 2.4 Pasang Surut Harian Ganda (<i>Semi Diurnal Tide</i>).....	27
Gambar 2.5 Pasang Surut Campuran Condong Harian Tunggal (<i>Mixed Tide Prevealling Diurnal</i>).	27
Gambar 2.6 Pasang Surut Campuran Condong Harian Ganda (<i>Mixed Tide Prevealling Semi Diurnal</i>).....	28
Gambar 2.7 Metode Pengambilan Data Kecepatan Aliran Menggunakan <i>Current Meter</i>	30
Gambar 2.8 Skema Transport Sedimen.....	35
Gambar 2.9 Skema Keseimbangan Angkutan Sedimen	36
Gambar 2.10 Persamaan Nilai v DV	41
Gambar 2.11 Nilai I_1 Grafik Einstein	44
Gambar 2.12 Nilai I_2 Grafik Einstein	45
Gambar 2.13 Hubungan antara ϵ_a dan Z_2 didapat nilai I_1	47
Gambar 2.14 Hubungan antara ϵ_2 dan Z_2 didapat nilai I_2	48
Gambar 2.15 Visualisasi Pola Erosi dan Deposisi.....	53
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	61
Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi A (HEC-RAS).....	62
Gambar 3.3 Diagram Alir Simulasi B (Delft3D)	63
Gambar 3.4 Peta Lokasi Penelitian	66
Gambar 3.5 Perubahan Penampang Garis Sungai 2002 - 2025.....	67
Gambar 3.6 Pata Kondisi Sisi Luar dan Sisi Dalam Tikungan	68
Gambar 3.7 Titik Koordinat Pengambilan Data Sekunder.....	69
Gambar 3.8 <i>Grab Sampler</i>	69
Gambar 3.9 <i>Suspended Sampler USDH - 48</i>	70
Gambar 3.10 <i>RAS Mapper</i> pada HEC-RAS.....	74
Gambar 3.11 Input <i>Geometric Data (2D-Area, 2D-Breaklines area, BC Line)</i>	75
Gambar 3.12 Input <i>Cross Section</i> dan Data Manning.....	75
Gambar 3.13 Input <i>Boundary Condition</i>	76
Gambar 3.14 <i>Compute Unsteady Flow Analysis</i>	77
Gambar 3.15 Input <i>Bed Gradation</i> Sedimen.....	78
Gambar 3.16 <i>Compute Quasy Unsteady Flow</i>	78
Gambar 3.17 Menu <i>Domain</i>	81

Gambar 3.18 Menu <i>Time Frame</i>	82
Gambar 3.19 Menu <i>Process</i>	84
Gambar 3.20 Menu <i>Initial Condition</i>	85
Gambar 3.21 Menu <i>Boundaries</i>	86
Gambar 3.22 Input <i>Sediment (a.)</i> , <i>Input Roughness (b.)</i> , <i>Morphology (c.)</i>	88
Gambar 3. 23 Ukuran <i>Mesh/Grid</i> pada Pemodelan HEC-RAS.....	92
Gambar 3. 24 <i>Mesh/Grid</i> Awal Pemodelan HEC-RAS	92
Gambar 3. 25 <i>Mesh/Grid</i> Pemodelan Delft3D	93
Gambar 3. 26 Ukuran <i>Mesh/Grid</i> pada Pemodelan Delft3D.....	94
Gambar 3.27 (a.) <i>M-Smoothness</i> , (b.) <i>N-Smoothness</i> , (c.) <i>Orthogonality</i>	95
Gambar 3.28 <i>Courant Number</i>	96
Gambar 3.29 Desain Model Kedalaman Awal.....	97
Gambar 4.1 Pengambilan Data Lapangan.....	101
Gambar 4.2 Titik Pengambilan Data Lapangan.....	101
Gambar 4.3 Titik Pengambilan Data Tinggi Muka Air (<i>Observation Point</i>).....	102
Gambar 4.4 Data Debit Eksisting.....	103
Gambar 4.5 Pasang Surut Observasi Lapangan.....	104
Gambar 4.6 Hasil Simulasi HEC-RAS Pada Saat Pasang Tertinggi	105
Gambar 4.7 Hasil Simulasi HEC-RAS Pada Saat Surut Terendah.....	106
Gambar 4.8 Pasang Surut Simulasi HEC-RAS	107
Gambar 4.9 Hasil Simulasi Delft3D Pada Saat Pasang Tertinggi	108
Gambar 4.10 Hasil Simulasi Delft3D Pada Saat Surut Terendah	109
Gambar 4.11 Pasang Surut Simulasi Delft3D	110
Gambar 4.12 Distribusi Kecepatan Aliran Simulasi HEC-RAS Pada Saat Pasang Tertinggi	111
Gambar 4.13 Distribusi Kecepatan Aliran Simulasi HEC-RAS Pada Saat	112
Gambar 4.14 Kecepatan Aliran Titik 1 Simulasi HEC-RAS	113
Gambar 4.15 Kecepatan Aliran Titik 2 Simulasi HEC-RAS	114
Gambar 4.16 Distribusi Kecepatan Aliran Simulasi Delft3D Pada Saat	115
Gambar 4.17 Distribusi Kecepatan Aliran Simulasi Delft3D Pada Saat	116
Gambar 4.18 Kecepatan Aliran Titik 1 Simulasi Delft3D	117
Gambar 4.19 Kecepatan Aliran Titik 2 Simulasi Delft3D	118
Gambar 4.20 Validasi Tinggi Muka Air.....	119
Gambar 4.21 Validasi Kecepatan Aliran 1	120
Gambar 4.22 Validasi Kecepatan Aliran 2.....	121
Gambar 4.23 Data Gabungan Grafik Uji Gradasi Butir & Hidrometer	134
Gambar 4.24 Validasi Konsentrasi Sedimen	143
Gambar 4.25 Titik Lokasi <i>Cross Section</i>	144

Gambar 4.26 Profil Memanjang Perubahan Elevasi Dasar (<i>Bed Level Changes</i>)...	145
Gambar 4.27 <i>Cross Section</i> A-A Simulasi HEC-RAS (Skenario 1).....	146
Gambar 4.28 <i>Cross Section</i> B-B Simulasi HEC-RAS (Skenario 1).....	146
Gambar 4.29 <i>Cross Section</i> C-C Simulasi HEC-RAS (Skenario 1).....	147
Gambar 4.30 Profil Memanjang Perubahan Elevasi Dasar (<i>Bed Level Changes</i>)...	153
Gambar 4.31 Visualisasi Kondisi Awal Simulasi Delft3D (Skenario 1)	154
Gambar 4.32 Visualisasi Kondisi Akhir Simulasi Delft3D (Skenario 1)	154
Gambar 4.33 <i>Cross Section</i> A-A Simulasi Delft3D (Skenario 1).....	155
Gambar 4.34 <i>Cross Section</i> B-B Simulasi Delft3D (Skenario 1).....	155
Gambar 4.35 <i>Cross Section</i> C-C Simulasi Delft3D (Skenario 1).....	156
Gambar 4.36 Profil Memanjang Perubahan Elevasi Dasar (<i>Bed Level Changes</i>)...	161
Gambar 4.37 <i>Cross Section</i> A-A Simulasi HEC-RAS (Skenario 2).....	162
Gambar 4.38 <i>Cross Section</i> B-B Simulasi HEC-RAS (Skenario 2).....	162
Gambar 4.39 <i>Cross Section</i> C-C Simulasi HEC-RAS (Skenario 2).....	163
Gambar 4.40 Profil Memanjang Perubahan Elevasi Dasar (<i>Bed Level Changes</i>)...	170
Gambar 4.41 Visualisasi Kondisi Awal Simulasi Delft3D (Skenario 1)	171
Gambar 4.42 Visualisasi Kondisi Akhir Simulasi Delft3D (Skenario 2)	171
Gambar 4.43 <i>Cross Section</i> A-A Simulasi Delft3D (Skenario 2).....	172
Gambar 4.44 <i>Cross Section</i> B-B Simulasi Delft3D (Skenario 2).....	172
Gambar 4.45 <i>Cross Section</i> C-C Simulasi Delft3D (Skenario 2).....	173
Gambar 4.46 Visualisasi Hasil Angkutan Sedimen (Erosi-Deposisi) Simulasi Delft3D (Skenario 1).....	179
Gambar 4. 47 Visualisasi Hasil Angkutan Sedimen (Erosi-Deposisi) Simulasi Delft3D (Skenario 1).....	182
Gambar 4.48 Hasil Angkutan Sedimen Skenario 1	184
Gambar 4.49 Hasil Akgkutan Sedimen Skenario 2.....	185
Gambar 4.50 Hasil Angkutan Sedimen Dasar (<i>Bedload</i>)	186
Gambar 4.51 Hasil Angkutan Sedimen Layang (<i>Susspended Load</i>).....	187

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu	12
Tabel 2.2 Ukuran Butiran Sedimen	33
Tabel 2.3 Klasifikasi Sedimen Merayap.....	33
Tabel 2.4 Klasifikasi Tingkat Sedimentasi.....	34
Tabel 2.5 Klasifikasi Proses Angkutan Sedimen.....	36
Tabel 2.6 Nilai-nilai Ψ dan t_c yang digunakan.....	40
Tabel 2.7 Hasil Uji Statistik Validasi Model	58
Tabel 3.1 Alat Penelitian	90
Tabel 3.2 Data-data yang dibutuhkan.....	91
Tabel 3.3 Parameter Model Skenario 1 debit eksisting	97
Tabel 3.4 Parameter Model Skenario 2 debit rencana.....	98
Tabel 4.1 Uji Statistik Pasut HEC-RAS vs Simulasi.....	123
Tabel 4.2 Uji Statistik Pasut Delft3D vs Observasi.....	124
Tabel 4.3 Statistik Kecepatan Aliran 1 HEC-RAS vs Observasi.....	126
Tabel 4.4 Uji Statistik Kecepatan Aliran 1 Delft3D vs Observasi	127
Tabel 4.5 Uji Statistik Kecepatan Aliran 2 HEC-RAS vs Observasi.....	129
Tabel 4.6 Validasi Kecepatan Aliran 2 Delft3D vs Simulasi.....	130
Tabel 4.7 Rekapitulasi Hasil Uji Statistik Simulasi vs Observasi	132
Tabel 4.8 Hasil Uji Gradasi Butiran Laboratorium	132
Tabel 4.9 Kandungan Sedimen Benda Uji	133
Tabel 4.10 Hasil Uji Hidrometer	133
Tabel 4.11 Hasil Diameter Butiran Sedimen.....	135
Tabel 4.12 Jenis Lapisan	135
Tabel 4.13 Data-Data Hidrolika	136
Tabel 4.14 Data Sample Sedimen Layang.....	140
Tabel 4.15 Data Konsentrasi Sedimen Hasil Simulasi HEC-RAS	141
Tabel 4.16 Data Konsentrasi Sedimen Hasil Simulasi Delft3D	142
Tabel 4.17 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS <i>Cross Section A-A (Skenario 1)</i>	147
Tabel 4.18 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS <i>Cross Section B-B (Skenario 1)</i>	149
Tabel 4.19 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS <i>Cross Section C-C (Skenario 1)</i>	151
Tabel 4.20 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi Delft3D <i>Cross Section A-A (Skenario 1)</i>	156

Tabel 4.21 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi Delft3D	
<i>Cross Section B-B (Skenario 1)</i>	158
Tabel 4.22 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi Delft3D	
<i>Cross Section C-C (Skenario 1)</i>	159
Tabel 4.23 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS	
<i>Cross Section A-A (Skenario 2)</i>	163
Tabel 4.24 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS	
<i>Cross Section B-B (Skenario 2)</i>	165
Tabel 4.25 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS	
<i>Cross Section C-C (Skenario 2)</i>	167
Tabel 4.26 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi Delft3D	
<i>Cross Section A-A (Skenario 2)</i>	173
Tabel 4.27 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi Delft3D	
<i>Cross Section B-B (Skenario 2)</i>	175
Tabel 4.28 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi Delft3D	
<i>Cross Section C-C (Skenario 2)</i>	176
Tabel 4.29 Rekapitulasi Hasil Perubahan Morfologi Tertinggi Skenario 1	178
Tabel 4.30 Rekapitulasi Hasil Perubahan Morfologi Tertinggi Skenario 2	178
Tabel 4.31 Hasil Angkutan Sedimen Simulasi HEC-RAS (Skenario 1).....	179
Tabel 4.32 Hasil Angkutan Sedimen Simulasi Delft3D (Skenario 1).....	180
Tabel 4.33 Data Debit Sungai Wonokromo	181
Tabel 4.34 Hasil Angkutan Sedimen Simulasi HEC-RAS (Skenario 2).....	181
Tabel 4.35 Hasil Angkutan Sedimen Simulasi Delft3D (Skenario 2).....	183

DAFTAR RUMUS

Rumus 2.1 Kecepatan Aliran Rata-rata.....	29
Rumus 2.2 Debit Aliran.....	30
Rumus 2.3 Debit Banjir Rencana Metode Rasional.....	31
Rumus 2.4 Kecepatan Jatuh Sedimen	36
Rumus 2.5 <i>Drag Coefficient</i>	37
Rumus 2.6 <i>Drag Coefficient</i> tidak berdimensi.....	37
Rumus 2.7 Angkutan Sedimen Dasar Metode Mayer-Peter Muller.....	38
Rumus 2.8 Angkutan Sedimen Dasar Metode Duboys.....	38
Rumus 2.9 Tegangan Geser Dasar Metode Duboys.....	39
Rumus 2.10 Koefisien Butiran Sedimen Metode Duboys	39
Rumus 2.11 Nilai Tegangan Kritis Metode Duboys.....	39
Rumus 2.12 Angkutan Sedimen Dasar Metode Shield	39
Rumus 2.13 Tegangan Geser Dasar Metode Shield	40
Rumus 2.14 Angkutan Sedimen Layang Metode Engelund-Hansen	40
Rumus 2.15 Tegangan Geser Dasar Metode Engelund-Hansen.....	41
Rumus 2.16 Angkutan Sedimen Layang Metode Einstein.....	41
Rumus 2.17 Alas Kasar Metode Einstein.....	42
Rumus 2.18 Alas Licin Metode Einstein.....	42
Rumus 2.19 Kecepatan Geser Metode Einstein.....	42
Rumus 2.20 <i>Roughness Sublayer</i> Metode Einstein.....	42
Rumus 2.21 Konsentrasi Sedimen Metode Einstein	43
Rumus 2.22 Kecepatan Jatuh Sedimen Metode Einstein.....	46
Rumus 2.23 Angkutan Sedimen Layang Metode Chang Simons.....	46
Rumus 2.24 Koefisien Korelasi Metode Chang Simons.....	46
Rumus 2.25 Persamaan Momentum Arah Horizontal (x)	55
Rumus 2.26 Persamaan Momentum Arah Vertikal (y).....	56
Rumus 2.27 Persamaan Kontinuitas.....	56
Rumus 2.28 U Rata-rata Kedalaman.....	56
Rumus 2.29 V Rata-rata Kedalaman.....	56
Rumus 2.30 <i>Q factor</i> Unit	56
Rumus 2.31 Persamaan Transport Sedimen.....	57
Rumus 2.32 Pergerakan Sedimen Akibat Gelombang	57
Rumus 2.33 Kecepatan Efektif.....	57
Rumus 2.34 <i>Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)</i>	59
Rumus 2.35 <i>RMSE-observation standard deviation ratio (RSR)</i>	59

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

L 1. Dokumentasi Pengambilan Data Lapangan	L1
L 2. Dokumentasi Uji Laboratorium	L2
L 3. Hasil Uji Gradasi Butiran.....	L3
L 4. Hasil Uji Hidrometer.....	L4
L 5. Debit Eksisting Observasi Lapangan	L5
L 6. Debit Rencana Perum Jasa Tirta	L6
L 7. Tinggi Muka Air Observasi Lapangan	L7
L 8. Tinggi Muka Air Simulasi HEC-RAS.....	L8
L 9. Tinggi Muka Air Simulasi Delft3D.....	L9
L 10. Data Kecepatan Aliran di Titik 1.....	L10
L 11. Data Kecepatan Aliran di Titik 2.....	L11
L 12. Lembar Persetujuan Dosen Pembimbing.....	L12
L 13. Lembar Bimbingan	L13
L 14 Perintah Revisi Sidang Tugas Akhir	L16
L 15 Bukti Persentase Plagiasi Laporan Tugas Akhir	L19
L 16. <i>Letter of Acceptance</i> (LoA) Jurnal Publikasi	L20
L 17 Lembar Publikasi Jurnal Ilmiah Tugas Akhir	L21
L 18 Bukti Persentase Plagiasi Jurnal Tugas Akhir.....	L23
L 19 Lembar Korespondensi Jurnal Tugas Akhir.....	L24
L 20 Lembar Publikasi Media Massa.....	L27
L 22 Surat Tugas Panitia Prodi.....	L28

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sungai merupakan salah satu komponen utama dalam sistem hidrologi yang berfungsi mengalirkan air dari daerah tangkapan hujan menuju laut atau danau, serta berperan penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan dan mendukung kegiatan sosial ekonomi masyarakat di sekitarnya. Dalam proses alirannya, sungai membawa serta material sedimen baik dalam bentuk melayang (*suspended load*) maupun menggelinding di dasar (*bed load*). Proses transportasi material tersebut melibatkan tiga mekanisme utama, yaitu erosi, transpor sedimen, dan deposisi, yang secara bersama-sama membentuk dan mengubah morfologi sungai dari waktu ke waktu (Knighton D, 1998). Ketika energi aliran meningkat, terutama saat debit banjir, gaya geser dasar (*bed shear stress*) sungai juga meningkat, mengakibatkan partikel sedimen terangkat dan berpindah ke hilir. Sebaliknya, ketika debit menurun, partikel-partikel tersebut akan mengendap kembali di dasar sungai, membentuk lapisan baru yang berpengaruh terhadap kestabilan dasar sungai (Garde & Ranga Raju, 2000).

Morfologi sungai bersifat sangat dinamis dan mudah berubah, khususnya pada bagian tikungan sungai (*meander*) yang memiliki distribusi kecepatan aliran tidak seragam. Pada area tikungan, aliran air cenderung terdorong ke sisi luar oleh gaya sentrifugal, sehingga kecepatan aliran di sisi luar lebih besar dibanding sisi dalam. Hal ini menyebabkan terbentuknya arus sekunder (*secondary flow*) berbentuk spiral yang mengangkut sedimen dari dasar ke arah sisi dalam sungai. Akibatnya, pada sisi luar tikungan (*outer bank*) terjadi erosi tebing (*cut bank*), sementara di sisi dalam (*inner bank*) terjadi deposisi sedimen (*point bar*) (Leeder, 1973). Proses ini berlangsung terus menerus dan menjadi penyebab utama perubahan morfologi dasar sungai dari waktu ke waktu (Van Rijn, 2011).

Fenomena tersebut juga terjadi pada Sungai Wonokromo, yang merupakan salah satu segmen utama dari sistem Sungai Brantas Hilir dan memiliki fungsi vital sebagai Aliran utama pengendali banjir dan drainase Kota Surabaya bagian selatan. Sungai ini bermula dari Bendung Jagir dan mengalir menuju muara di kawasan Wonorejo, yang terhubung langsung dengan Selat Madura. Dengan panjang Alir sekitar 8–9 km dan lebar rata-rata 40–60 meter, Sungai Wonokromo melewati kawasan permukiman padat seperti Jagir, Darmo, Karah, hingga Gunung Anyar sebelum akhirnya bermuara ke laut. Berdasarkan laporan Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Brantas (2023), kondisi Sungai Wonokromo di

beberapa segmen belokan kawasan Jagir-Darmo-Wonorejo menunjukkan adanya erosi di sisi luar sungai dan penumpukan sedimen di sisi dalam tikungan. Pola ini menunjukkan terjadinya ketidakseimbangan antara kecepatan aliran dan transpor sedimen, yang berpotensi mengubah profil dasar sungai serta menurunkan kapasitas tampungnya (Komunikasi et al., 2023).

Fluktuasi debit Sungai Wonokromo menjadi faktor utama yang memicu perubahan morfologi tersebut. Berdasarkan data hidrologi dari BBWS Brantas (2023), debit Sungai Wonokromo dapat meningkat tajam dari sekitar 25 m³/det pada kondisi normal menjadi 180–200 m³/det pada saat puncak banjir. Lonjakan debit ini meningkatkan energi aliran, memperbesar gaya geser dasar, dan menyebabkan material sedimen dasar terangkat. Setelah debit berkurang, sedimen tersebut mengendap di area berkecepatan rendah, terutama di sisi dalam tikungan. Siklus erosi dan deposisi ini berulang secara periodik, mengakibatkan migrasi tikungan dan perubahan morfologi jangka panjang (Van Rijn, 2011).

Perubahan bentuk dasar Sungai Wonokromo tidak hanya disebabkan oleh faktor hidrologi, tetapi juga akibat tekanan aktivitas manusia di sepanjang bantaran sungai. Berdasarkan pengamatan lapangan, di area *inner bank* atau sisi dalam tikungan sungai ditemukan adanya bangunan semi permanen seperti kandang kambing serta aktivitas pembuangan limbah organik langsung ke sungai. Kondisi tersebut tidak hanya menyebabkan penyempitan penampang sungai, tetapi juga menurunkan kualitas air dan mempercepat pengendapan sedimen. Limbah ternak yang kaya bahan organik memperbesar kohesi antar partikel halus, sehingga mempercepat pembentukan endapan di area berkecepatan rendah (Kraus, 2008). Akibatnya, sebagian besar area aliran di sisi dalam semakin dangkal dan mengurangi lebar efektif sungai. Kegiatan tersebut jelas melanggar ketentuan mengenai pengelolaan sempadan sungai, di mana kawasan di sepanjang tepi sungai seharusnya berfungsi sebagai ruang terbuka dan jalur pengaman aliran air. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 38 Tahun 2011 tentang Sungai, sempadan sungai ditetapkan untuk menjaga kelestarian fungsi sungai, melindungi aliran air dari gangguan aktivitas manusia, serta menjamin kapasitas tampung alami sungai. Aturan lebih rinci dijelaskan dalam Peraturan Menteri PUPR Nomor 28/PRT/M/2015 tentang Penetapan Garis Sempadan Sungai dan Sempadan Danau, yang menetapkan bahwa jarak minimal sempadan sungai di wilayah perkotaan adalah 10 meter dari tepi kiri dan kanan palung sungai untuk sungai bertanggul, dan 30 meter untuk sungai tanpa tanggul. Kawasan ini seharusnya bebas dari bangunan, termasuk kandang ternak, bengkel, maupun hunian.

² Peraturan Daerah Kota Surabaya Nomor 12 Tahun 2014 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kota Surabaya Tahun 2014–2034 menetapkan koridor Sungai Wonokromo dan muara Wonorejo sebagai zona hijau lindung sungai dan kawasan sempadan air yang diperuntukkan bagi kegiatan konservasi hutan *mangrove* dan pengendalian banjir. Artinya, segala bentuk aktivitas permanen di sepanjang tanggul, terutama di area *inner bank*, bertentangan dengan rencana tata ruang dan berpotensi mengganggu fungsi sungai sebagai Aliran air utama. Kondisi di lapangan menunjukkan lemahnya penegakan regulasi tersebut, sehingga aktivitas masyarakat di bantaran sungai justru memperparah kondisi morfologi sungai.

Dampak dari penyempitan sungai akibat aktivitas di sempadan telah dibuktikan dalam berbagai studi. Menurut Wulandari dan Hidayat (2021), penyempitan penampang akibat bangunan di tepi sungai dapat menyebabkan peningkatan kecepatan aliran lokal, memperbesar turbulensi, dan mempercepat proses erosi di sisi luar tikungan. Di sisi lain, area yang mengalami hambatan fisik atau aliran lambat akan menjadi titik deposisi yang dominan. Kombinasi antara peningkatan debit banjir dan penyempitan Alir menyebabkan perubahan pola kecepatan yang signifikan, sehingga keseimbangan antara *transport* sedimen dan kapasitas aliran menjadi terganggu. Untuk memahami fenomena tersebut secara kuantitatif, diperlukan pendekatan berbasis model numerik hidrodinamika dan morfologi, karena metode pengamatan lapangan semata tidak cukup menggambarkan interaksi kompleks antara debit, kecepatan, dan pergerakan sedimen. Salah satu perangkat lunak yang telah banyak digunakan untuk kajian serupa adalah Delft3D, yang dikembangkan oleh Deltares (Belanda). Perangkat lunak ini menggabungkan persamaan kontinuitas dan momentum *Navier–Stokes* dengan persamaan *transport* sedimen, sehingga mampu mensimulasikan perubahan dasar sungai akibat variasi debit dan karakteristik aliran (Lesser et al, 2004). Dengan menggunakan Delft3D-*FLOW*, pola aliran, sebaran kecepatan, dan zona erosi–deposisi dapat dianalisis secara dua dimensi (2D) maupun tiga dimensi (3D), memungkinkan pemahaman lebih akurat terhadap dinamika sungai.

Penggunaan Delft3D menjadi penting untuk mempelajari hubungan antara perubahan debit banjir dengan pola *transport* sedimen dan morfologi dasar sungai, terutama di segmen belokan utama. Penelitian ini menganalisis kondisi eksisting debit dan sedimen berdasarkan data lapangan, serta melakukan simulasi terhadap beberapa skenario debit banjir rencana untuk memprediksi distribusi erosi–deposisi di masa mendatang. Hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengendalian sedimentasi, perencanaan normalisasi sungai, serta

penataan sempadan agar fungsi sungai sebagai Aliran pengendali banjir tetap terjaga.

Penelitian ini juga menggunakan aplikasi HEC-RAS untuk memperkuat analisis hidrodinamika dan transpor sedimen di lokasi studi. Penggunaan kedua perangkat lunak ini bertujuan untuk melakukan perbandingan serta validasi terhadap pola aliran dan perubahan morfologi sungai, khususnya dalam memprediksi dampak perubahan debit banjir terhadap stabilitas belokan sungai. Dengan mengintegrasikan kemampuan Delft3D dalam simulasi grid yang fleksibel dan kemampuan HEC-RAS dalam pemodelan satu dimensi (1D) maupun dua dimensi (2D), diharapkan hasil analisis mengenai pola erosi dan deposisi di Sungai Wonokromo dapat memberikan tingkat akurasi yang lebih komprehensif.

19

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang menjadi persoalan dan akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana kondisi karakteristik hidrodinamika eksisting meliputi debit eksisting, pasang surut, serta distribusi kecepatan aliran pada tikungan sungai wonokromo dengan simulasi HEC-RAS dan Delft3D saat ini?
2. Bagaimana kondisi eksisting sedimen di tikungan Sungai Wonokromo, meliputi distribusi ukuran butir, konsentrasi sedimen melayang, serta pengaruhnya terhadap pola erosi dan deposisi yang terbentuk?
3. Bagaimana perbandingan hasil simulasi pemodelan menggunakan aplikasi HEC-RAS dan Delft3D dengan skenario 1 debit banjir eksisting dan skenario 2 debit banjir rencana berdasarkan debit bukaan Pintu Air Jagir dalam memprediksi perubahan pola erosi–deposisi pada belokan Sungai Wonokromo?

18

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis kondisi karakteristik hidrodinamika eksisting meliputi debit eksisting, pasang surut, serta distribusi kecepatan aliran pada tikungan sungai wonokromo dengan simulasi HEC-RAS dan Delft3D saat ini.
2. Menganalisis kondisi eksisting sedimen di tikungan Sungai Wonokromo, meliputi distribusi ukuran butir, konsentrasi sedimen

melayang, serta pengaruhnya terhadap pola erosi dan deposisi yang terbentuk.

4. Menganalisis perbandingan hasil simulasi pemodelan menggunakan aplikasi HEC-RAS dan Delft3D dengan skenario 1 debit banjir eksisting dan skenario 2 debit banjir rencana berdasarkan debit bukaan Pintu Air Jagir dalam memprediksi perubahan pola erosi–deposisi pada belokan Sungai Wonokromo.

71

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian hanya difokuskan pada Sungai Wonokromo, Kota Surabaya, khususnya pada segmen tikungan sungai yang menjadi lokasi studi.
2. Analisis difokuskan pada pola erosi–deposisi yang terjadi pada tikungan Sungai.
3. Pemodelan angkutan sedimen menggunakan software HEC-RAS dan Delftd meliputi perubahan dasar Aliran dan perubahan penampang.
4. Pemodelan spasial yang digunakan adalah Delft3D, dengan pendekatan dua dimensi (2D) hidrodinamika dan morfologi.
5. Hasil penelitian difokuskan untuk memberikan gambaran akademis dan teknis mengenai pola erosi–deposisi akibat perubahan debit banjir, sehingga tidak mencakup perencanaan detail teknis konstruksi atau desain bangunan pengendali sungai.

18

1.5. Manfaat Penelitian

1. Manfaat Untuk Peneliti

Penelitian ini menjadi sarana untuk memperdalam wawasan mengenai fenomena hidrologi, khususnya hubungan antara perubahan debit banjir dengan pola erosi–deposisi pada sungai *meander*. Selain itu, Peneliti memperoleh pengalaman dalam penggunaan perangkat lunak HEC-RAS dan Delft3D untuk melakukan pemodelan hidrodinamika dan morfologi sungai, sehingga keterampilan teknis dan analisis ilmiah dapat semakin terasah. Penelitian ini juga menjadi bekal penting dalam mengasah kemampuan menyusun karya ilmiah yang sistematis sekaligus memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan studi Strata-1 pada Program Studi Teknik Sipil.

2. Manfaat Untuk Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya

Penelitian ini memberikan kontribusi akademis dengan menambah referensi di bidang Hidroteknik, terutama yang berkaitan dengan penerapan pemodelan numerik untuk menganalisis dinamika sungai. Hasil penelitian

dapat menambah literatur perpustakaan universitas dan menjadi acuan bagi mahasiswa lain yang hendak mengkaji topik serupa di masa mendatang.

3. Manfaat Untuk Institusi Perusahaan dan Dinas Terkait

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang bermanfaat mengenai dampak perubahan debit banjir terhadap pola erosi dan deposisi sungai. Informasi tersebut dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam perencanaan kebijakan pengelolaan sungai dan pengendalian banjir di Kota Surabaya. Hasil pemodelan yang diperoleh juga dapat menjadi dasar teknis dalam upaya mitigasi, seperti pengerukan sedimen, penguatan tebing, maupun pembangunan infrastruktur pengendali aliran. Selain itu, penelitian ini juga dapat meningkatkan pemahaman masyarakat mengenai potensi bahaya banjir dan pentingnya menjaga kelestarian sungai, sehingga pada akhirnya dapat mendukung terciptanya pengelolaan sungai yang lebih berkelanjutan.

4. Manfaat Untuk Penelitian Selanjutnya

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai dasar pengembangan penelitian lanjutan di bidang hidraulika sungai dan transpor sedimen, khususnya dalam pemanfaatan pemodelan numerik untuk menganalisis perubahan morfologi sungai. Hasil kajian mengenai pola aliran, distribusi sedimen, serta zona erosi dan deposisi dapat digunakan sebagai referensi pembandingan dan validasi bagi penelitian selanjutnya yang mengkaji metode perhitungan sedimen maupun simulasi numerik dengan skenario debit yang berbeda. Selain itu, penelitian ini dapat mendukung studi lanjutan terkait perencanaan dan desain bangunan pengendali sungai dengan mempertimbangkan dinamika sedimen, serta menjadi acuan metodologis dan sumber data awal dalam pengelolaan sungai yang berkelanjutan.

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Pustaka

Penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik ini memberikan landasan yang kuat dalam memahami fenomena hidrodinamika sungai, *transport* sedimen, serta pemodelan perubahan morfologi akibat variasi debit banjir. Berbagai studi sebelumnya telah menggunakan perangkat lunak numerik seperti HEC-RAS 2D, MIKE 21, maupun Delft3D untuk menganalisis pola erosi dan deposisi di sungai dengan karakteristik yang berbeda. Dengan membandingkan pendekatan, lokasi, serta hasil temuan dari masing-masing penelitian, dapat diidentifikasi ruang lingkup atau celah penelitian (*research gap*) yang belum banyak dikaji, khususnya pada konteks Sungai Wonokromo, Surabaya.

Makmur Zainuddin et al., (2023) melakukan penelitian menggunakan perangkat lunak HEC-RAS 6,1 untuk memodelkan transportasi sedimen dan perubahan morfologi Sungai Tondano dengan data batimetri tahun 2016 dan 2022, debit harian, pasang surut, serta hasil uji laboratorium sedimen. Analisis dilakukan menggunakan persamaan *Meyer-Peter Müller* (MPM) dan hasil model diverifikasi dengan kondisi lapangan tahun 2022, Hasilnya menunjukkan bahwa dalam enam tahun terjadi aggradasi rata-rata 0,891 m atau sekitar 0,13–0,14 meter per tahun di ruas Kairagi sepanjang 7,2 km dari muara. Volume sedimen yang terakumulasi mencapai 83,087,49 m³, menyebabkan kenaikan muka air sungai 1–2 m dan berkurangnya kapasitas Sungai Tondano dalam menampung debit banjir.

Fathur Aditya et al., (2024) melakukan penelitian melalui dua tahap utama, yaitu analisis hidrologi dan hidraulika. Analisis hidrologi digunakan untuk menentukan debit banjir rencana kala ulang 25 tahun dengan data curah hujan dari enam stasiun dan satelit GPM IMERG, menghasilkan debit puncak 2916,16 m³/s. Nilai ini digunakan dalam pemodelan hidraulika menggunakan perangkat lunak Iber untuk mensimulasikan aliran dan erosi pada tikungan Sungai Konawehe, yang telah dikalibrasi dengan data tinggi muka air. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kecepatan aliran di sisi luar tikungan lebih tinggi dibanding sisi dalam, menyebabkan erosi hingga 0,3 meter di sisi luar dan sedimentasi di sisi dalam. Kondisi ini menimbulkan ketidakstabilan tebing dan berpotensi menyebabkan longsor, sehingga disarankan pembangunan pelindung tebing

sungai pada bagian luar tikungan guna melindungi infrastruktur dan pemukiman di sekitar ruas Morosi.

Savitri et al., (2023) Penelitian ini menggunakan HEC-RAS 1D untuk memodelkan aliran dan angkutan sedimen Sungai Bangga pada dua kondisi, sebelum dan sesudah pembangunan sabo dam. Analisis hidrologi menggunakan data hujan 14 tahun dan debit harian 4 tahun menunjukkan bahwa sebelum sabo dam, kedalaman banjir mencapai 2,1 meter, sedangkan setelah pembangunan tiga sabo dam, tinggi muka air menurun drastis dan aliran banjir dapat tertahan di beberapa titik. Hasil pemodelan sedimen menunjukkan bahwa sabo dam sangat efektif menahan endapan, dengan reduksi 81% (*Engelund-Hansen*), 92% (MPM), dan 91% (*Yang*). Dengan demikian, sabo dam berfungsi ganda: mengendalikan sedimen hulu sekaligus mengurangi risiko banjir di hilir.

Teknologi et al., (2018) melakukan penelitian lapangan selama Januari-Desember 2014 di Desa Kanor, Bojonegoro, dilakukan pada tiga penampang Sungai Bengawan Solo untuk menganalisis kecepatan aliran, konsentrasi sedimen melayang (SSC), dan perubahan morfologi sungai. Hasilnya menunjukkan bahwa tebing luar tikungan mengalami erosi berat dengan pergeseran sekitar 0,0625 meter per bulan, dan nilai SSC tertinggi terjadi saat aliran mencapai 25–43% dari kecepatan maksimum, menandakan erosi cepat di sisi luar. Material di sisi luar memiliki butiran lebih halus dan tegangan geser kritis lebih rendah, sehingga mudah tererosi. Analisis *Reynolds* dan *Froude* juga menunjukkan aliran turbulen yang memperkuat pengikisan serta mempercepat perubahan bentuk sungai.

102 Parsapour-Moghaddam et al., (2023) melakukan penelitian yang berjudul “*Implementation of a New Bank Erosion Model in Delft3D*” ini dilakukan untuk meningkatkan kemampuan perangkat lunak Delft3D dalam memprediksi proses erosi tebing sungai (*bank erosion*), yang merupakan bagian penting dari dinamika morfologi sungai alami. Peneliti mengembangkan model baru yang lebih realistis dalam menggambarkan proses fisik erosi tebing dibandingkan model sebelumnya di Delft3D. Model ini diuji menggunakan data eksperimen laboratorium pada Aliran berkelok (*bend flume*) dengan dasar dan tebing pasir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model baru mampu memprediksi erosi lateral tebing luar dengan lebih baik dibandingkan dua model lainnya, model standar Delft3D dan model “*angle of repose*”. Model yang dikembangkan tidak hanya mempertimbangkan kemiringan lereng, tetapi juga aliran sedimen di dasar tebing, sehingga hasilnya lebih realistis. Validasi dengan data eksperimen memperlihatkan bahwa model ini memberikan pola erosi dan aliran sekunder yang paling mendekati kondisi nyata, dengan tingkat kesalahan (RMSE) terkecil.

Kesimpulannya, model baru dalam Delft3D ini meningkatkan akurasi simulasi proses hidro-morfodinamika jangka pendek maupun panjang pada sungai berkelok alami, tanpa menambah beban komputasi secara signifikan.

Kärkkäinen & Lotsari, (2022) melakukan penelitian selama periode Mei - Oktober 2020 dengan menggunakan pemodelan hidrodinamika dua dimensi (2D) berbasis perangkat lunak Delft3D, serta data pengukuran lapangan menggunakan *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) untuk mengukur kecepatan aliran dan tegangan geser dasar (*bed shear stress*). Analisis difokuskan pada lima jenis tikungan sungai (*meander bends*) dengan bentuk dan kelengkungan berbeda, guna mengetahui respon erosi terhadap berbagai kejadian debit tinggi seperti banjir musim semi akibat lelehan salju dan hujan deras di musim panas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fase surut (*receding phase*) dari suatu kejadian banjir memiliki pengaruh erosi yang lebih besar dibandingkan fase naik (*rising phase*), karena durasinya yang lebih lama sehingga memperkuat proses erosi dan perkembangan tikungan sungai. Meskipun debit musim semi akibat lelehan salju biasanya paling besar, penelitian ini menemukan bahwa banjir musim panas akibat hujan ekstrem juga memiliki potensi erosi yang sebanding, bahkan dapat menandingi daya erosi banjir musim semi.

Wang et al., (2024) Menganalisis perubahan morfologi dan neraca sedimen tersuspensi pada kompleks Aliran - shoal (*channel - shoal complex*) di muara Sungai Changjiang (Yangtze Delta), Tiongkok, menggunakan pemodelan numerik Delft3D. Tujuan utamanya adalah memahami dampak penurunan suplai sedimen dari hulu sungai dan kenaikan muka air laut *sea level rise* (SLR) terhadap proses morfodinamik delta besar yang dipengaruhi oleh kombinasi arus sungai dan pasang surut. Data yang digunakan meliputi batimetri tahun 1979, 1990, 2003, 2013, dan 2020, data debit air dan sedimen dari stasiun Datong (1956 - 2022), serta data pasang surut dari tiga stasiun di sekitar delta. Simulasi dilakukan dengan beberapa skenario, mulai dari kondisi masa lalu hingga proyeksi masa depan dengan kenaikan muka laut 5–50 cm dan penurunan konsentrasi sedimen sungai hingga $0,06 \text{ kg/m}^3$. Hasil analisis menunjukkan bahwa sejak 1979, laju pengendapan rata-rata menurun tajam dari 4,20 cm/tahun menjadi hanya 0,40 cm/tahun pada 2020, seiring dengan penurunan suplai sedimen sungai sebesar 75% akibat pembangunan bendungan besar seperti Three Gorges Dam. Pemodelan Delft3D menunjukkan bahwa semakin rendah konsentrasi sedimen dari hulu, semakin besar tingkat erosi di Aliran utama (*South Passage*) dan semakin kecil efisiensi penangkapan sedimen di daerah shoal Nanhui dan Jiuduansha. Selain itu, kenaikan muka laut hingga 50 cm dapat

menurunkan efisiensi penangkapan sedimen sebesar 14,79%, memperparah defisit sedimen dan mempercepat degradasi morfologi delta.

Novelyne et al., (2024) melakukan penelitian menggunakan data primer berupa penampang Aliran dan sample sedimen dasar, serta data sekunder seperti peta daerah tangkapan air, curah hujan harian Stasiun Sungai Kakap PTK-12, dan data pasang surut selama 15 hari. Simulasi dilakukan dengan perangkat lunak HEC-RAS versi 6,0 menggunakan metode Meyer-Peter Müller untuk menghitung angkutan sedimen dasar. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa angkutan sedimen dasar tertinggi terjadi saat kondisi pasang dengan debit periode ulang 10 tahun sebesar 1,73 kg/detik di titik hilir (STA 0+000), sedangkan nilai terendah terjadi saat surut sebesar 0,92 kg/detik di titik yang sama. Nilai angkutan sedimen cenderung lebih besar di muara dibandingkan bagian tengah dan hulu, karena area hilir memiliki vegetasi yang lebih sedikit dan aktivitas manusia yang tinggi sehingga erosi lebih mudah terjadi.

Xiang et al., (2024) menggunakan model ini dikembangkan berdasarkan persamaan Navier-Stokes yang disederhanakan, dikombinasikan dengan persamaan angkutan sedimen dan perubahan elevasi dasar sungai (*morphodynamic equation*). Simulasi dilakukan pada Aliran berkelok (*sine-generated channel*) untuk menganalisis evolusi bentuk *meander* dalam kondisi aliran mantap dan tak mantap. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model *quasi-3D* berhasil merepresentasikan pola aliran sekunder (*secondary flow*), erosi di sisi luar tikungan, dan pengendapan di sisi dalam dengan baik, menghasilkan bentuk *meander* yang realistis dan konsisten dengan data laboratorium. Model ini juga mampu mensimulasikan migrasi lateral dan pembentukan *cutoff* dalam jangka waktu panjang.

Prihantono et al., (2018) berhasil menunjukkan adanya indikasi terjadinya proses abrasi dan sedimentasi di wilayah sekitar Tanjung Pontang berdasarkan hasil pemodelan numerik hidrodinamika dan transport sedimen menggunakan perangkat lunak MIKE21. Pola transport sedimen yang berhubungan dengan abrasi, sedimentasi, dan tingkat kekeruhan di kawasan tersebut sangat dipengaruhi oleh arus sejajar pantai (*longshore current*). Faktor angin berperan signifikan dalam pembentukan arus sejajar pantai, di mana angin musim barat memberikan pengaruh yang lebih dominan dibandingkan angin musim timur. Pada periode musim barat, arus sejajar pantai di Tanjung Pontang cenderung bergerak ke arah timur, sedangkan pada musim timur sebagian arus bergerak ke arah timur dan sebagian lainnya mengalir ke arah selatan menuju Teluk Banten. Hasil analisis perubahan elevasi dasar perairan menunjukkan adanya penurunan *bed level* yang mengindikasikan terjadinya abrasi di sekitar Tanjung Pontang.

sementara proses sedimentasi teridentifikasi di Sungai Ciujung Baru. Tingginya tingkat kekeruhan di perairan sekitar Tanjung Pontang dan Teluk Banten disebabkan oleh konsentrasi sedimen tersuspensi yang besar dari Sungai Ciujung Lama yang kemudian terbawa oleh arus sejajar pantai di kawasan tersebut.

Patriadi et al., (2021) Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji laju transpor sedimen pada berbagai kondisi geometri muara dengan membandingkan situasi sebelum dan sesudah pembangunan Bendung Sembayat. Konsentrasi sedimen, kecepatan aliran, dan suhu diperoleh melalui investigasi lapangan dari Oktober 2016 hingga September 2017, Fenomena debit sungai dan debit pasang surut dianalisis di muara, yang memengaruhi perubahan tinggi muka air hidrolik. Model HEC-RAS digunakan untuk simulasi pemodelan numerik hidrodinamika. Hasilnya menunjukkan bahwa laju transpor sedimen meningkat di bawah pengaruh erosi di cabang-cabang sungai. BH2 dan BH3 adalah lokasi pengamatan yang terletak sebelum dan sesudah pertemuan anak sungai. Lokasi tersebut menunjukkan laju transpor sedimen menurun masing-masing sebesar 30% dan 26% pada musim hujan karena setelah pembangunan bendung. Hasilnya sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya bahwa sedimen diendapkan di sekitar bendung muara. Sementara itu, di cabang-cabang sungai, laju transpor sedimen yang lebih tinggi teramati karena arus pasang surut yang menyebabkan transpor sedimen berlangsung lebih lama di musim kemarau. Temuan ini memperluas pengetahuan tentang pengaruh Bendung Sembayat terhadap karakteristik laju transpor sedimen terkait dengan perubahan musim.

Yuliana Wardani et al., (2018) melakukan Penelitian ini di Kabupaten Banyuwangi yang memiliki empat sungai utama, yaitu Sungai Tambong, Sungai Bomo, Sungai Kalisetail, dan Sungai Kalibaru. Keempat sungai tersebut kerap mengalami peningkatan debit akibat akumulasi endapan sedimen di area bendung. Analisis muatan sedimen tersuspensi (*suspended load*) dilakukan menggunakan metode Engelund & Hansen, Einstein, serta Chang, Simons & Richardson, sedangkan analisis muatan sedimen dasar (*bed load*) menggunakan metode Meyer-Peter Müller, Duboys, dan Shields. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa besarnya muatan *suspended load* pada masing-masing upstream bendung adalah sebesar $2,45 \times 10^{-4}$ ton/hari di Bendung Poncowati, $5,90 \times 10^{-4}$ ton/hari di Bendung Gembleng, $1,12 \times 10^{-4}$ ton/hari di Bendung Jambewangi, dan $8,85 \times 10^{-4}$ ton/hari di Bendung Karangdoro. Sementara itu, muatan *bed load* berturut-turut tercatat sebesar $9,48 \times 10^{-1}$ ton/hari, 0,1778 ton/hari, $3,56 \times 10^{-1}$ ton/hari, dan $4,69 \times 10^{-1}$ ton/hari. Secara umum, kondisi bendung masih tergolong baik, namun diperlukan upaya pemeliharaan rutin

berupa pengurasan sedimen secara berkala pada keempat upstream bendung guna menjaga kinerja bendung tetap optimal.

73
Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti (Tahun)	Judul	Hasil Penelitian
1.	Makmur Zainuddin et al., (2023), Jurnal Teknik Hidraulik (2023) 14(1) 41-54	56 Pemodelan sedimentasi menggunakan HEC-RAS 6,1 untuk menganalisis perubahan elevasi dasar Sungai Tondano, Sulawesi Utara	Hasilnya menunjukkan bahwa dalam enam tahun terjadi aggradasi rata-rata 0,891 meter atau sekitar 0,13–0,14 meter per tahun di ruas Kairagi sepanjang 7,2 km dari muara. Volume sedimen yang terakumulasi mencapai 83,087,49 m ³ , menyebabkan kenaikan muka air sungai 1–2 meter dan berkurangnya kapasitas Sungai Tondano dalam menampung debit banjir.
2.	Fathur Aditya et al., (2024) Proceeding Civil Engineering Research Forum Vol. 3, No. 2, Februari 2024	38 Analisis aliran dan erosi tikungan Sungai Konaweha ruas Morosi	Hasil simulasi menunjukkan bahwa kecepatan aliran di sisi luar tikungan lebih tinggi dibanding sisi dalam, menyebabkan erosi hingga 0,3 meter di sisi luar dan sedimentasi di sisi dalam. Kondisi ini menimbulkan ketidakstabilan tebing dan berpotensi menyebabkan longsor, sehingga disarankan pembangunan pelindung tebing sungai pada bagian luar tikungan guna melindungi infrastruktur dan pemukiman di sekitar ruas Morosi.

2
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

No.	Peneliti (Tahun)	Judul	Hasil Penelitian
3.	Savitri et al., (2023) Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil	Studi Pengendalian Sedimentasi pada Sungai Bangga, Daerah Aliran Sungai (DAS) Palu, Sulawesi Tengah	Hasil pemodelan sedimen menunjukkan bahwa sabo dam sangat efektif menahan endapan, dengan reduksi 81% (<i>Engelund-Hansen</i>), 92% (MPM), dan 91% (<i>Yang</i>). Dengan demikian, sabo dam berfungsi ganda: mengendalikan sedimen hulu sekaligus mengurangi risiko banjir di hilir.
4.	Teknologi et al., (2018)	Penilaian Konsentrasi Sedimen Melayang sebagai Indikator Awal Pergeseran Alir Sungai di Sungai Bengawan Solo, Indonesia	Hasilnya menunjukkan bahwa tebing luar tikungan mengalami erosi berat dengan pergeseran sekitar 0,0625 meter per bulan, dan nilai SSC tertinggi terjadi saat aliran mencapai 25–43% dari kecepatan maksimum, menandakan erosi cepat di sisi luar. Material di sisi luar memiliki butiran lebih halus dan tegangan geser kritis lebih rendah, sehingga mudah tererosi. Analisis <i>Reynolds</i> dan <i>Froude</i> juga menunjukkan aliran turbulen yang memperkuat pengikisan serta mempercepat perubahan bentuk sungai.

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

No.	Peneliti (Tahun)	Judul	Hasil Penelitian
5.	Parsapour-Moghaddam et al., (2023)	Implementasi Model Erosi Tebing Baru di Delft3D	Hasil penelitian menunjukkan bahwa model baru mampu memprediksi erosi lateral tebing luar dengan lebih baik dibandingkan dua model lainnya model standar Delft3D dan model “<i>angle of repose</i>”. Model yang dikembangkan tidak hanya mempertimbangkan kemiringan lereng, tetapi juga aliran sedimen di dasar tebing, sehingga hasilnya lebih realistis. Validasi dengan data eksperimen memperlihatkan bahwa model ini memberikan pola erosi dan aliran sekunder yang paling mendekati kondisi nyata, dengan tingkat kesalahan (RMSE) terkecil. Kesimpulannya, model baru dalam Delft3D ini meningkatkan akurasi simulasi proses hidro-morfodinamika jangka pendek maupun panjang pada sungai berkelok alami, tanpa menambah beban komputasi secara signifikan.

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

No.	Peneliti (Tahun)	Judul	Hasil Penelitian
6.	Kärkkäinen & Lotsari, (2022)	Dampak dari peristiwa naik, puncak dan surutnya debit terhadap potensi erosi sungai berkelok-kelok boreal	Hasil penelitian menunjukkan bahwa fase surut (<i>receding phase</i>) dari suatu kejadian banjir memiliki pengaruh erosi yang lebih besar dibandingkan fase naik (<i>rising phase</i>), karena durasinya yang lebih lama sehingga memperkuat proses erosi dan perkembangan tikungan sungai.
7.	Wang et al., (2024)	<i>Delft3D model-bas edestuarine suspended sediment budget with morphodynamic changes of the channel-shoal complex in a mega fluvial-tidal delta</i>	laju pengendapan rata-rata menurun tajam dari 4,20 cm/tahun menjadi hanya 0,40 cm/tahun pada 2020, seiring dengan penurunan suplai sedimen sungai sebesar 75% akibat pembangunan bendungan besar seperti <i>Three Gorges Dam</i> . Pemodelan Delft3D menunjukkan bahwa semakin rendah konsentrasi sedimen dari hulu, semakin besar tingkat erosi di Aliran utama (<i>South Passage</i>) dan semakin kecil efisiensi penangkapan sedimen di daerah shoal Nanhui dan Jiuduansha. Selain itu, kenaikan muka laut hingga 50 cm dapat menurunkan efisiensi penangkapan sedimen sebesar 14,79%, memperparah <i>deficit</i> sedimen dan mempercepat degradasi morfologi delta.

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

No.	Peneliti (Tahun)	Judul	Hasil Penelitian
8.	Novelyne et al., (2024) Jurnal Teknik Sipil Vol 14, No 01, Maret 2024	Penerapan HEC- RAS Untuk Analisis Angkutan Sedimen Dasar Terhadap Debit Angkutan Sedimen Pada Aliran Parit Berkat	Hasil pemodelan menunjukkan bahwa angkutan sedimen dasar tertinggi terjadi saat kondisi pasang dengan debit periode ulang 10 tahun sebesar 1,73 kg/detik di titik hilir (STA 0+000), sedangkan nilai terendah terjadi saat surut sebesar 0,92 kg/detik di titik yang sama. Nilai angkutan sedimen cenderung lebih besar di muara dibandingkan bagian tengah dan hulu, karena area hilir memiliki vegetasi yang lebih sedikit dan aktivitas manusia yang tinggi sehingga erosi lebih mudah terjadi.
9.	Xiang et al., (2024)	Simulasi Numerik Evolusi Morfologi Sungai Akibat Dampak Mekanisme di Bawah Pengaruh Vegetasi Dataran Banjir	Hasil simulasi menunjukkan bahwa model quasi-3D berhasil merepresentasikan pola aliran sekunder (<i>secondary flow</i>), erosi di sisi luar tikungan, dan pengendapan di sisi dalam dengan baik, menghasilkan bentuk meander yang realistis dan konsisten dengan data laboratorium. Model ini juga mampu mensimulasikan migrasi lateral dan pembentukan <i>cutoff</i> dalam jangka waktu panjang.

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

No.	Peneliti (Tahun)	Judul	Hasil Penelitian
10.	Prihantono et al., (2018) Jurnal Kelautan Nasional, Vol. 13, No 2, Agustus 2018, Hal. 75-88	Pemodelan Hidrodinamika Dan Transpor Sedimen Di Perairan Pesisir Sekitar Tanjung Pontang, Kabupaten Serang - Banten	Hasil analisis perubahan elevasi dasar perairan menunjukkan terjadinya penurunan <i>bed level</i> yang mengindikasikan proses abrasi di wilayah sekitar Tanjung Pontang, sementara proses sedimentasi teridentifikasi di Sungai Ciujung Baru. Tingginya tingkat kekeruhan di perairan sekitar Tanjung Pontang dan Teluk Banten dipengaruhi oleh besarnya konsentrasi sedimen tersuspensi yang berasal dari Sungai Ciujung Lama dan selanjutnya tertransport oleh arus sejajar pantai di kawasan Tanjung Pontang.
11.	Patriadi et al., (2021) International Journal of GEOMATE, May., 2021, Vol.20, Issue 81, pp.35-43	Pengaruh Dam Sembayat Terhadap Laju Transport Sedimen Di Muara Sungai Bengawan Solo, Indonesia	Hasilnya bahwa sedimen diendapkan di sekitar bendung muara. Sementara itu, di cabang-cabang sungai, laju transpor sedimen yang lebih tinggi teramati karena arus pasang surut yang menyebabkan transpor sedimen berlangsung lebih lama di musim kemarau. Temuan ini memperluas pengetahuan tentang pengaruh Bendung Sembayat terhadap karakteristik laju transpor sedimen terkait dengan perubahan musim.

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

No.	Peneliti (Tahun)	Judul	Hasil Penelitian
12.	Yuliana Wardani et al., (2018) Jurnal Logic. Vol. 18. No. 1, Maret 2018	Studi Muatan <i>Suspended Load</i> Dan <i>Bed Load</i> Pada <i>Upstream</i> Bendung Di Hulu Sungai-Sungai Besar Kabupaten Banyuwangi	Berdasarkan hasil analisis muatan sedimen pada empat upstream bendung, diperoleh nilai muatan <i>suspended load</i> masing-masing sebesar $2,45 \times 10^{-4}$ ton/hari di Bendung Poncowati, $5,90 \times 10^{-4}$ ton/hari di Bendung Gembleng, $1,12 \times 10^{-4}$ ton/hari di Bendung Jambewangi, dan $8,85 \times 10^{-4}$ ton/hari di Bendung Karangdoro. Sementara itu, muatan <i>bed load</i> tercatat sebesar $9,48 \times 10^{-1}$ ton/hari pada Bendung Poncowati, 0,1778 ton/hari pada Bendung Gembleng, $3,56 \times 10^{-1}$ ton/hari pada Bendung Jambewangi, dan $4,69 \times 10^{-1}$ ton/hari pada Bendung Karangdoro. Secara umum, kondisi bendung masih tergolong baik, namun diperlukan upaya pemeliharaan rutin berupa pengurasan sedimen secara berkala pada seluruh upstream bendung guna menjaga kinerja dan kapasitas aliran tetap optimal.

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

2.2. Teori Dasar

2.2.1. Definisi Sungai

Sungai dapat didefinisikan sebagai Aliran alami yang menyAlirkan aliran air dalam jumlah besar dari wilayah hulu ke bagian hilir secara berkesinambungan. Tangguh Perdana Putra et al., (2016) menyatakan bahwa

sungai merupakan bagian dari ekosistem akuatik yang berperan penting dalam siklus hidrologi serta berfungsi sebagai daerah tangkapan air (*catchment area*) bagi wilayah di sekitarnya. Oleh karena itu, kondisi suatu sungai sangat dipengaruhi oleh karakteristik lingkungan di sekelilingnya.

Penjelasan lain menurut Undang-undang No. 17 Tahun 2019, (2019) sungai adalah tempat dan wadah alami maupun buatan yang berupa jaringan pengaliran air beserta air di dalamnya, mulai dari hulu sampai muara, dengan batas kanan dan kiri yang ditetapkan oleh pemerintah. Definisi ini menegaskan bahwa sungai bukan hanya sebatas aliran air, melainkan juga mencakup ekosistem dan wilayah sempadannya. Dengan demikian, pengelolaan sungai harus memperhatikan keseimbangan antara fungsi ekologis, sosial, dan ekonomi.

Pembentukan sungai disebabkan oleh adanya aliran air permukaan (*runoff*) yang terbentuk akibat presipitasi, kemudian mengalir mengikuti kontur topografi dari tempat yang tinggi menuju tempat yang rendah. Air yang mengalir tersebut secara bertahap mengikis permukaan tanah, membentuk Alir-Alir kecil (*rills*) yang kemudian berkembang menjadi parit alami (*gullies*) dan akhirnya menjadi Aliran utama sungai.

Sosrodarsono, (2003) menjelaskan bahwa pembentukan sungai sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi, kemiringan lereng, jenis batuan, vegetasi, serta iklim. Di daerah dengan curah hujan tinggi dan topografi terjal, pembentukan sungai berlangsung lebih cepat karena energi aliran air yang besar mempercepat proses erosi.

Menurut Asdak, C. (2010) berdasarkan keberadaanya, sungai dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa kriteria berikut:

a. Sungai Permanen (*Perennial River*)

Sungai permanen adalah sungai yang mengalir sepanjang tahun dengan debit air yang relatif kontinu, baik pada musim hujan maupun musim kemarau. Aliran pada sungai permanen tetap ada karena sumber airnya berasal dari curah hujan, mata air, dan/atau aliran air tanah yang berkelanjutan, sehingga sungai tidak mengalami kekeringan meskipun pada periode hujan rendah. Sungai jenis ini umumnya memiliki peran penting dalam sistem hidrologi, sebagai sumber air, Aliran drainase alami, serta media transpor sedimen yang berlangsung secara terus-menerus.

b. Sungai Periodik (*Intermittent River*)

Sungai periodik adalah sungai yang mengalir tidak sepanjang tahun, yaitu hanya pada waktu-waktu tertentu, terutama saat musim

hujan, dan akan mengalami penurunan debit secara signifikan atau bahkan kering pada musim kemarau. Aliran sungai periodik sangat bergantung pada curah hujan setempat dan suplai air permukaan, sementara kontribusi dari air tanah relatif kecil. Akibatnya, karakteristik hidrologi dan angkutan sedimen pada sungai periodik cenderung berfluktuasi tajam, dengan potensi erosi dan sedimentasi yang tinggi saat debit meningkat secara tiba-tiba pada musim hujan.

c. Sungai Episodik (*Ephemeral River*)

Sungai episodik adalah sungai yang mengalir hanya pada kejadian tertentu atau secara tidak teratur, biasanya setelah terjadi hujan lebat dengan intensitas tinggi, dan sebagian besar waktu dalam kondisi kering. Sungai jenis ini umumnya terdapat di daerah dengan curah hujan rendah atau wilayah kering, di mana aliran air hanya muncul sebagai respon langsung terhadap peristiwa hujan. Karena sifat alirannya yang tiba-tiba dan singkat, sungai episodik sering membawa muatan sedimen yang besar dalam waktu singkat dan berpotensi menimbulkan erosi yang intens pada dasar dan tebing sungai.

d. Sungai Bawah Tanah (*Underground River*)

Sungai bawah tanah adalah aliran air yang mengalir di bawah permukaan tanah, biasanya melalui rekahan batuan, pori-pori tanah, atau Aliran alami seperti gua dan lorong karst. Sungai ini umumnya terbentuk pada daerah batuan kapur (*karst*) yang memiliki tingkat pelarutan tinggi, sehingga memungkinkan air hujan meresap ke dalam tanah dan mengalir sebagai aliran bawah permukaan. Sungai bawah tanah berperan penting dalam sistem hidrologi karena menjadi sumber air bersih alami, menjaga keseimbangan air tanah, serta dapat muncul kembali ke permukaan dalam bentuk mata air.

Sedangkan menurut Sosrodarsono, (2003) berdasarkan pola alirannya sungai diklasifikasikan sebagai berikut:

a. Pola Dendritik

Pola dendritik adalah pola aliran sungai yang menyerupai percabangan pohon, di mana anak-anak sungai bergabung ke sungai utama dengan sudut yang tidak teratur. Pola ini umumnya terbentuk pada daerah yang memiliki litologi dan struktur batuan yang relatif homogen, sehingga tidak ada kontrol struktur geologi yang dominan terhadap arah aliran sungai. Pola dendritik menunjukkan kondisi topografi yang relatif landai hingga bergelombang dan merupakan pola aliran sungai yang paling umum dijumpai.

39

b. Pola Radial

Pola radial adalah pola aliran sungai yang menyebar ke segala arah dari satu titik pusat yang lebih tinggi, seperti jari-jari roda. Pola ini umumnya terbentuk pada wilayah dengan bentuk topografi menyerupai kubah atau gunung, misalnya gunung api, di mana air mengalir menjauhi pusat ketinggian menuju daerah yang lebih rendah. Pola radial menunjukkan bahwa pusat wilayah tersebut merupakan titik elevasi maksimum dan tidak dipengaruhi secara signifikan oleh struktur geologi berupa lipatan atau patahan.

58

c. Pola Trellis

Pola trellis adalah pola aliran sungai yang tersusun secara sejajar dan teratur, di mana sungai utama mengalir memanjang sejajar dengan lembah, sedangkan anak-anak sungai masuk dengan sudut hampir tegak lurus. Pola ini umumnya berkembang pada daerah yang memiliki struktur geologi berlapis atau terlipat, seperti daerah perbukitan lipatan dengan perbedaan ketahanan batuan. Pola trellis menunjukkan adanya kontrol struktur geologi yang kuat terhadap arah dan perkembangan aliran sungai.

d. Pola Rectangular

Pola Rectangular pada sungai adalah salah satu pola jaringan sungai yang ditandai oleh sistem aliran sungai yang membentuk sudut hampir siku-siku, mirip dengan bentuk persegi panjang atau kotak. Pola ini biasanya terjadi karena struktur geologi yang mengontrol arah aliran sungai, seperti patahan atau retakan pada batuan. Sungai mengikuti retakan ini sehingga aliran utama dan anak sungainya terlihat membentuk belokan tajam hampir 90°.

58

e. Pola Annular

Pola Annular pada sungai adalah pola aliran sungai yang membentuk lingkaran atau cincin konsentris, mirip pola cincin pada target atau lingkaran bertingkat. Pola ini relatif jarang dan biasanya terbentuk karena struktur geologi tertentu, seperti dome atau kubah geologi yang tererosi.

2.2.2. Definisi Tikungan Sungai (*Meander*)

Tikungan sungai atau *Meander* adalah lengkungan-lengkungan alami pada sungai yang terbentuk akibat ketidakseimbangan kecepatan aliran dan gaya sentrifugal air. Arus yang mengalir melalui lengkungan menghasilkan gaya yang mendorong air ke arah luar tikungan, menyebabkan erosi tebing luar

(*cut bank*) dan pengendapan di sisi dalam (*point bar*). Bentuk *meander* dapat berubah seiring waktu, mencerminkan dinamika morfologi sungai yang terus berkembang (Sosrodarsono, 2003).

Dalam studi hidroteknik, *meander* bersifat dinamis. Artinya, tikungan ini dapat berpindah posisi (*migration*) atau berubah bentuk seiring waktu akibat fluktuasi debit, terutama saat terjadi debit banjir yang membawa volume sedimen besar. Jika kelokan meander menjadi sangat tajam dan sempit, proses erosi dapat memutuskan leher kelokan tersebut, yang kemudian membentuk Aliran baru yang lurus dan meninggalkan bekas kelokan berupa danau tapal kuda (*oxbow lake*).

BBWS Brantas (2023) menjelaskan dalam laporannya bahwa *meander* diartikan sebagai perubahan arah aliran sungai yang membentuk lengkungan-lengkungan alami akibat proses erosi dan sedimentasi yang berlangsung terus-menerus. Fenomena ini sering ditemukan pada sungai-sungai dataran rendah di Jawa Timur, seperti Sungai Brantas dan Bengawan Solo. BBWS menjelaskan bahwa perubahan morfologi meander penting untuk dianalisis karena berpengaruh terhadap kestabilan tebing sungai dan pola sedimentasi di sepanjang aliran.



Gambar 2.1 Tikungan Sungai (*Meander*)
(Sumber : Maulana N.S. & Patriadi, 2025).

2.2.3. Perubahan Morfologi Sungai

Menurut Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Brantas (2023), perubahan morfologi sungai adalah perubahan bentuk Alir dan dimensi sungai yang disebabkan oleh dinamika debit aliran, sedimentasi, serta aktivitas manusia di sekitar daerah aliran sungai (DAS). Laporan tersebut menyebutkan

bahwa perubahan morfologi dapat berdampak pada stabilitas tebing, kapasitas pengaliran, dan potensi banjir di wilayah hilir. Oleh karena itu, pemantauan morfologi sungai secara berkala menjadi penting untuk pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan.

Menurut Asdak (2010), perubahan morfologi sungai adalah konsekuensi dari perubahan keseimbangan hidrologi di daerah aliran sungai. Faktor-faktor seperti deforestasi, urbanisasi, dan pembangunan infrastruktur dapat mengubah pola limpasan permukaan, yang pada akhirnya memengaruhi kecepatan aliran dan kapasitas sedimen. Kondisi ini menyebabkan sungai beradaptasi melalui perubahan bentuk Aliran dan pola pengendapan material.

2.2.4. Faktor Penyebab Perubahan Morfologi Sungai

Perubahan morfologi sungai merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor alami dan aktivitas manusia. Proses ini menyebabkan perubahan pada bentuk Alir, pola *meander*, kedalaman, dan lebar Aliran sungai, baik secara perlahan maupun cepat. Secara umum, faktor penyebabnya dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu faktor alami (*natural factors*) dan faktor antropogenik (*human-induced factors*).

1. Faktor alami (*natural factor*)

a. Variasi debit aliran (*Discharge Variation*)

Perubahan debit sungai yang disebabkan oleh fluktuasi curah hujan, iklim, atau musim sangat memengaruhi proses erosi dan sedimentasi. Debit tinggi meningkatkan energi aliran sehingga mempercepat pengikisan dasar sungai, sedangkan debit rendah mendorong proses pengendapan. Ketidakseimbangan debit ini menyebabkan perubahan pada bentuk penampang dan arah aliran sungai (Asdak, 2010).

b. Sedimentasi dan Erosi

Menurut Leopold et al., (1964), perubahan morfologi sungai sangat dipengaruhi oleh rasio antara beban sedimen (*sediment load*) dan energi aliran air. Jika beban sedimen terlalu besar, maka akan terjadi pendangkalan dan pelebaran sungai. Sebaliknya, bila energi aliran meningkat, maka proses erosi dominan, menyebabkan pendalaman dasar sungai atau perpindahan Alir (*channel shifting*).

c. Aktivitas tektonik dan geologi

Kondisi geologi dan aktivitas tektonik juga berperan penting dalam mengubah arah dan kemiringan Alir sungai. Gerakan naik-turun (*uplift dan subsidence*) pada lapisan tanah dapat menyebabkan

sungai membentuk lembah baru atau memotong Alir lama. Selain itu, jenis batuan (*resisten atau mudah tererosi*) memengaruhi seberapa cepat proses pembentukan morfologi terjadi.

d. **Perubahan iklim (*Climate Change*)**

Perubahan pola curah hujan dan temperatur akibat perubahan iklim global dapat memengaruhi debit sungai dan intensitas banjir. Kondisi ini berdampak langsung terhadap dinamika erosi, sedimentasi, serta kestabilan tebing sungai. Dalam jangka panjang, perubahan iklim dapat mempercepat pembentukan meander baru atau memperluas dataran banjir.

2. **Faktor Antropogenik (*human-included factor*)**

a. **Perubahan tata guna lahan**

Kegiatan seperti deforestasi, urbanisasi, dan pertanian intensif meningkatkan limpasan permukaan (*runoff*) dan mempercepat proses erosi. Akibatnya, sedimen yang masuk ke sungai meningkat dan mengubah profil dasar sungai. Dalam jangka panjang, hal ini menyebabkan pendangkalan, penyempitan, dan migrasi Alir sungai.

b. **Pembangunan infrastruktur sungai**

Pembangunan bendung, jembatan, tanggul, dan normalisasi sungai dapat mengubah keseimbangan alami antara aliran dan sedimen. Misalnya, bendung menahan sedimen di hulu sehingga menyebabkan erosi di hilir, sedangkan tanggul menghambat penyebaran air ke dataran banjir. Kondisi ini mempercepat perubahan bentuk morfologi sungai secara lokal.

c. **Penambangan material sungai (*sand minning*)**

Aktivitas pengambilan pasir dan kerikil dari dasar sungai menyebabkan ketidakseimbangan hidromorfologi. Penambangan berlebihan menurunkan dasar sungai, memperlemah kestabilan tebing, dan dapat memicu erosi regresif (*upstream erosion*). Dampaknya, morfologi sungai berubah signifikan dalam waktu singkat.

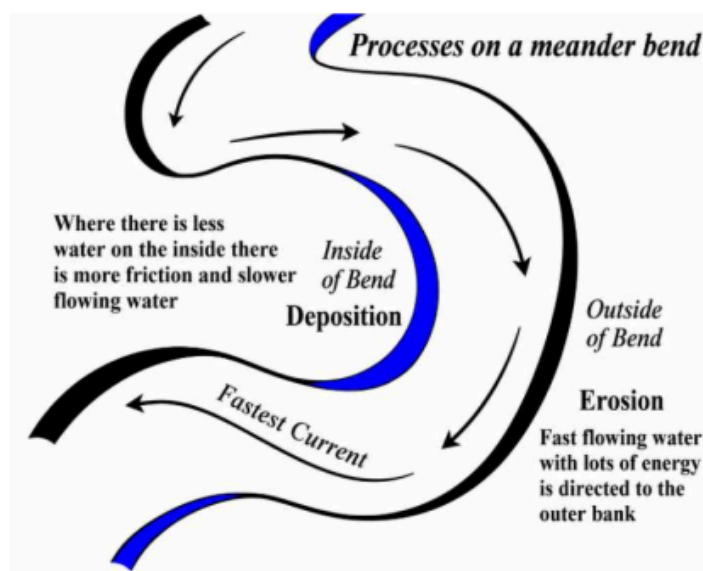
d. **Aktivitas reklamasi dan penimbunan**

Kegiatan reklamasi atau penimbunan di sekitar sempadan sungai dapat mempersempit lebar Alir, meningkatkan kecepatan aliran, dan mengubah pola distribusi sedimen. Akibatnya, aliran air mencari Alir baru dan memicu perubahan pola *meander* serta dataran banjir.

2.2.5. Proses Erosi dan Deposisi

Proses angkutan sedimen memiliki peran penting dalam pembentukan erosi dan deposisi pada suatu aliran sungai. Erosi terjadi ketika gaya aliran terutama tegangan geser dasar melebihi kemampuan sedimen untuk bertahan, sehingga butiran sedimen terlepas dari dasar atau tebing sungai. Sedimen yang terlepas kemudian terbawa oleh aliran melalui mekanisme angkutan seperti *bedload*, *suspended load*, atau *wash load*, tergantung pada ukuran butir dan intensitas turbulensi aliran.

Selama energi aliran masih cukup besar, sedimen akan terus bergerak mengikuti arah arus. Namun, ketika energi aliran menurun, misalnya akibat pelebaran penampang, perubahan kedalaman, atau adanya hambatan alami maupun buatan, kemampuan aliran untuk mengangkut sedimen berkurang sehingga sedimen tersebut mulai mengendap. Proses ini disebut deposisi. Dengan demikian, erosi, *transport*, dan deposisi merupakan satu rangkaian yang saling terkait, di mana perubahan kecil pada kondisi hidrodinamika sungai dapat memengaruhi distribusi sedimen dan memodifikasi bentuk morfologi sungai.



Gambar 2.2 Formasi Erosi-Deposisi
(Sumber : Fathur Aditya et al., 2024).

2.2.6. Karakteristik Hidrodinamika

2.2.6.1. Pasang Surut

Fenomena pasang surut ditandai oleh naiknya permukaan air laut secara periodik sebagai akibat dari pengaruh gaya gravitasi bulan dan matahari terhadap massa air laut di permukaan bumi (Triatmodjo, 2009).

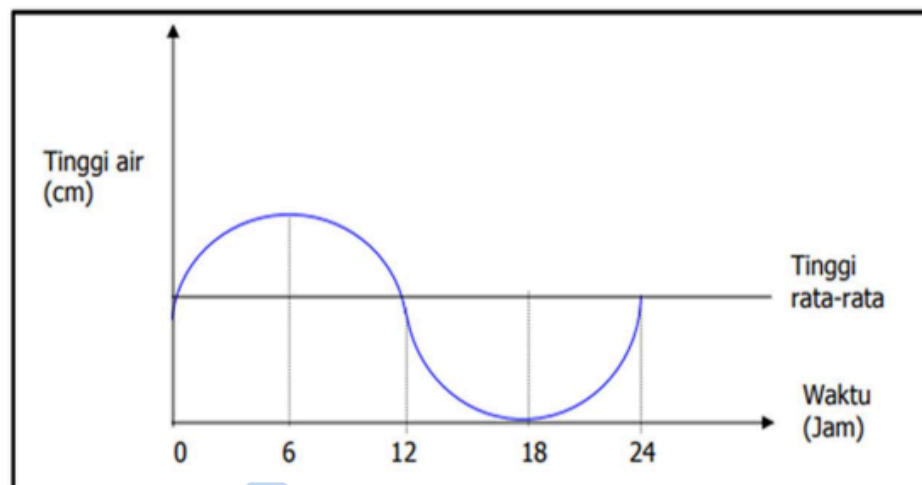
Meskipun matahari memiliki massa yang jauh lebih besar daripada bulan, pengaruh gravitasi bulan terhadap laut di bumi lebih dominan karena jarak bulan ke bumi jauh lebih dekat dibandingkan dengan jarak bumi ke matahari. Oleh sebab itu, gaya tarik bulan memiliki pengaruh sekitar 2,2 kali lebih besar terhadap terjadinya pasang surut dibandingkan gaya tarik yang dihasilkan oleh matahari (Djunarsjah et al., 2005).

Proses pembentukan pasang surut juga erat kaitannya dengan gerak revolusi dan rotasi benda-benda langit. Revolusi bulan mengelilingi bumi, revolusi bumi mengelilingi matahari, serta rotasi bumi pada porosnya sendiri merupakan faktor utama yang menentukan siklus dan intensitas pasang surut di lautan (Triatmodjo, 2009). Ketika posisi bulan, bumi, dan matahari sejajar - baik saat bulan baru maupun purnama - gaya tarik gabungan dari bulan dan matahari menghasilkan pasang maksimum yang disebut pasang purnama (*spring tide*). Sebaliknya, ketika ketiganya membentuk sudut siku-siku, gaya tarik tersebut saling melemahkan sehingga terjadi pasang perbani (*neap tide*) dengan selisih muka air laut yang lebih kecil (Djunarsjah et al., 2005).

Pasang surut di Indonesia terbagi menjadi empat tipe diantaranya yakni sebagai berikut (Ramdhan et al., 2011):

1. Pasang surut harian tunggal (*Diurnal tide*).

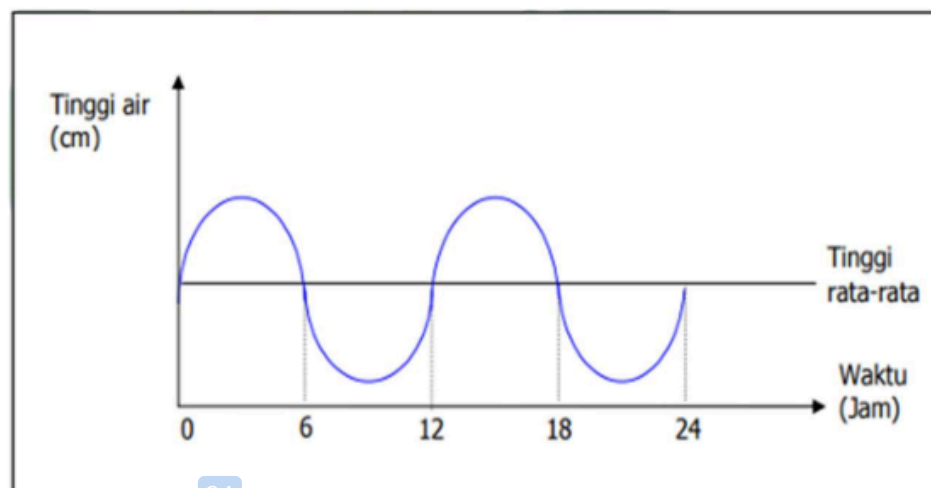
Pasang surut harian tunggal (*Diurnal Tide*) adalah jenis pasang surut yang terjadi sekali dalam 24 jam. Artinya, dalam satu hari (satu periode 24 jam), permukaan air laut naik (pasang) dan turun (surut) hanya satu kali masing-masing.



Gambar 2.3 Pasang Surut Harian Tunggal (*Diurnal Tide*)
(Sumber : Ramdhan et al., 2011).

2. Pasang surut harian ganda (*Semi Diurnal tide*).

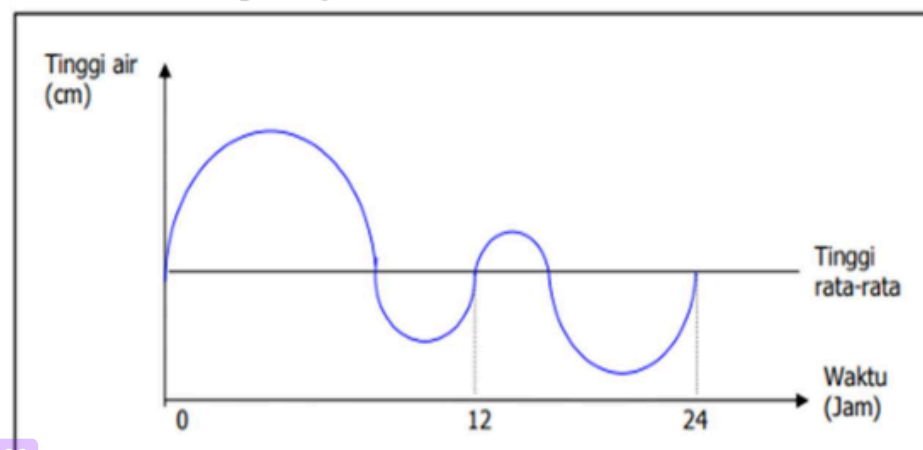
Jenis pasang surut yang dalam periode 24 jam mengalami dua kali pasang dan dua kali surut dengan ketinggian yang relatif sama serta terjadi secara berurutan dan teratur.



Gambar 2.4 Pasang Surut Harian Ganda (*Semi Diurnal Tide*).
(Sumber : Ramdhan et al., 2011).

3. Pasang surut campuran condong harian tunggal (*mixed tide prevealling diurnal*).

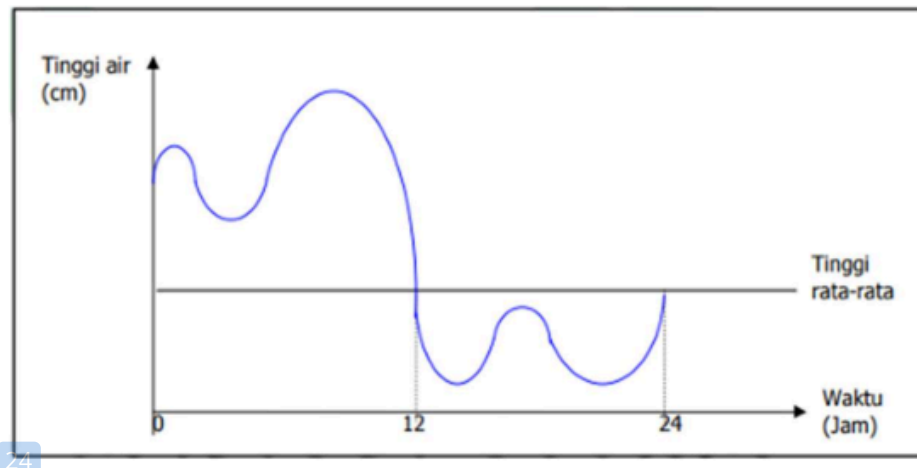
Pasang surut campuran condong harian tunggal ditandai oleh dominasi satu kali pasang dan satu kali surut dalam satu hari,



Gambar 2.5 Pasang Surut Campuran Condong Harian Tunggal (*Mixed Tide Prevealling Diurnal*).
(Sumber : Ramdhan et al., 2011).

4. Pasang surut campuran condong harian ganda (*mixed tide prevealling semi diurnal*).

Pasang surut campuran condong semi-diurnal ditandai oleh dominasi dua kali pasang dan dua kali surut dalam 24 jam, meskipun pada kondisi tertentu dapat terjadi satu siklus pasang surut dengan amplitudo dan periode yang berbeda secara signifikan.



Gambar 2.6 Pasang Surut Campuran Condong Harian Ganda (*Mixed Tide Prevealling Semi Diurnal*).

(Sumber : Ramdhan et al., 2011).

Jenis pasang surut dapat diidentifikasi berdasarkan frekuensi terjadinya pasang dan surut air laut dalam satu hari. Perbedaan ini muncul karena setiap wilayah memiliki respon yang berbeda terhadap energi gravitasi yang memengaruhi pembentukan pasang surut. Untuk menentukan tipe pasang surut di suatu lokasi, dilakukan perbandingan antara amplitudo komponen utama pasang tunggal dan pasang ganda, yang kemudian dinyatakan dalam bentuk bilangan pasang surut atau Formzahl (F).

Dalam perhitungan muka air laut, beberapa parameter penting digunakan untuk menentukan kondisi pasang surut dan rata-rata muka air, antara lain:

- *High Water Level (HWL)*:
Ketinggian maksimum air saat periode pasang.
- *Low Water Level (LWL)*:
Ketinggian minimum air saat periode surut.
- *Mean High Water Level (MHWL)*:
Rata-rata ketinggian pasang selama 19 tahun terakhir.
- *Mean Low Water Level (MLWL)*:
Rata-rata ketinggian surut selama 19 tahun terakhir.

- **Mean Sea Level (MSL):**
Rata-rata tinggi dan rendah permukaan air, digunakan sebagai acuan elevasi di daratan.
- **Highest HighWater Level (HHWL):**
Ketinggian maksimum air saat pasang purnama.
- **Lowest Low Water Level (LLWL):**
Ketinggian minimum air saat surut purnama.
- **Higher HighWater Level (HHWL):**
Ketinggian pasang tertinggi dalam sehari (dua siklus pasang).
- **Lower Low Water Level (LLWL):**
Ketinggian surut terendah dalam sehari (dua siklus pasang).

2.2.6.2. Kecepatan Aliran

Distribusi kecepatan aliran sungai merupakan salah satu parameter kunci yang memengaruhi aspek hidrologi dan ekologi. Kecepatan aliran yang tinggi berpotensi menimbulkan erosi pada tebing dan dasar sungai, sedangkan kecepatan rendah cenderung menyebabkan akumulasi sedimen berlebihan yang dapat mengubah morfologi sungai serta memengaruhi kualitas habitat akuatik. (Anjung Kasianop & Ade Irawan, 2025).

Kecepatan aliran (*flow velocity*) di Aliran terbuka adalah parameter hidraulik mendasar yang menggambarkan seberapa cepat air bergerak melalui suatu penampang Aliran atau sungai. Kecepatan aliran diartikan sebagai kecepatan rata-rata sepanjang kedalaman (*depth-averaged velocity*) yang ditentukan berdasarkan parameter geometris dan hidraulik Aliran terbuka (Khuntia et al., 2018). Kecepatan ini penting karena memengaruhi pengangkutan sedimen, gaya geser dasar sungai, dan desain struktur hidraulik lainnya (Khuntia et al., 2018).

Perhitungan kecepatan aliran menjadi hal yang sangat penting dalam perencanaan dan perancangan bangunan di bidang keairan. Berbagai metode perhitungan, baik yang berbasis formula empiris maupun kombinasi teoritis-empiris, telah banyak dikembangkan. Namun, karena kompleksitas aliran sungai, hasil yang diperoleh dari berbagai formulasi tersebut seringkali kurang akurat. Oleh karena itu, untuk memprediksi kecepatan aliran di suatu sungai, pengukuran langsung melalui pengambilan sampel tetap lebih diandalkan dibandingkan metode perhitungan. (Giarto et al., 2024).

Current meter merupakan instrumen yang digunakan untuk mengukur kecepatan aliran sungai. Penggunaan *current meter* dalam pengukuran

kecepatan aliran terbukti memberikan hasil yang akurat dan dapat diandalkan (Giarto et al., 2024).

Nilai kecepatan aliran rata-rata dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Triatmodjo, 2009):

$$U_x = \frac{1}{3} (0,2H + 0,5H + 0,8H) \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

U_x = kecepatan aliran rata-rata pada titik ke-x (m/s)

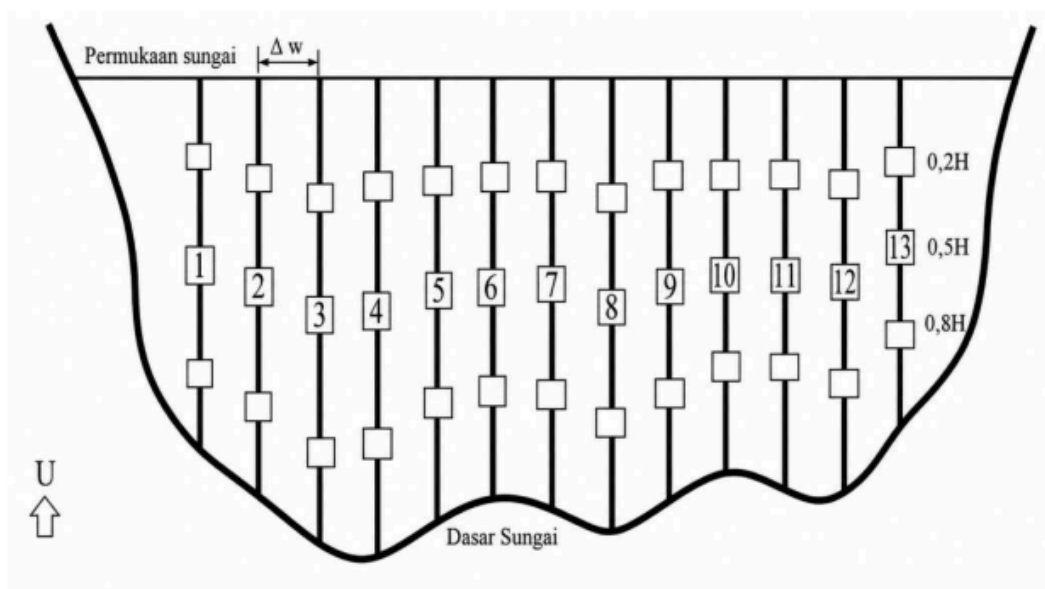
D = kedalaman sungai pada titik pengukuran (m)

$U_{0,2H}$ = kecepatan aliran pada kedalaman 0,2H dari permukaan sungai

$U_{0,5H}$ = kecepatan aliran pada kedalaman 0,5H dari permukaan sungai

$U_{0,8H}$ = kecepatan aliran pada kedalaman 0,8H dari permukaan sungai

Rumus ini mengambil rata-rata kecepatan aliran pada tiga titik vertikal (atas, tengah, dan dekat dasar) untuk memperoleh nilai kecepatan rata-rata di seluruh kolom air pada titik pengukuran.



Gambar 2.7 Metode Pengambilan Data Kecepatan Aliran Menggunakan *Current Meter*

(Sumber : Farindi et al., 2019).

2.2.6.3. ³²Debit Aliran

Debit aliran merupakan volume air yang mengalir melalui suatu sungai per satuan waktu, masuk ke badan sungai saat pasang dan keluar menuju laut saat surut, umumnya terukur di muara sungai. Semakin besar debit aliran, semakin baik kapasitas pengaliran sungai, sehingga dapat meningkatkan kualitas perairan. Besarnya debit dipengaruhi oleh luas penampang aliran serta kecepatan rata-rata arus pada sungai tersebut (Farindi et al., 2019).

Debit aliran digunakan sebagai parameter untuk merepresentasikan nilai-nilai hidrologis dari proses aliran yang terjadi di lapangan. Besarnya debit air dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Soemarto, 1987):

$$Q = V \times A \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

¹⁸ Q	= Debit	(m ³ /s)
V	= Kecepatan Aliran	(m/s)
A	= Luas Penampang	(m ²)

Banjir rencana adalah besarnya debit banjir maksimum yang diperkirakan terjadi sesuai dengan periode ulang tertentu, dan digunakan sebagai dasar perencanaan bangunan hidraulik maupun sistem drainase. Nilai banjir rencana dihitung dengan menggabungkan beberapa komponen analisis hidrologi, yaitu curah hujan rencana, koefisien pengaliran, intensitas hujan, serta luas daerah tangkapan. Salah satu metode sederhana yang umum digunakan adalah metode Rasional, dengan persamaan (Soemarto, 1987):

$$Q = 0,278 \times C \times I \times A \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana:

Q	= Debit banjir rencana	(m ³ /detik)
C	= Koefisien <i>run off</i>	(standart baku)
I	= Intensitas hujan	(mm/jam)
A	= Luas daerah pengaliran	(ha)
0,278	= Konstanta	

2.2.7. Sedimen

2.2.7.1. ³Sedimen dan Sedimentasi

Sedimen merupakan material hasil proses erosi, baik berupa erosi permukaan, erosi parit, maupun jenis erosi tanah lainnya. Material ini umumnya terakumulasi di bagian bawah lereng bukit, daerah genangan banjir, aliran air, sungai, maupun waduk. (Yuliana Wardani et al., 2018). Sedimentasi

81 adalah proses pengendapan material padat (seperti pasir, lanau, dan lempung) yang terbawa oleh aliran air, angin, atau es, kemudian mengendap akibat berkurangnya energi pengangkutnya. Dalam penelitian oleh Sugianto (2013) dijelaskan bahwa sedimentasi merupakan hasil dari proses erosi, transportasi, dan pengendapan material padat yang terjadi secara alami di lingkungan perairan, terutama di sungai, waduk, dan muara. Proses ini sangat memengaruhi bentuk dasar sungai dan kapasitas tampung badan air, karena akumulasi sedimen dapat mengubah morfologi serta stabilitas alir sungai.

Proses sedimentasi tidak hanya memengaruhi morfologi sungai, tetapi juga berdampak pada peningkatan kekeruhan air dan degradasi habitat akuatik. Sedimen yang mengendap di dasar sungai dapat menutup substrat alami dan mengganggu pertumbuhan organisme benthik. Oleh karena itu, pemantauan sedimentasi menjadi aspek penting dalam pengelolaan sumber daya air dan konservasi lingkungan.

9 2.2.7.2. Sumber Sedimen

Menurut asalnya, sedimen dibagi menjadi 4 (empat) macam yaitu sebagai berikut:

134 a. Sedimen *Lithogenous*

Sedimen yang berasal dari sisa pelapukan (*weathering*) batuan dari daratan, lempeng kontinen termasuk yang berasal dari kegiatan vulkanik.

b. Sedimen Biogenik

Sedimen yang terbentuk dari sisa-sisa organisme laut yang telah mati, seperti pecahan tulang, gigi, serta cangkang dari tumbuhan dan hewan mikroskopis.

c. Sedimen Hidrogenik

Sedimen yang terbentuk dari unsur kimia dalam air laut yang mengalami kejenuhan tinggi, sehingga mengendap di dasar laut. Contoh dari sedimen ini antara lain nodul mangan (Mn), fosforit (P_2O_5), dan glaukonit, yaitu mineral hidro silikat berwarna hijau yang mengandung ion-ion seperti kalium (K), magnesium (Mg), besi (Fe), dan silikon (Si).

d. Sedimen Kosmogenik

Sedimen yang berasal dari luar angkasa, di mana partikel-partikel dari benda langit jatuh dan ditemukan di dasar laut. Sedimen ini umumnya mengandung unsur besi dalam jumlah tinggi, sehingga memiliki sifat magnetik, dengan ukuran partikel berkisar antara 10 hingga 640 mikron.

2.2.7.3. Karakteristik Ukuran Sedimen

Ukuran partikel merupakan karakteristik sedimen yang dapat diukur secara nyata. Abdul Ghani, et al. (2012) menggunakan klasifikasi berdasarkan standar *U.S. Army Corps Engineer* (USACE) untuk analisa saringan sampel sedimen. Syahrul Purnawan, et al. (2011) menggunakan teknik analisis penyaringan dengan metode ayak basah yang menggunakan saringan sedimen bertingkat dengan diameter berbeda-beda (4,75 mm, 1,7 mm, 250 μm , 850 μm , 150 μm).

Berdasarkan karakteristiknya, seperti jenis sedimen, ukuran butir tanah, serta komposisi mineral dan bahan induk penyusunnya, sedimen dapat diklasifikasikan menjadi berbagai jenis, antara lain pasir, tanah liat, dan jenis sedimen lainnya. Menurut ukurannya sedimen dibedakan menjadi beberapa jenis seperti pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Ukuran Butiran Sedimen

No.	Jenis Sedimen	Ukuran Partikel (mm)
1.	Liat	< 0,0039
2.	Debu	0,0039 – 0,0625
3.	Pasir	0,0625 – 2,0
4.	Pasir Besar	2,0 – 64,0

(Sumber : Asdak, 2007)

Selain ukuran butiran sedimen diatas, ada juga klasifikasi sedimen merayap berdasarkan ukuran partikelnya. Klasifikasi dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Klasifikasi Sedimen Merayap Berdasarkan Diameter Butiran

No.	Diameter Partikel (mm)	Klasifikasi Sedimen
1.	-	Batu Kali
2.	> 256	Bulder (<i>boulder</i>)
3.	128 - 256	Kobel Besar (<i>large cobble</i>)
4.	64 - 128	Kobel Kecil (<i>small cobble</i>)
5.	32 - 64	Pabel Besar (<i>large pabble</i>)
6.	16 - 32	Pabel Kecil (<i>small pebble</i>)
7.	8 - 16	Batu Kerikil Kasar (<i>coarse gravel</i>)
8.	4 - 8	Batu Kerikil Sedang (<i>medium gravel</i>)

(Sumber : Effendi, 2003)

28
Tabel 2.3 Klasifikasi Sedimen Merayap Berdasarkan Diameter Butiran (Lanjutan)

No.	Diameter Partikel (mm)	Klasifikasi Sedimen
9.	2 - 4	Batu Kerikil Kecil (<i>fine gravel</i>)
10.	0,5 - 1	Pasir Sungai Kasar (<i>Very coarse</i>)
11.	0,25 - 0,5	Pasir Kasar (<i>coarse</i>)
12.	0,125 - 0,25	Pasir Sedang (<i>medium</i>)
13.	0,063 - 0,125	Pasir Halus (<i>fine</i>)
14.	0,032 - 0,063	Pasir Sangat Halus (<i>Very fine</i>)
15.	< 0,032	Lumpur (<i>silt</i>)

(Sumber : Effendi, 2003)

10 2.2.7.4. Berat Jenis Sedimen

Berat volume (*specific weight*) sedimen adalah berat butir partikel sedimen setiap satu satuan volume, sedangkan berat jenis (*specific gravity*) sedimen adalah rasio berat butir partikel sedimen terhadap berat volume air (Ponce, 1989). Berat jenis sedimen pada umumnya diperkirakan sekitar 2,65 kecuali untuk material yang berat seperti magnetit (berat jenis 5,18).

2.2.7.5. Tingkat Sedimentasi

16
17
Terjadinya sedimentasi dapat diidentifikasi melalui beberapa indikator, antara lain tingginya kadar lumpur yang terbawa oleh aliran sungai serta akumulasi endapan sedimen di badan air, sungai, atau waduk. (Yuliana Wardani et al., 2018). Klasifikasi Tingkat sedimentasi dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Klasifikasi Tingkat Sedimentasi

No.	Sedimen (ton/th)	Tingkat Kelas	Sedimentasi Skor
1.	< 2	Baik	1
2.	2 - 5	Sedang	3
3.	> 5	Jelek	5

(Sumber : Peraturan Direktur Jendral Rehabilitasi Jalan, 2009)

2.2.8. Transport Sedimen (Angkutan Sedimen)

Angkutan sedimen adalah proses pengangkutan material sedimen termasuk partikel tersuspensi dan beban dasar (*bed load*) oleh aliran air suatu sungai atau Aliran menuju bagian hilir atau muara. Sebagai contoh, dalam penelitian pada Sungai Pabelan, Kabupaten Magelang, disebutkan bahwa

angkutan sedimen di Aliran alami dapat dihitung menggunakan beberapa rumus empiris seperti *MPM*,

Einstein, *Du Boys* dan *Rottner*, yang memperlihatkan apakah suatu Aliran mengalami *aggradasi* (penumpukan sedimen) atau *degradasi* (pengikisan dasar). Proses ini dipengaruhi oleh kecepatan aliran, ukuran butir sedimen, kedalaman dan lebar Aliran, serta kondisi morfologi dan hidrologi Aliran (Fauziah et al., 2018).

2.2.8.1. Karakteristik Transport Sedimen

Angkutan sedimen merupakan hasil interaksi antara aliran air dan material dasar sungai, sehingga prosesnya bersifat kompleks. Angkutan sedimen dapat diklasifikasikan berdasarkan mekanisme pergerakannya, yaitu:

1. Angkutan sedimen dasar (*bed load*)

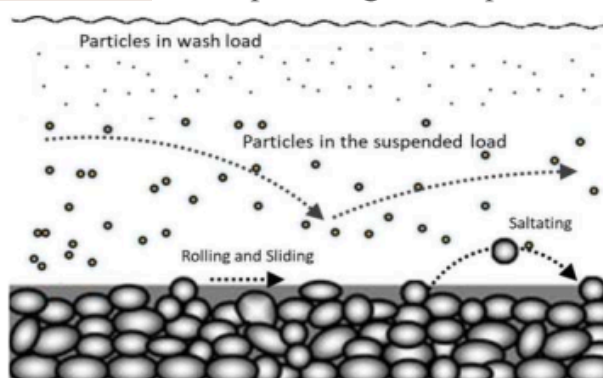
Angkutan sedimen yang bergerak melalui mekanisme bergeser (*sliding*), berguling (*rolling*), atau meloncat-loncat (*saltation*) ditandai oleh fakta bahwa setiap partikel sedimen, dalam selang waktu yang relatif singkat, tetap berada di dasar Aliran.

2. Angkutan sedimen tersuspensi (*suspended load*)

Angkutan sedimen yang bergerak dengan mekanisme melayang (*suspended load*) mengikuti aliran air, mulai dari batas dekat dasar misalnya setinggi D_{50} dari dasar hingga permukaan aliran.

3. *Wash Load*

Sedimen jenis *wash load* adalah partikel suspensi yang berukuran sangat halus dan bukan berasal dari material dasar Aliran. Sedimen ini selalu tetap berada dalam suspensi, dan jika konsentrasinya relatif kecil, biasanya dapat diabaikan dalam perhitungan transport sedimen.

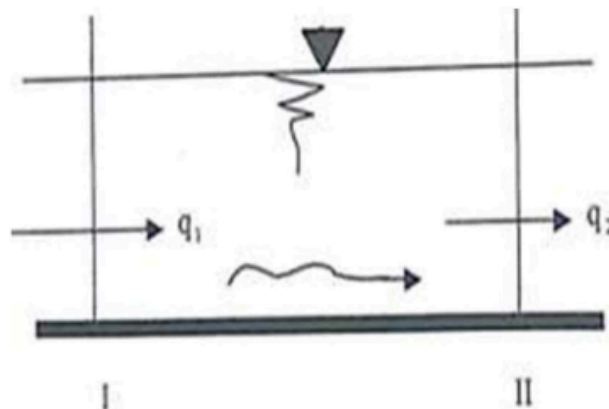


Gambar 2.8 Skema Transport Sedimen
(Sumber: T. Mattos., et al, 2020)

Energi utama yang berkontribusi terhadap pergerakan sedimen berasal dari aliran air melalui tegangan geser dasar, terutama untuk angkutan sedimen dasar (*bed load*). Sementara itu, turbulensi aliran berperan signifikan dalam mengangkut sedimen dalam bentuk melayang (*suspended load*) (Fauziyah et al., 2018).

2.2.8.2. Keseimbangan Sedimen

Mekanisme dan proses pengendalian sedimen pada bangunan penahan sedimen yang ditempatkan di palung sungai berfungsi untuk mengatur aliran sedimen, terutama saat terjadi banjir besar, dengan cara mereduksi debit puncak sedimen. Proses sedimentasi ini dapat menimbulkan perubahan morfologi dasar sungai. Apabila angkutan sedimen dinotasikan dengan simbol q , maka pada suatu ruas sungai yang dibatasi oleh dua penampang, tampang 1 dan tampang 2, dapat terjadi erosi atau deposisi, tergantung pada besarnya angkutan sedimen yang melewati kedua penampang tersebut.



Gambar 2.9 Skema Keseimbangan Angkutan Sedimen

(Sumber : Fauziyah et al., 2018).

Proses perpindahan sedimen yang terjadi antara dua penampang melintang sungai akibat angkutan sedimen dapat disajikan secara ringkas pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Klasifikasi Proses Angkutan Sedimen

Angkutan Sedimen	Proses Angkutan Sedimen	Sedimen Dasar Sungai
$q_1 = q_2$	Seimbang	Stabil
$q_1 < q_2$	Erosi	Degradasi
$q_1 > q_2$	Pengendapan (Deposisi)	Aggradasi

(Sumber : Fauziyah et al., 2018).

2.2.8.3. Kecepatan Jatuh Sedimen (*Fall Velocity*)

Kecepatan jatuh (*fall velocity*) didefinisikan sebagai kecepatan terminal suatu butiran sedimen saat mengendap di dalam air yang tenang. Berdasarkan teori yang dikemukakan oleh Ponce (1989), besaran kecepatan ini dipengaruhi oleh karakteristik fisik partikel seperti dimensi, geometri, dan berat isi serta sifat fluida yang meliputi berat jenis dan viskositas air. Bagi partikel yang memiliki bentuk tidak bulat sempurna (*non-spherical*), perhitungan kecepatan jatuhnya ditentukan melalui formulasi berikut:

$$w = \left[\frac{4}{3} \frac{g d_s \gamma_s - \gamma}{C_d} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana:

- W = kecepatan jatuh (m/s)
- g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)
- ds = diameter partikel (mm)
- Cd = koefisien larutan/*drag coefficient* (tidak berdimensi)
- γ_s = berat volume partikel (g/cm³)
- γ = berat volume air (1,0 g/cm³)

Drag coefficient merupakan fungsi angka *Reynold* dari partikel R, yang ditentukan dengan:

$$R = \left[\frac{w d_s}{\nu} \right] \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana:

- ν = kekentalan kinematic cairan
- w = kecepatan jatuh (m/s)
- ds = diameter partikel (mm)

Untuk angka *Reynold* partikel lebih kecil dari 0,1, maka $C_d = 24/R$. Dengan mensubstitusi nilai C_d ini ke dalam Persamaan diatas, maka mengarah pada hukum *Stoke* (*Stoke's law*):

$$w = \left[\frac{g d_s^2}{18 \nu} \right] \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \dots \dots \dots (2.5)$$

Untuk angka *Reynol* partikel lebih besar dari 0,1, C_D masih merupakan fungsi angka *Reynold*, tetapi hubungannya tidak dapat digambarkan dalam

bentuk analitis. Oleh karena kecepatan jatuh bervariasi terhadap suhu dan kekentalan, dua partikel dengan ukuran, bentuk dan berat jenis yang sama jatuh pada dua cairan dengan kekentalan yang berbeda atau pada cairan yang sama dengan suhu yang berbeda, maka akan memiliki kecepatan jatuh yang berbeda.

2.2.8.4. Konsentrasi Sedimen

Konsentrasi sedimen adalah perbandingan antara berat atau volume sedimen terhadap berat atau volume total campuran air dan sedimen dalam suatu sampel aliran. Dalam studi hidroteknik dan pengelolaan sungai, parameter ini sangat penting untuk menentukan beban sedimen (*sediment load*) yang diangkut oleh sungai, baik itu sebagai sedimen melayang (*suspended load*) maupun sedimen dasar (*bed load*). Secara umum, konsentrasi sedimen dapat dihitung dengan membandingkan berat kering sedimen dengan volume air sampel yang diambil menggunakan alat seperti USDH (*United States Depth-Integrating*) sampler.

$$C = \frac{W_s}{V}$$

Dimana:

- C = Konsentrasi sedimen, (mg/L atau g/m³)
- W_s = Berat kering sedimen
- V = Volume total air sample yang diambil

2.2.9. Metode Perhitungan Angkutan Sedimen

Perhitungan sedimen adalah rangkaian prosedur dari laboratorium sampai perhitungan yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik fisik dan kuantitatif dari material sedimen, baik yang terbawa aliran (*sediment load*) maupun yang mengendap di dasar perairan. Tujuan utama pengujian sedimen adalah menentukan jenis, ukuran butir, distribusi ukuran, konsentrasi, serta perilaku pergerakan sedimen dalam sistem sungai, danau, pesisir, ataupun aliran buatan.

2.2.9.1. Metode Perhitungan Transport Sedimen Dasar (*Bed Load*)

Pada pengujian *bed load*, dilakukan beberapa prosedur, yaitu pengukuran berat jenis sedimen, analisis ukuran butir menggunakan saringan, serta pengujian hidrometer untuk sampel yang lolos saringan No. 200, Adapun

beberapa rumus-rumus yang digunakan dalam menentukan analisis muatan *bedload* adalah sebagai berikut:

a. **Metode Meyer-Peter – 1948** (Soemarto, 1987).

$$q_s^{2/3} = 39,5 q^{2/3} S^{9,95} d \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana:

q_s = muatan *bed load*, (ton/tahun)

q = debit, (m³/s)

S = kemiringan dasar sungai, ($S = \Delta h/L$)

d = ukuran butir rata-rata sedimen, (D50)

Nilai (d) ditentukan dengan analisis butiran dari contoh material alas yang *representative*. Distribusi butirannya dibagi dalam beberapa fraksi ukuran butiran, kemudian ukuran butiran rata-rata dan presentase berat setiap fraksi dapat ditentukan (Soemarto, 1987).

Rumus *Meyer-Peter* seperti diatas hanya berlaku untuk sistem satuan ft, lbs, detik, dan untuk pengangkutan *bed load*.

b. **Metode Duboys – Rouse 1950** (Soemarto, 1987).

$$q_s = \psi \frac{t_0}{\gamma} \left(\frac{t_0 - t_c}{\gamma} \right) \dots \dots \dots (2.8)$$

$$t_0 = \gamma D S \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana:

q_s = muatan *bed load*, (ton/hari)

S = kemiringan dasar sungai, ($S = \Delta h/L$)

t_0 = tegangan geser dasar, (kg/m³)

t_c = tegangan geser dasar kritis (kg/m³)

γ = berat jenis air, (1 ton/m³)

D = kedalaman sungai, (m)

ψ = koefisien yang tergantung pada butir rata-rata sedimen

Nilai (ψ) koefisien dapat dicari menggunakan rumus:

$$\psi = \frac{\gamma_s}{\gamma} \frac{D}{R_{bs}} \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana:

- γ_s = berat jenis sedimen, (g/cm^3)
 γ = berat jenis air, (1 ton/m^3)
 D = kedalaman sungai, (m)
 R_b = diameter butiran sedimen, (D50)
 S = kemiringan dasar sungai, ($S = \Delta h/L$)

Nilai tegangan geser kritis (t_c) dapat dicari dengan menggunakan rumus:

$$t_c = \frac{t_0}{\gamma (\gamma_s - 1) D} \dots \dots \dots (2.11)$$

Dimana:

- γ = berat jenis air, (1 ton/m^3)
 D = kedalaman sungai, (m)
 γ_s = berat jenis sedimen, (g/cm^3)
 t_0 = tegangan geser dasar, (kg/m^3)

Beberapa nilai (Ψ) dan (t_c) sudah dicantumkan pada Tabel 2.6

Tabel 2.6 Nilai-nilai Ψ dan t_c yang digunakan dalam rumus Duboys

Diameter butir rata-rata sedimen (mm)	Ψ	t_c (lbs/ft ²)
0,125	523000	0,0162
0,25	312000	0,0172
0,50	187000	0,0215
1	111000	0,0316
2	66200	0,0513
4	39900	0,089

(Sumber : Soemarto, 1987).

c. Metode *Shields – Rouse 1950* (Soemarto, 1987).

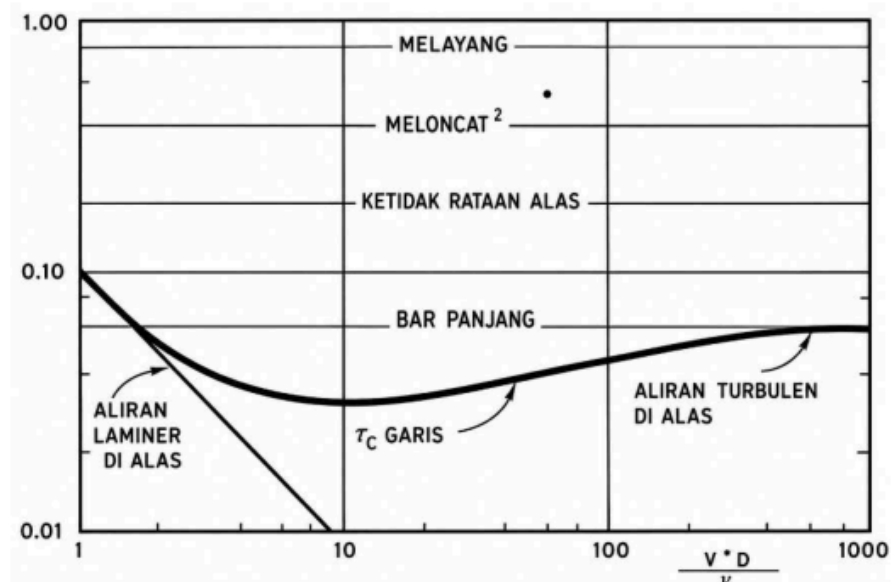
$$q_b = 10 q S \left(\frac{t_0 - t_c}{(\gamma_s - 1)^2 D} \right) \dots \dots \dots (2.12)$$

$$t_o = \gamma D S \dots \dots \dots (2.13)$$

Dimana:

- qb = muatan sedimen *bed load*, (ton/hari)
 q = debit sungai, (m³/detik)
 tc = tegangan geser dasar kritis seperti tertera pada Grafik 2,1
 t_0 = tegangan geser dasar, (kg/m³)
 D = kedalaman sungai, (m)
 G_s = berat jenis butiran sedimen, (g/cm³)
 γ = berat jenis air, (1 ton/m³)
 S = kemiringan dasar sungai, ($S = \Delta h/L$)

Untuk mencari nilai (tc) dapat dicari dalam hitungan nilai $\frac{vD}{\nu}$ pada persamaan Gambar 2.10



Gambar 2.10 Persamaan Nilai $\frac{vD}{\nu}$
(Sumber : Soemarto, 1987).

2.2.9.2. Metode Perhitungan Transport Sedimen Layang (*Suspended Load*)

Pengujian *suspended load* melibatkan beberapa metode, antara lain pengukuran berat jenis atau berat volume menggunakan kertas filter serta analisis ukuran butir dengan menggunakan hidrometer. Adapun beberapa rumus-rumus yang digunakan dalam menentukan analisis muatan *suspended load* adalah sebagai berikut:

- a. **Metode Engelund dan Hansen – 1967** (Olihen Boangmanalu & Indrawan, 2008).

$$q_{sw} = 0,05 \gamma_s v^2 \left[\frac{D_{50}}{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)} \right]^{1/2} \left[\frac{t_0}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} \right]^{3/2} \dots \dots \dots (2.14)$$

$$t_0 = \gamma D S \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana:

- 3
- q_{sw} = muatan *suspended load*, (ton/hari)
 - γ_s = berat jenis sedimen, (g/cm³)
 - γ = berat jenis air, (1 ton/m³)
 - v = kecepatan rata-rata aliran, (m/s)
 - g = gaya gravitasi, (9,81 m/s²)
 - d_{50} = hasil dari uji lab *hydrometer*, (mm)
 - D = kedalaman sungai, (m)
 - s = kemiringan dasar sungai, ($S = \Delta h/L$)
 - t_0 = tegangan geser dasar, (kg/m³)

b. Metode Einstein – 1950 (Soemarto, 1987).

$$q_{sw} = 11,6 U' * C_a \alpha \left[(2,303 \log \frac{30,2D}{\Delta}) I_1 + I_2 \right] \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana:

- q_{sw} = muatan *suspended load*, (ton/hari)
- $U'_* = U_* : (gRS)^{0,5}$ atau $U_* = (gDS)^{0,5}$
- C_a = konsentrasi sedimen tersuspensi, (kg/m³)
- D = kedalaman sungai, (m)
- α = $2d_{65}$, (mm)
- Δ = $k_s/x = d_{65}/x$
- I_1 = numerik terintegritas, lihat Gambar 2.11
- I_2 = numerik terintegritas, lihat Gambar 2.12

3 Untuk mencari nilai koordinat posisi (x) dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$X = 0,77 \frac{d_{65}}{x} \text{ jika } \frac{d_{65}}{x} > 1,80 \delta' \text{ (alas kasar)} \dots \dots \dots (2.17)$$

$$X = 1,39 \frac{d_{65}}{x} \text{ jika } \frac{d_{65}}{x} > 1,80 \delta' \text{ (alas licin)} \dots \dots \dots (2.18)$$

Dimana:

- d_{65} = diameter sedimen lolos saringan 65%
- x = tinggi vertical dari dasar ke titik referensi
- δ' = tebal lapisan pengaruh kekerasan dasar

Untuk mencari nilai (δ') dapat menggunakan persamaan:

$$\delta' = \frac{11,6 \times v}{v' *}$$

Dimana:

v = kekentalan *kinematic* air, cm²/detik

v'_* = kecepatan geser (*shear velocity*)

x = tinggi vertical dari dasar ke titik referensi

Untuk menghitung nilai (v'_*) kecepatan geser dapat menggunakan persamaan:

$$v'_* = \sqrt{g R_b S} \dots \dots \dots (2.19)$$

Dimana:

R_b = jari-jari hidrolik

S = kemiringan dasar sungai

g = percepatan gravitasi, 9,81 m/s

Untuk mencari nilai *roughnes sublayer* dapat menggunakan rumus:

$$\frac{k_s}{\delta'} = \frac{u_* \times d_{65}}{11,6 v} \dots \dots \dots (2.20)$$

Dimana:

k_s = kekerasan hidraulik ekuivalen, (m)

δ' = tebal lapisan pengaruh kekerasan dasar

u_* = kecepatan geser (*shear velocity*)

v = kekentalan *kinematic* air, cm²/detik

d_{65} = diameter sedimen lolos saringan 65%

Untuk mencari nilai (C_a) konsentrasi sedimen dapat menggunakan rumus:

$$C_a = \frac{I}{11,6} \frac{i_B \times q_B}{2 d v} \dots \dots \dots (2.21)$$

Dimana:

v = kecepatan rata-rata aliran, (m/s)

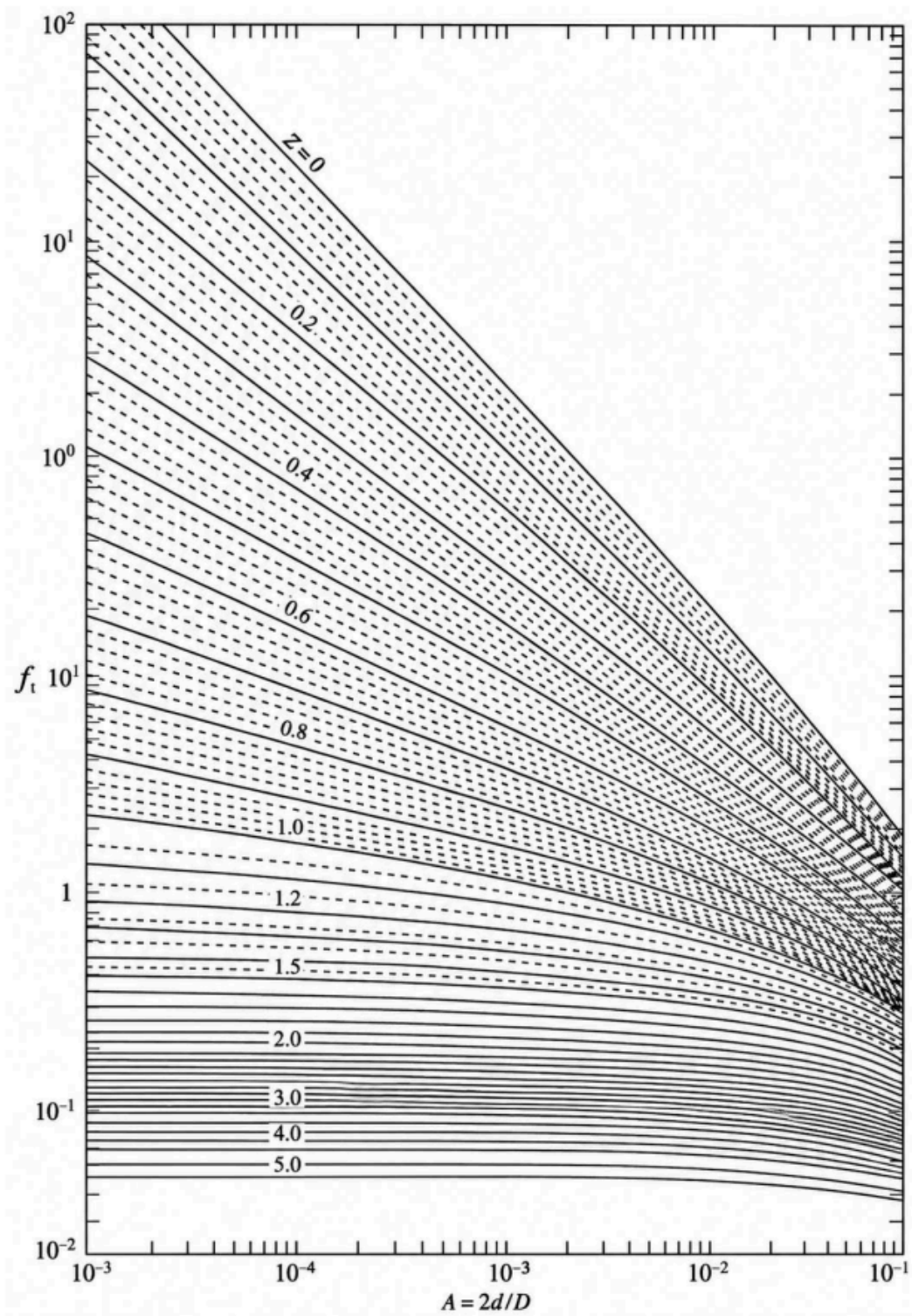
i_B = ukuran beban alas, (mm)

q_B = hasil muatan *bed load*, (ton/hari)

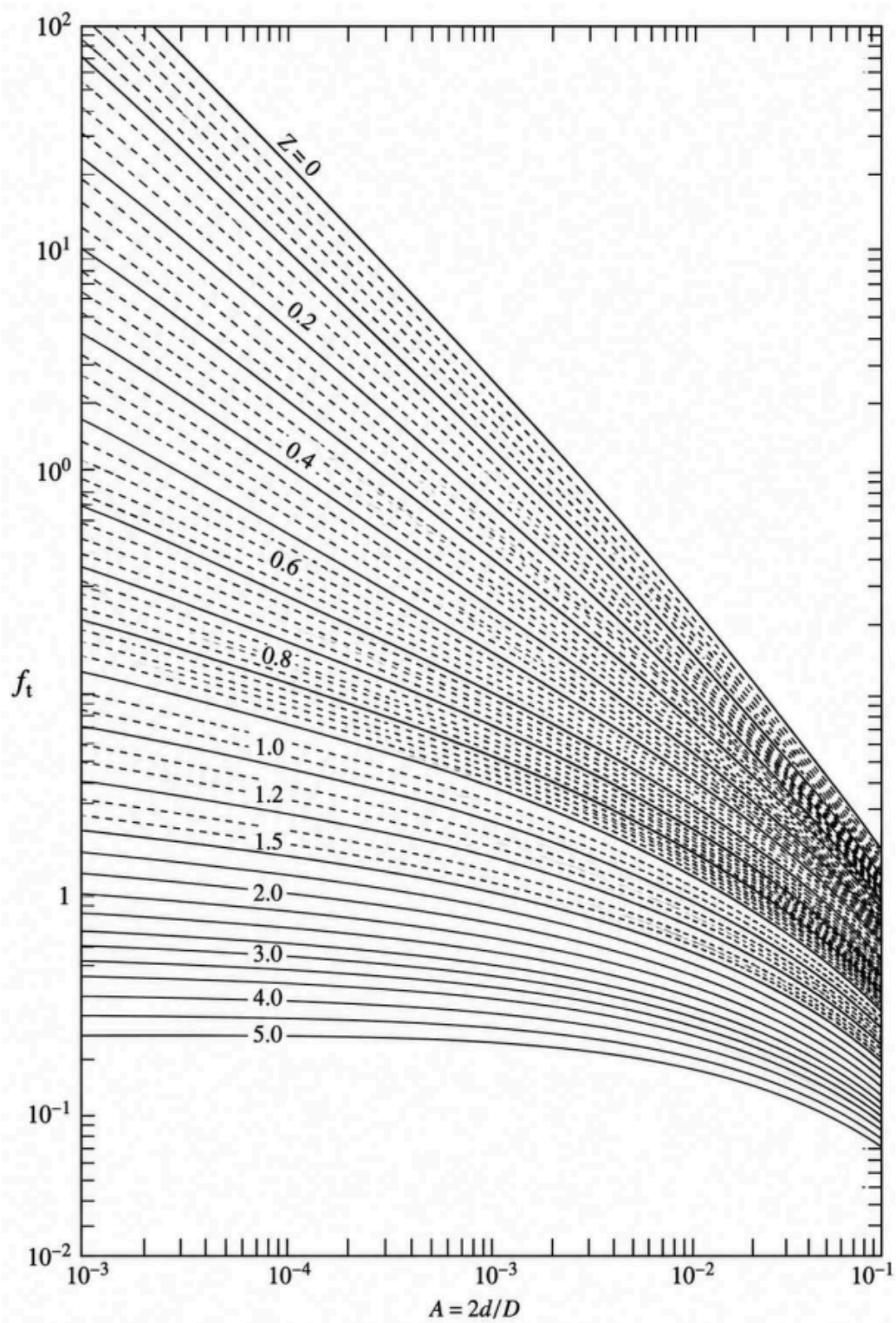
d = diameter butiran, (mm)

I = numerik terintegritas dapat dicari menggunakan

Gambar 2.11 untuk nilai I_1 dan Gambar 2.12 untuk I_2



Gambar 2.11 Nilai I_t Grafik Einstein
(Sumber : Soemarto, 1987).



Gambar 2.12 Nilai I2 Grafik Einstein
(Sumber : Soemarto, 1987).

Untuk mengetahui nilai (Z) *suspended* parameter dan (A) parameter kekasaran *relative* sedimen dapat dicari menggunakan rumus:

$$Z = \frac{\omega}{0,4XU'^*}$$

$$A = 2d_{65}/D$$

Dimana:

- ω = nilai *fall velocity*
- U'^* = kecepatan geser (*shear velocity*)
- X = *factor* koreksi kekasaran dasar
- 0,4 = konstanta *von-karman*

Untuk menghitung nilai (ω) *fall velocity* dapat menggunakan rumus:

$$\omega = \frac{1}{8} \frac{\gamma_s x \gamma}{\gamma} g \frac{d^2}{\nu} \dots \dots \dots (2.22)$$

Dimana:

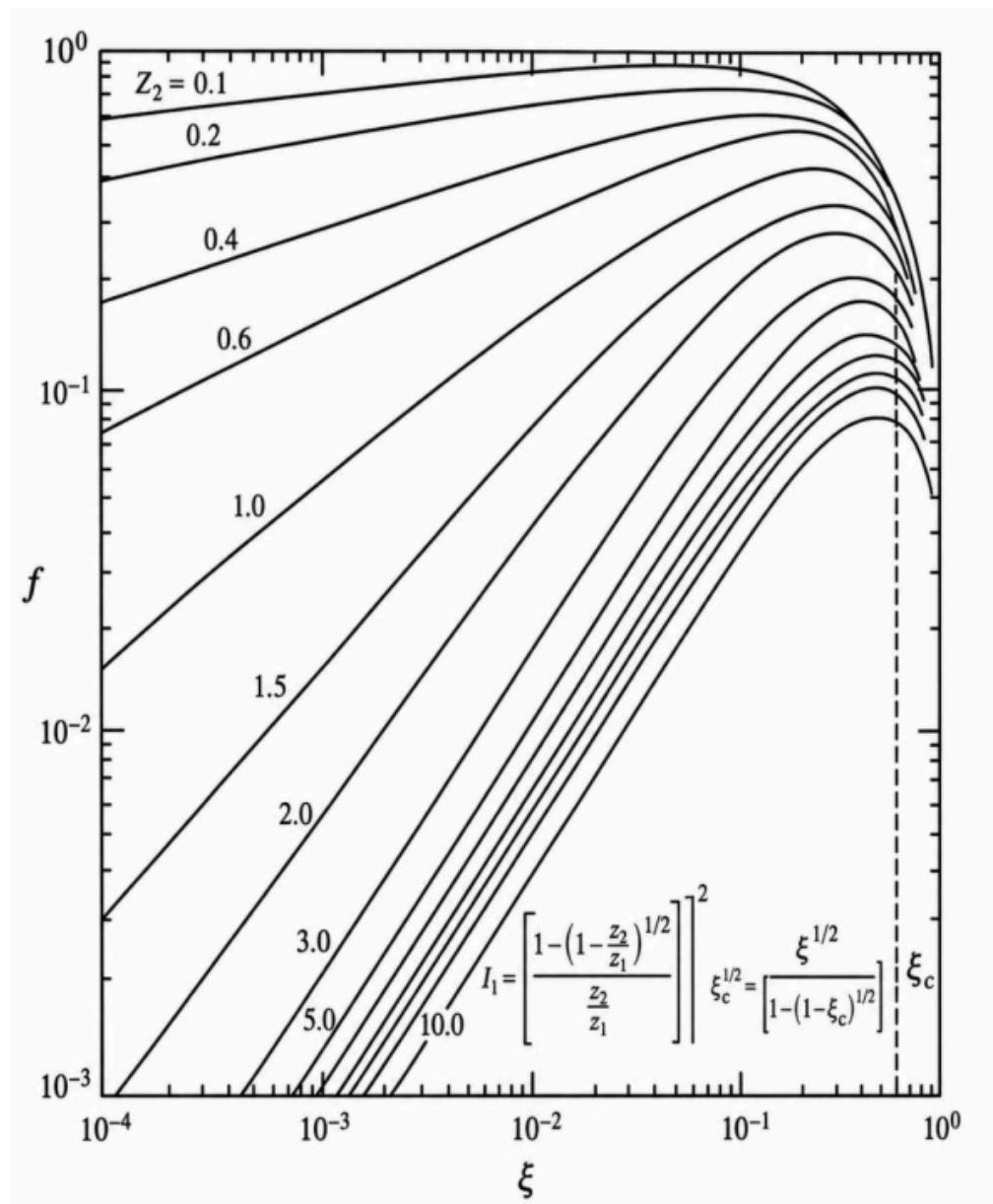
- γ_s = berat jenis sedimen, (g/cm^3)
- ω = *fall velocity* (kecepatan jatuh sedimen)
- γ = berat jenis air, (1000 kg/m^3)
- ν = *viskositas kinematic air*, (cm^2/detik)
- g = percepatan gravitasi, ($9,81 \text{ m/s}$)
- d = diameter butiran, (mm)

c. Metode Chang simons dan Richardson – 1965 (Diansari, 2014).

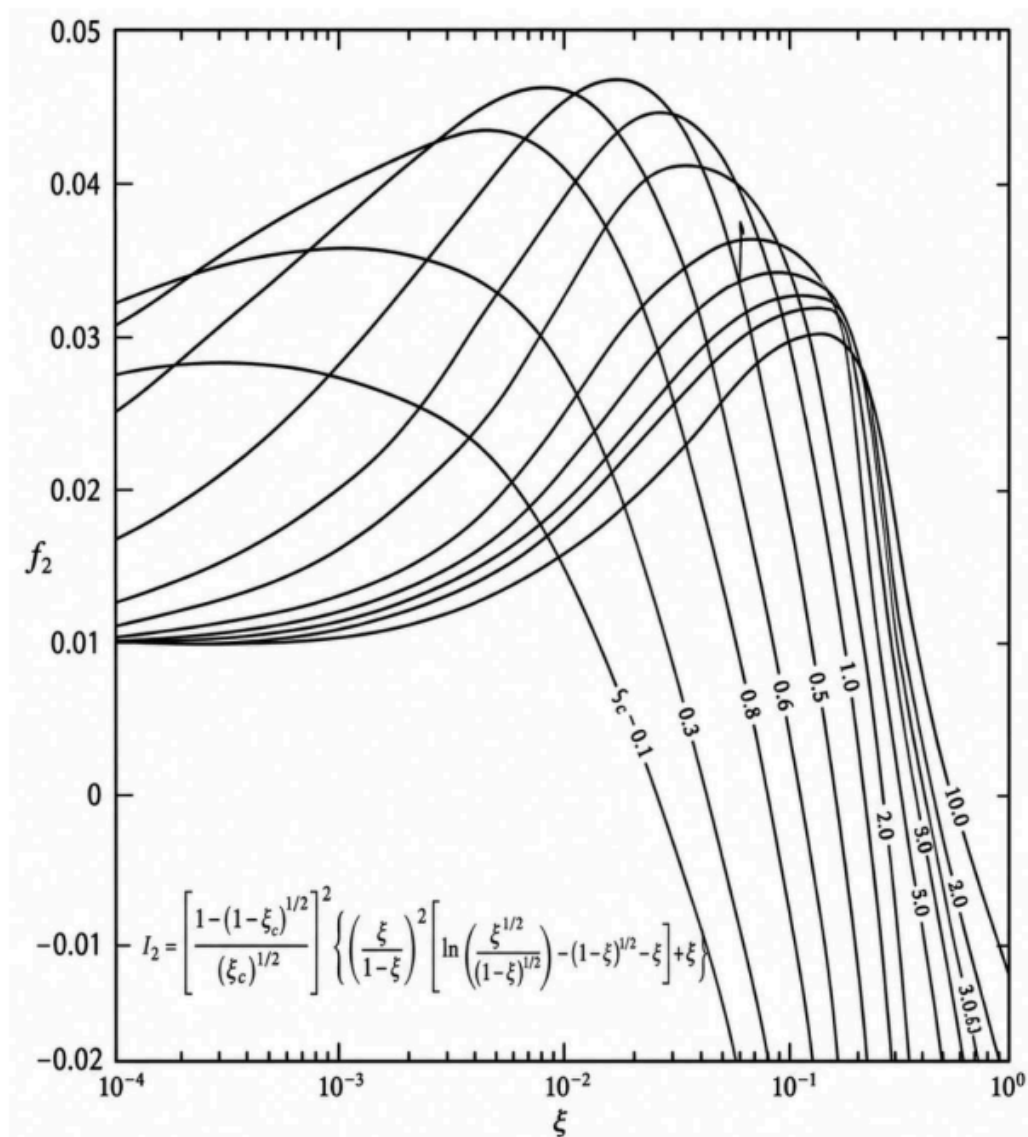
$$q_{sw} = \gamma D C_a (V \cdot I_1 \cdot \frac{2U_*}{k} I_2) \dots \dots \dots (2.23)$$

Dimana:

- q_{sw} = muatan *suspended load*, ton/m^3
- γ = berat jenis air, 1000 kg/m^3
- k = konstanta *Prandtl-von karman*, 0,4
- v = kecepatan rata-rata aliran, m/s
- D : kedalam sungai, m
- $U_* = U_* = (gRS)^{0,5}$ atau $U_* = (gDS)^{0,5}$
- Nilai C_a : $C_a = \frac{1}{11,6} \frac{i_B X q_B}{2 d v}$
- I = numerik terintergritas dapat dicari menggunakan Gambar 2,13 untuk nilai I_1 dan Gambar 2.14 untuk I_2



Gambar 2.13 Hubungan antara ε_a dan Z_2 didapat nilai I_1
(Sumber : Diansari, 2014).



Gambar 2.14 Hubungan antara ε_2 dan Z_2 didapat nilai I_2
(Sumber : Diansari, 2014).

3 Hitung nilai $\varepsilon_a = \frac{a}{D}$ dan $z_a = \frac{Z_\omega}{\beta U_{*k}}$

Hitung nilai koefisien korelasi (momentum)
menggunakan persamaan:

$$\beta = \frac{s}{B} \dots \dots \dots (2,24)$$

Dimana:

- 3
 γ_s = ukuran butiran beban alas, g/cm³
 q_B = hasil muatan *bed load*, ton/hari
 d = diameter butiran, mm

s = kemiringan sungai
 B = Panjang sungai, m
 g = gaya gravitasi, m/s

2.2.10. Batimetri

Survei batimetri merupakan salah satu jenis survei yang banyak diterapkan baik dalam pekerjaan lapangan maupun kegiatan penelitian. Kegiatan ini bertujuan untuk memperoleh posisi titik-titik dasar perairan pada koordinat yang telah ditentukan. Hasil akhir dari survei batimetri berupa gambaran topografi dasar badan air yang kemudian disajikan dalam bentuk peta batimetri (Syakinah Maghfirah Ayu et al., 2020).

Menurut Setiyono dan Heryono (1996), batimetri adalah ilmu yang mempelajari pengukuran kedalaman lautan maupun badan perairan lainnya, sedangkan peta batimetri adalah peta yang menunjukkan kondisi perairan beserta kedalamannya. Informasi batimetri sangat penting untuk penelitian dinamika pantai, operasi kelautan, instalasi kabel komunikasi bawah laut, serta keselamatan pelayaran. Salah satu parameter penting dalam pengukuran batimetri yang akurat adalah *Mean Sea Level* (MSL) atau rata-rata muka air laut.

Definisi lain dari batimetri adalah representasi tinggi-rendahnya bentuk topografi dasar laut yang disajikan dalam bentuk peta atau citra. Proses batimetri mencakup beberapa tahapan, mulai dari pengukuran kedalaman perairan, pengolahan data hasil survei, hingga visualisasi data yang telah diproses. Gambaran model dasar laut diperoleh melalui estimasi titik-titik kedalaman yang diukur sepanjang area survei. Kepadatan data yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh jarak antar jalir pengukuran; semakin rapat jarak antar lintasan, maka semakin banyak data kedalaman yang terkumpul. Dengan teknologi digital yang digunakan saat ini, sistem perekaman mampu menghasilkan data secara cepat, bahkan lebih dari satu titik per detik (Try Al Tanto et al., 2016).

Selain menghasilkan gambaran topografi dasar perairan, survei batimetri juga menyediakan informasi mengenai kedalaman yang bermanfaat untuk mengidentifikasi objek-objek di dasar perairan yang berpotensi membahayakan aktivitas pelayaran. Untuk memperoleh data kedalaman tersebut, survei batimetri dilakukan menggunakan metode pemeruman. Metode ini memanfaatkan gelombang akustik untuk mengukur kedalaman dasar perairan melalui penggunaan alat *echosounder* sebagai teknologi utamanya (Syakinah Maghfirah Ayu et al., 2020).

Proses pembuatan peta batimetri umumnya terdiri dari tiga tahap utama, yaitu: (1) pengumpulan data atau akuisisi data, (2) pengolahan data, dan (3) penyajian data. Pelaksanaan survei batimetri harus mengacu pada standar minimum ketelitian yang ditetapkan oleh *International Hydrographic Organization* (IHO) agar peta batimetri yang dihasilkan memenuhi syarat kualitas yang baik (Syakinah Maghfirah Ayu et al., 2020).

2.2.11. Sistem Informasi Geografis

Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan suatu sistem berbasis komputer yang dirancang untuk mengumpulkan, menyimpan, mengolah, menganalisis, serta menyajikan data dan informasi terkait objek atau fenomena yang memiliki keterkaitan dengan lokasi di permukaan bumi. SIG umumnya digunakan untuk berbagai keperluan, antara lain penelitian ilmiah, perencanaan pembangunan dan penentuan rute, pengelolaan sumber daya, serta penyusunan peta atau kegiatan kartografi (Diah Ratna Setianingrum et al., 2014).

Pengertian lain dari sistem informasi geografis adalah sebuah sistem komputer yang memiliki kemampuan untuk merekam, memasukkan, menyimpan, menganalisis, dan menampilkan data yang bersifat geografis. Teknologi ini memudahkan pengguna dalam memperoleh informasi mengenai karakteristik suatu wilayah. SIG berfungsi sebagai perangkat penting yang digunakan untuk menyimpan, memanipulasi, menganalisis, serta menyajikan kembali data terkait kondisi lingkungan dengan memanfaatkan data spasial dan atribut. Pada umumnya, sistem ini bekerja dengan dukungan komputer dan jaringan (Sasmito et al., 2017).

1. *Quantum-Geographic Information System* (QGIS)

QGIS (*Quantum Geographic Information System*) merupakan perangkat lunak berbasis *opensource* yang digunakan untuk pengolahan data, khususnya data spasial, sehingga dapat diakses secara gratis. Perangkat lunak ini terus dikembangkan untuk menambahkan berbagai fitur baru dan memperbaiki bug yang ditemukan. Hingga saat ini, QGIS menjadi salah satu software GIS *opensource* yang paling banyak digunakan. QGIS dapat dijalankan pada berbagai sistem operasi, termasuk Linux, Unix, Mac OS, Windows, dan Android, dengan dukungan berbagai format data seperti vektor, raster, dan basis data, serta menyediakan berbagai fungsi tambahan lainnya (Ezrahayu, 2024).

2.2.12. Transport Sedimen Menggunakan HEC-RAS

HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*) merupakan perangkat lunak pemodelan hidraulika sungai satu dimensi yang dikembangkan oleh *U.S. Army Corps of Engineers (USACE)*. Perangkat lunak ini digunakan secara luas dalam analisis aliran sungai, banjir, serta angkutan sedimen, baik dalam kondisi aliran permanen (*steady flow*) maupun tidak permanen (*unsteady flow*). HEC-RAS banyak diaplikasikan dalam perencanaan dan evaluasi bangunan air seperti bendung, tanggul, dan Aliran sungai karena kemampuannya dalam merepresentasikan kondisi hidraulika sungai secara kuantitatif (USACE, 2021). Modul *Sediment Transport* pada HEC-RAS dirancang untuk menghitung besarnya angkutan sedimen yang terjadi pada suatu ruas sungai berdasarkan interaksi antara aliran air dan material dasar sungai. Perhitungan dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik hidraulika aliran, seperti kecepatan, kedalaman, dan kemiringan dasar sungai, serta karakteristik sedimen berupa ukuran butir, berat jenis, dan distribusi gradasi sedimen. Dengan pendekatan ini, HEC-RAS mampu memberikan estimasi besaran angkutan sedimen dasar (*bed load*) maupun sedimen melayang (*suspended load*) secara numerik (USACE, 2021).

Pemodelan sedimen dalam HEC-RAS didasarkan pada persamaan kontinuitas sedimen yang dikenal sebagai *Exner Equation*, yang menyatakan bahwa perubahan elevasi dasar sungai terjadi akibat ketidakseimbangan antara sedimen yang masuk dan keluar pada suatu penampang sungai. Persamaan ini diintegrasikan dengan persamaan aliran *Saint-Venant* satu dimensi sehingga perubahan dasar sungai dapat dianalisis sebagai akibat langsung dari proses hidraulika dan transpor sedimen (USACE, 2021). HEC-RAS menyediakan berbagai formulasi empiris dan semi-empiris untuk menghitung laju angkutan sedimen, baik untuk *bed load* maupun *suspended load*. Beberapa metode yang umum digunakan antara lain *Meyer-Peter Müller*, *Engelund–Hansen*, *Ackers–White*, dan *Toffaleti*. Pemilihan metode angkutan sedimen pada HEC-RAS disesuaikan dengan kondisi sungai, ukuran sedimen dominan, serta karakteristik aliran. Metode *Meyer-Peter Müller* umumnya digunakan untuk sedimen kasar seperti pasir dan kerikil, sedangkan metode *Engelund–Hansen* lebih sesuai untuk sedimen halus dan kondisi aliran turbulen (Julien, 2010).

HEC-RAS banyak digunakan untuk menganalisis besarnya angkutan sedimen yang berkontribusi terhadap pendangkalan sungai dan penurunan kapasitas tampang aliran. Penelitian oleh Pratama et al. (2019) menunjukkan bahwa pemodelan sedimen menggunakan HEC-RAS dapat memberikan estimasi laju angkutan sedimen yang representatif apabila didukung oleh data

penampang sungai dan data sedimen hasil uji laboratorium. Hasil penelitian tersebut juga menegaskan bahwa HEC-RAS efektif digunakan sebagai alat evaluasi kondisi sedimentasi sungai.

Rahman dan Nugroho (2020) menyatakan bahwa HEC-RAS mampu menggambarkan variasi angkutan sedimen pada kondisi debit berbeda, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam evaluasi kinerja sungai dan perencanaan tindakan pengendalian sedimentasi. Selain itu, Putra et al. (2021) dalam studinya di sungai tropis menyimpulkan bahwa HEC-RAS cocok digunakan untuk analisis kuantitatif angkutan sedimen karena hasilnya dapat dikalibrasi dan divalidasi menggunakan data lapangan. Pada penelitian ini, HEC-RAS digunakan secara khusus untuk menghitung besaran angkutan sedimen, baik sedimen dasar maupun sedimen melayang, berdasarkan data debit, geometri sungai, serta karakteristik sedimen hasil pengujian laboratorium. Hasil perhitungan angkutan sedimen dari HEC-RAS selanjutnya dijadikan sebagai data pendukung dan pembandingan terhadap hasil pemodelan numerik menggunakan Delft3D, yang pada penelitian ini difokuskan untuk menganalisis pola sebaran sedimen dan perubahan morfologi sungai secara spasial. Dengan pendekatan ini, diharapkan diperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai dinamika sedimen sungai, baik dari sisi kuantitas angkutan maupun pola distribusinya.

2.2.13. Metode Numerik

Metode numerik merupakan cabang matematika yang digunakan untuk menyelesaikan berbagai persoalan yang telah diformulasikan dalam bentuk matematis melalui serangkaian operasi komputasi. Pendekatan ini bekerja dengan cara mendekati solusi nyata dari suatu model matematika menggunakan teknik perhitungan yang sistematis. Dalam penerapannya, metode numerik mengandalkan proses komputasi berulang untuk memperoleh penyelesaian dari persamaan-persamaan yang bersifat numerik (Fransiskus Gatot Imam Santoso, 2011).

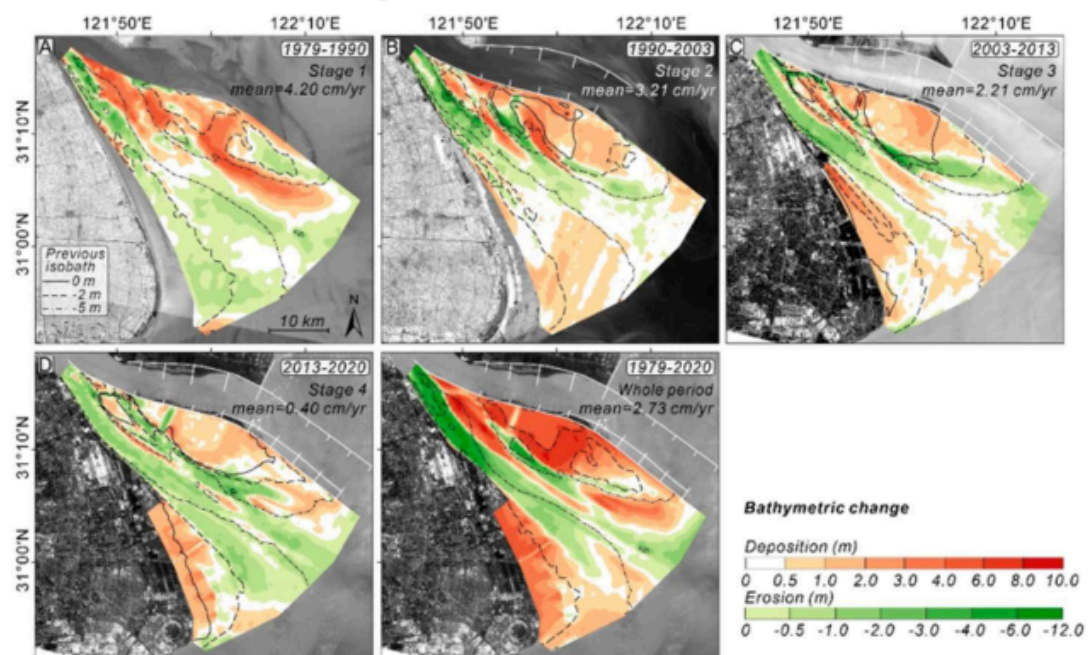
Pemodelan numerik adalah salah satu metode yang umum digunakan untuk menganalisis pola arus di perairan, termasuk lautan. Simulasi numerik melibatkan pemodelan dengan persamaan matematis, yang kemudian kondisi fisik pantai dan perairan ditransformasikan ke dalam lingkungan komputasi dan diselesaikan secara numerik menggunakan perangkat lunak, salah satunya Delft3D.

Penelitian ini menerapkan pemodelan numerik dengan memanfaatkan perangkat lunak Delft 3D. *Software* tersebut berfungsi untuk menjalankan

berbagai jenis simulasi, seperti simulasi transport sedimen, pergerakan aliran, dinamika gelombang, perubahan morfologi, ekologi, hingga kualitas air. Pendekatan numerik dalam Delft 3D diterapkan melalui berbagai modul, salah satunya Delft 3D-FLOW yang mengadopsi metode numerik berbasis elemen hingga (Lucyta Nugraha et al., 2021).

2.2.14. Pemodelan Numerik Delft3D

Perangkat lunak Delft3D merupakan sistem pemodelan yang dikembangkan oleh *University of Delft* di Belanda. Deltares telah mengembangkan kerangka kerja pemodelan yang unik dan terintegrasi penuh untuk pendekatan multidisiplin dan komputasi 3D untuk wilayah pesisir, sungai, danau, dan muara. Kerangka kerja ini dapat melakukan pemodelan numerik aliran, transpor sedimen, gelombang, kualitas air, perkembangan morfologi, dan ekologi. Kerangka kerja ini dirancang untuk para ahli maupun non-ahli. Kerangka kerja Delft3D terdiri dari beberapa modul, yang dikelompokkan berdasarkan antarmuka bersama, sekaligus mampu berinteraksi satu sama lain. Software ini dirancang untuk melakukan simulasi hidrodinamika baik dalam bentuk 2D maupun 3D.



Gambar 2.15 Visualisasi Pola Erosi dan Deposisi

Sumber : (Wang et al., 2024).

Pada modul Delft3D-FLOW, dasar pemodelan yang digunakan adalah perhitungan aliran tidak stabil (*unsteady flow*) serta proses transport akibat pengaruh pasang surut dan gaya-gaya eksternal seperti kondisi meteorologi.

Tujuan utama pemodelan ini adalah mensimulasikan arah angin dan dinamika pasang surut dalam bentuk 2D maupun 3D melalui penyelesaian persamaan aliran air dangkal (*Shallow Water Equations*). Pendekatan tersebut memungkinkan penyederhanaan komponen momentum vertikal menjadi hubungan tekanan yang bersifat hidrostatik (DELFT 3D, 2025).

Delft3D merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan simulasi komputasi terhadap berbagai proses hidrodinamika, termasuk pergerakan arus, transport sedimen, gelombang, kualitas air, serta perubahan morfologi dan aspek ekologi wilayah pesisir. Aplikasi ini umum diterapkan pada area pesisir, muara, danau, maupun sistem sungai. Delft3D terdiri dari beberapa modul yang diklasifikasikan berdasarkan fungsi dan jenis proses fisik yang dimodelkan, di antaranya adalah modul untuk hidrodinamika, transport sedimen, pemodelan gelombang, dan kualitas air. Delft 3D memiliki beberapa system yang dibedakan berdasarkan fungsinya, diantaranya yakni:

1. Delft3D-FLOW

Delft3D-Flow merupakan salah satu modul dalam Delft3D yang berfungsi untuk menyelesaikan *Shallow Water Equation* (SWE) atau persamaan aliran pada kondisi air dangkal. Perhitungan tersebut dilakukan terhadap variabel kecepatan dan elevasi muka air dalam bentuk dua maupun tiga dimensi pada suatu grid atau jaringan koordinat (Fahmi & Hafli, 2019). Pemodelan numerik merupakan metode yang banyak digunakan untuk mempelajari pola aliran di perairan, termasuk di lautan dan sungai. Pada metode ini, kondisi fisik perairan dan pantai dimodelkan menggunakan persamaan matematis, kemudian diterjemahkan ke dalam lingkungan komputasi dan diselesaikan secara numerik. Salah satu perangkat lunak yang sering digunakan untuk simulasi tersebut adalah Delft3D, yang mampu memprediksi distribusi aliran, perubahan morfologi dasar, serta transport sedimen.

Pada simulasi Delft3D, digunakan grid atau garis bantu sebagai dasar pemodelan. Grid berfungsi sebagai jaringan koordinat vertikal dan horizontal yang menentukan cakupan area simulasi sekaligus mengatur batas wilayah pemodelan. Terdapat dua jenis sistem grid, yaitu sistem koordinat kartesius yang berbentuk persegi, bersifat kaku, dan hanya memiliki dua parameter arah: vertikal (η) dan horizontal (ξ). Sementara itu, sistem koordinat bola (*spherical coordinates*) disusun mengikuti bentuk permukaan bumi. Sistem koordinat ini memiliki dua parameter utama, yaitu arah dan ketinggian, dengan lintang (θ) bernilai positif ke

arah utara serta bujur (ϕ) bernilai positif ke arah timur (DELFT 3D, 2025).

Dalam perangkat lunak Delft3D–Flow, tersedia tujuh fitur utama yang dapat digunakan sesuai kebutuhan pemodelan oleh pengguna. Fitur-fitur ini memberikan fleksibilitas dalam menjalankan berbagai fungsi simulasi sesuai tujuan analisis (DELFT 3D, 2025):

- Delft 3D-RGFRID:

Digunakan untuk membentuk area segmen berbasis grid yang mengikuti kontur atau bentuk topografi.

- Delft 3D-QUICKIN:

Berfungsi sebagai tempat untuk memasukkan berbagai jenis data output pada grid, seperti informasi batimetri, kondisi awal muka air, serta pengujian salinitas dan arus.

- Delft 3D-TRIANA:

Dipergunakan untuk menganalisis pasang surut dengan interval waktu

- Delft 3D-TIDE:

Dipergunakan untuk menganalisis pasang surut terhadap water level serta kecepatannya.

- Delft 3D-NESTHD:

Dipergunakan untuk membuat Batasan dari keseluruhan model.

- Delft 3D-QUICKPLOT:

Modul ini digunakan untuk menampilkan hasil simulasi yang telah dijalankan. Output yang dihasilkan dapat berupa visualisasi statis maupun animasi bergerak, sehingga memudahkan interpretasi pola aliran dan perubahan morfologi.

Delft3D-FLOW memakai beberapa persamaan pembangun yaitu, persamaan momentum, persamaan kontinuitas, dan persamaan transport (Lasser et al, 2004).

a. Persamaan momentum arah horizontal (x)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{u \partial u}{\sqrt{G\zeta\zeta} \partial \zeta} + \frac{v \partial u}{\partial \eta \sqrt{G\eta}} + \frac{\omega \partial u}{d + \zeta \partial \sigma} - \frac{V^2 \sqrt{G\eta\eta}}{\sqrt{G\zeta\zeta} \sqrt{G\eta\eta}} + \frac{uv \sqrt{G\zeta\zeta}}{\sqrt{G\zeta\zeta} \sqrt{G\eta\eta}} \\ - Fv \\ = \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G\zeta\zeta}} P\zeta + F\zeta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} v \frac{\partial u}{\partial \sigma} + M\zeta \dots \dots \dots (2.25) \end{aligned}$$

b. Persamaan momentum arah vertikal (y)

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \zeta}{\partial r} + \frac{u}{\sqrt{G\zeta\zeta}} \frac{\partial u}{\partial \zeta} + \frac{v}{\partial \eta \sqrt{G\eta}} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{V^2 \sqrt{G\eta\eta}}{\sqrt{G\zeta\zeta} \sqrt{G\eta\eta}} + \frac{uv \sqrt{G\zeta\zeta}}{\sqrt{G\zeta\zeta} \sqrt{G\eta\eta}} \\
& \quad - Fv \\
& = \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G\zeta\zeta}} P\zeta + F\zeta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} v \frac{\partial u}{\partial \sigma} + M\zeta \dots \dots \dots (2.26)
\end{aligned}$$

c. Persamaan kontinuitas

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \zeta}{\partial r} + \frac{1 \partial [(d + \zeta) U \sqrt{G\eta\eta}]}{\sqrt{G\zeta\zeta} \sqrt{G\eta\eta} \partial \zeta} + \frac{1 \partial [(d + \zeta) V \sqrt{G\zeta\zeta}]}{\sqrt{G\zeta\zeta} \sqrt{G\eta\eta} \partial \eta} \\
& = (d + \zeta) Q \dots \dots \dots (2.27)
\end{aligned}$$

Dengan U dan V dirata-ratakan terhadap kedalaman:

$$U = \frac{1}{d+\zeta} \int_4^6 u dz = \int_{-1}^0 u d\sigma \dots \dots \dots (2.28)$$

$$V = \frac{1}{d+\zeta} \int_4^6 v dz = \int_{-1}^0 v d\sigma \dots \dots \dots (2.29)$$

Dimana Q menunjukkan factor per unit area:

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E \dots \dots \dots (2.30)$$

Keterangan:

$\sqrt{G\zeta\zeta}$ = Koefisien transformasi kurvalinier (m)

$\sqrt{G\eta\eta}$ = Koefisien transformasi (m)

G = Percepatan gravitasi (m/s²)

$M\zeta$ = Sumber/keluaran momentum dalam arah X/ ζ
(kg m/s)

$M\eta$ = Sumber/keluaran momentum dalam arah Y/ η
(kg m/s)

U = Kecepatan rata-rata terhadap kedalaman pada arah X/ ζ (m/s)

u = Kecepatan aliran dalam tanah X/ ζ (m/s)

V = Kecepatan rata-rata terhadap kedalaman pada arah Y/ η (m/s)

v = Kecepatan aliran dalam tanah Y/ η (m/s)

ω = Frekuensi sudut pasang surut dan atau komponen Fourier

ζ = Elevasi muka air (m)

d. Persamaan transport sedimen

$$|Sb| = 0,006\eta\rho, wd \frac{1}{50} M^{0,5} M^{0,5} \dots\dots\dots(2.31)$$

Keterangan:

- Sb = Transport sedimen dasar (kg/m/s)
 η = Fraksi sedimen pada lapisan campuran (*mixing layers*)
 M = Pergerakan sedimen akibat gelombang dan arus
 Mc = Pergerakan kelebihan sedimen
 Wl = Kecepatan jatuh

Dengan nilai yang didefinisikan sebagai:

$$M = \frac{v_{eff}^2}{(s-1)gd50} \dots\dots\dots(2.32)$$

$$M = \frac{(v_{eff}-v_{eff})^2}{(s-1gd50)}.$$

$$V_{eff} = \sqrt{V_R^2 + V_{50}^2} \dots\dots\dots(2.33)$$

5

Keterangan:

- U_{on} = Kecepatan orbital (m/s)
 V_{eff} = Kecepatan efektif yang disebabkan oleh gelombang dan arus
 V_R = Kecepatan yang dirata-ratakan terhadap kedalaman
 S = Densitas relative dari fraksi sedimen
 G = Percepatan gravitasi Percepatan gravitasi

2. Delft3D-WAVE

Sistem ini pada umumnya digunakan untuk menganalisis bagaimana gelombang merambat. Modul tersebut berfungsi untuk menghasilkan simulasi perambatan gelombang, pembangkitan gelombang akibat angin, serta interaksi antar-gelombang secara linier. Selain itu, modul ini juga mempertimbangkan kondisi topografi dasar laut, tinggi dan pola angin, serta arus pada berbagai kedalaman air, baik untuk kondisi sedang, kuat, maupun terbatas.

3. Delft3D-WAQ

Sistem ini biasanya digunakan untuk menganalisis parameter kualitas air pada wilayah *far-field*. Modul tersebut mampu melakukan pemodelan kualitas perairan dan menjadi salah satu alat yang terbukti efektif dalam mendukung pengelolaan kualitas air maupun manajemen sumber daya air secara terpadu. Model kualitas air ini mencakup berbagai variabel kondisi, termasuk polutan atau zat yang masuk ke area pemodelan melalui batas wilayah maupun aliran lateral.

4. Delft3D-ECO

Sistem ini umumnya digunakan untuk pemodelan ekologi. Modul tersebut memungkinkan simulasi proses eutrofikasi secara kompleks, sehingga dapat memodelkan dinamika organisme dan interaksi dalam ekosistem secara lebih komprehensif.

5. Delft3D-SED

Sistem ini umumnya difungsikan untuk aktivitas pengangkutan sedimen.

6. Delft3D-PART

Sistem ini umumnya digunakan untuk menganalisis kualitas air serta pergerakan partikel di wilayah *midfield*. Modul ini menyediakan pemodelan numerik yang memungkinkan evaluasi pergerakan partikel sekaligus kondisi kualitas perairan, dan dapat pula diterapkan untuk memodelkan perairan yang tercemar oleh minyak.

2.2.15. Kriteria Validasi Kinerja Model

Validasi adalah proses untuk membuktikan bahwa model yang dibangun mampu mereplikasi kondisi dunia nyata secara akurat. Proses ini dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data observasi lapangan. Untuk penilaian yang objektif, digunakan indikator statistik kuantitatif.

Tabel 2.7 Hasil Uji Statistik Validasi Model

Kategori Kerja	RSR	NSE
Sangat Baik (Very Good)	$0,00 < \text{RSR} < 0,50$	$0,75 < \text{NSE} < 1,00$
Baik (Good)	$0,50 < \text{RSR} < 0,60$	$0,65 < \text{NSE} < 0,75$
Cukup (Satisfactory)	$0,60 < \text{RSR} < 0,70$	$0,50 < \text{NSE} < 0,65$
Tidak Memuaskan (Unsatisfactory)	$\text{RSR} > 0,70$	$\text{NSE} < 0,50$

(Sumber : Moriasi et al., 1983).

Pedoman yang diterima secara luas dan diadopsi dalam penelitian ini adalah yang dikembangkan oleh (Moriassi et al., 1983). Pedoman ini merekomendasikan beberapa statistik, di antaranya:

1. *Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)*: Mengukur seberapa baik plot data observasi vs. simulasi cocok dengan garis 1:1, Nilai 1 menunjukkan kecocokan sempurna, dan nilai $> 0,5$ dianggap memuaskan.

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{mean})^2} \dots \dots \dots (2.34)$$

2. RSR (*RMSE-observations standard deviation ratio*): Menstandarkan Root Mean Square Error (RMSE) dengan standar deviasi data observasi. Nilai yang lebih rendah (mendekati 0) menunjukkan kinerja yang lebih baik.

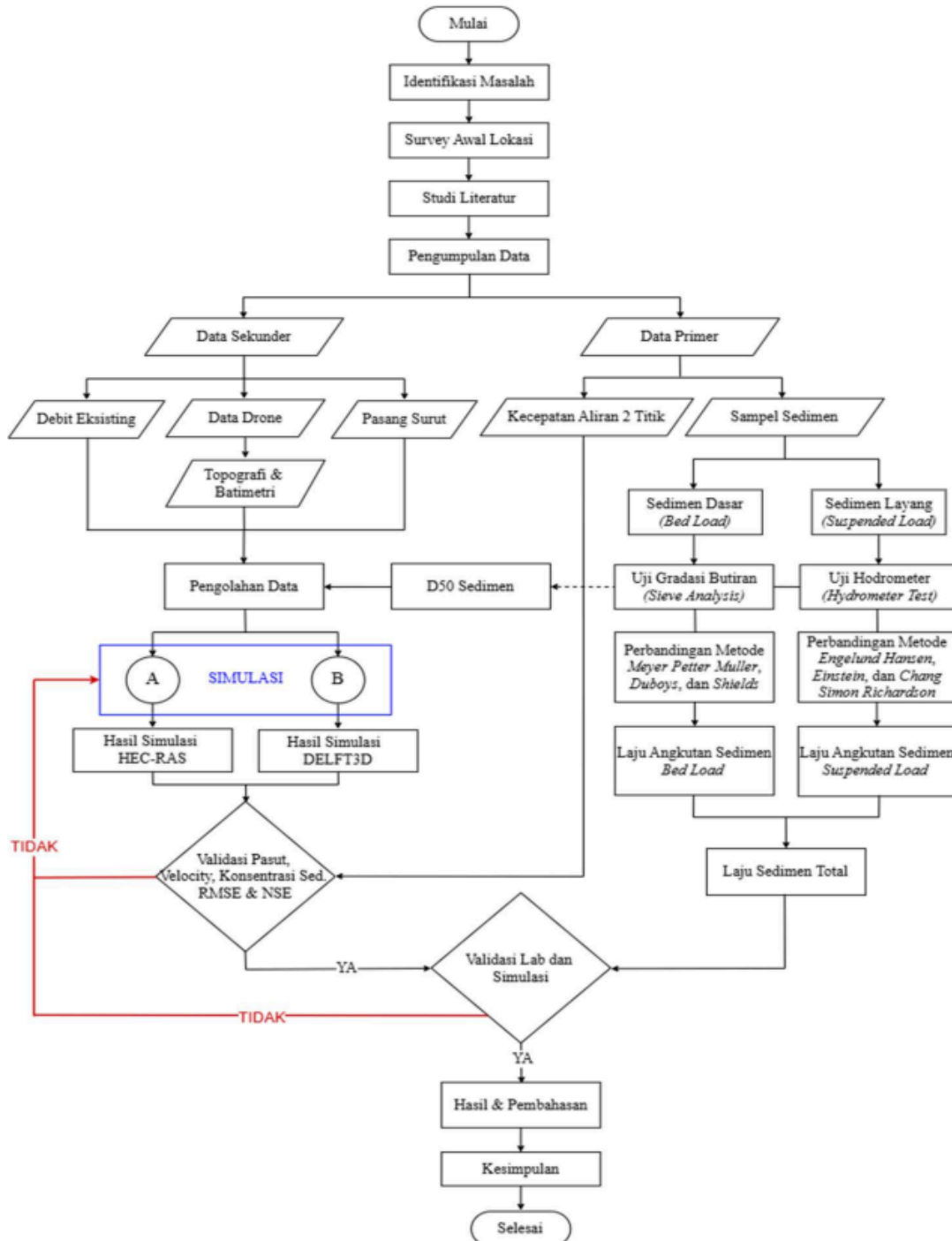
$$RSR = \frac{\sqrt{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}}{\sqrt{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}} \dots \dots \dots (2.35)$$

19
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

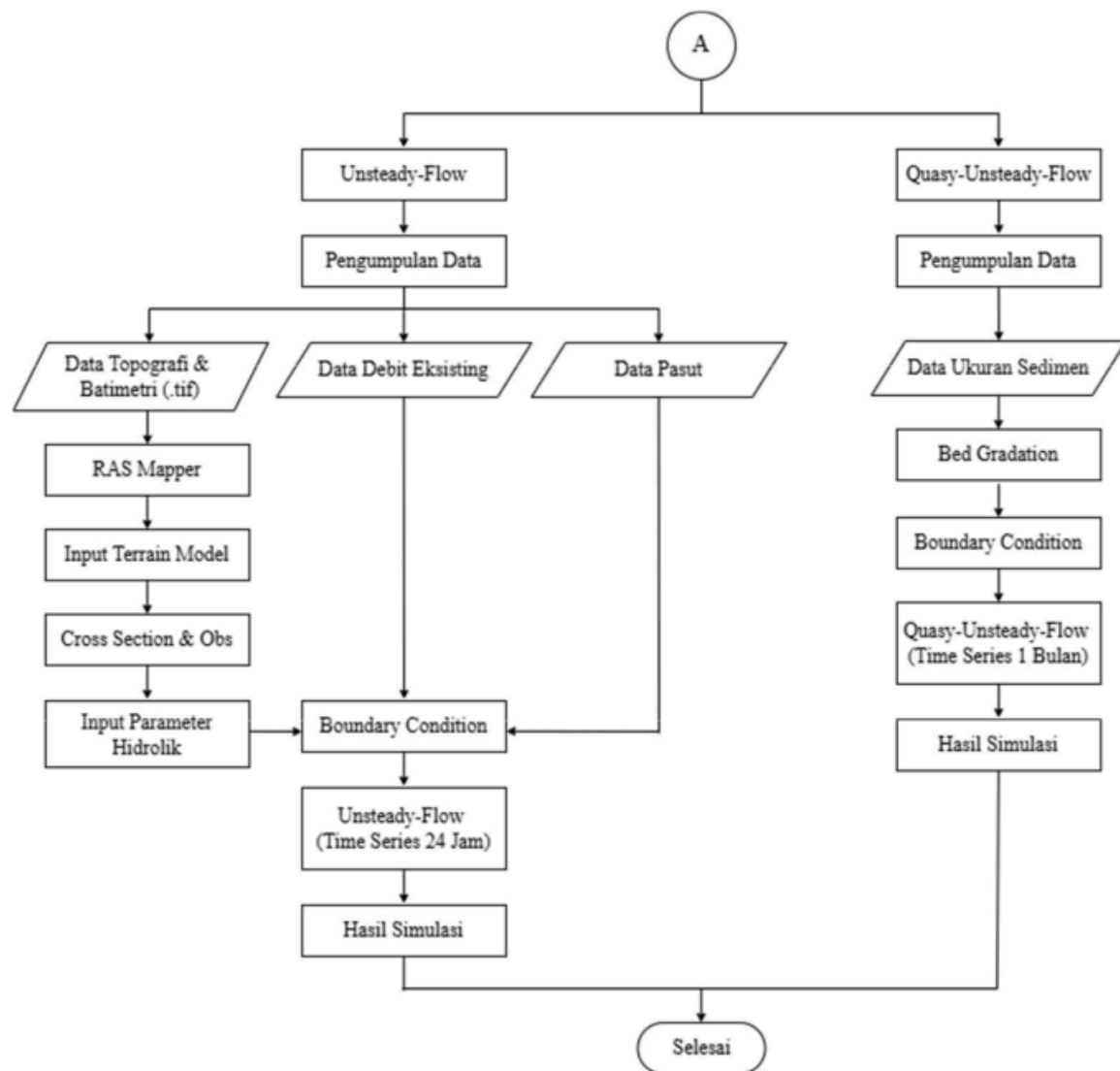
METODE PENELITIAN

3.1. Kerangka Alir Penelitian (Flowchart)



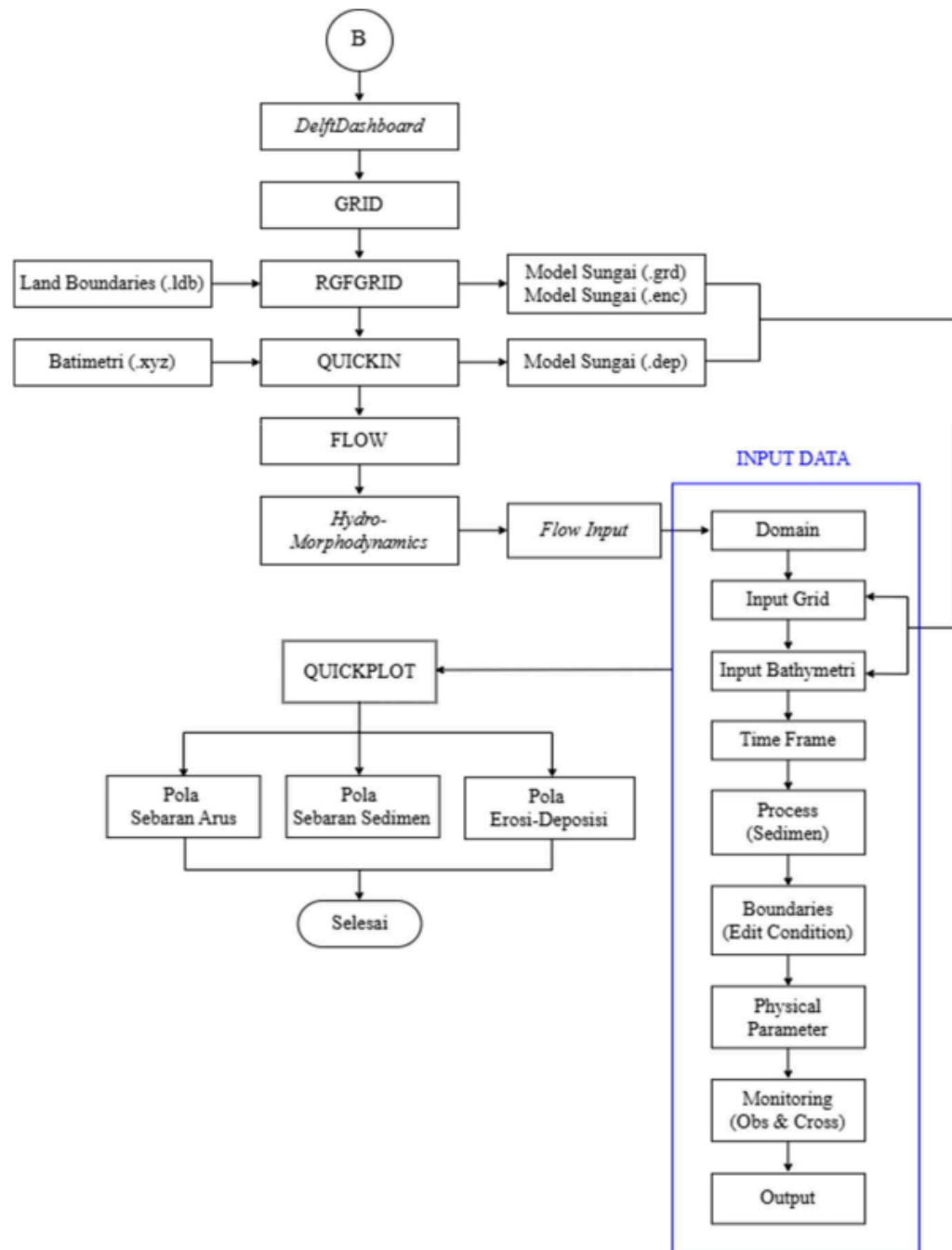
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

3.2. Kerangka Alir Simulasi A (HEC-RAS)



Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi A (HEC-RAS)
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

3.3. Kerangka Alir Simulasi B (Delft3D)



Gambar 3.3 Diagram Alir Simulasi B (Delft3D)
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

3.4. Penjelasang Kerangka Alir Penelitian

Flowchart ini menggambarkan tahapan penelitian yang dilakukan dalam analisis hidrodinamika menggunakan pemodelan numerik. Setiap langkah memiliki keterkaitan antara pengumpulan data, pemodelan, analisis, dan kesimpulan.

1. Identifikasi masalah

Identifikasi masalah merupakan salah satu tahapan penting yang dilakukan peneliti untuk melihat peluang penelitian serta menentukan isu utama yang layak dikaji secara ilmiah. Tahapan ini berfungsi untuk mengenali persoalan yang terjadi di lapangan, memahami faktor penyebabnya, dan menilai urgensi penelitian terhadap kondisi eksisting wilayah studi. Melalui identifikasi masalah, peneliti dapat merumuskan tujuan, batasan, serta arah analisis yang relevan dengan permasalahan yang akan diselesaikan.

Permasalahan yang dikaji dalam penelitian ini adalah pola erosi dan deposisi yang terjadi pada belokan Sungai Wonokromo, Surabaya, yang dipengaruhi oleh perubahan debit banjir tahunan serta aktivitas masyarakat di sekitar sempadan sungai. Fenomena ini menyebabkan penyempitan alir dan perubahan morfologi dasar sungai yang berdampak pada kapasitas penampang dan potensi banjir di wilayah sekitarnya. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kondisi debit dan sedimen eksisting, serta memodelkan perubahan morfologi sungai akibat variasi debit banjir menggunakan perangkat lunak Delft3D agar dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai dinamika erosi-deposisi yang terjadi.

2. Survey awal lokasi

Survei awal lokasi merupakan tahapan pendahuluan yang bertujuan untuk memperoleh gambaran kondisi eksisting wilayah penelitian sebelum dilakukan pengambilan data dan pemodelan secara rinci. Pada tahap ini dilakukan pengamatan langsung di lapangan untuk mengidentifikasi karakteristik fisik sungai, seperti bentuk Alir dan belokan sungai, kondisi tebing (adanya erosi atau penggerusan), indikasi deposisi sedimen di dasar atau sisi dalam tikungan, serta kondisi lingkungan sekitar bantaran sungai. Survei ini juga membantu menentukan segmen sungai yang paling representatif dan kritis untuk dianalisis, khususnya lokasi yang menunjukkan perubahan morfologi yang signifikan.

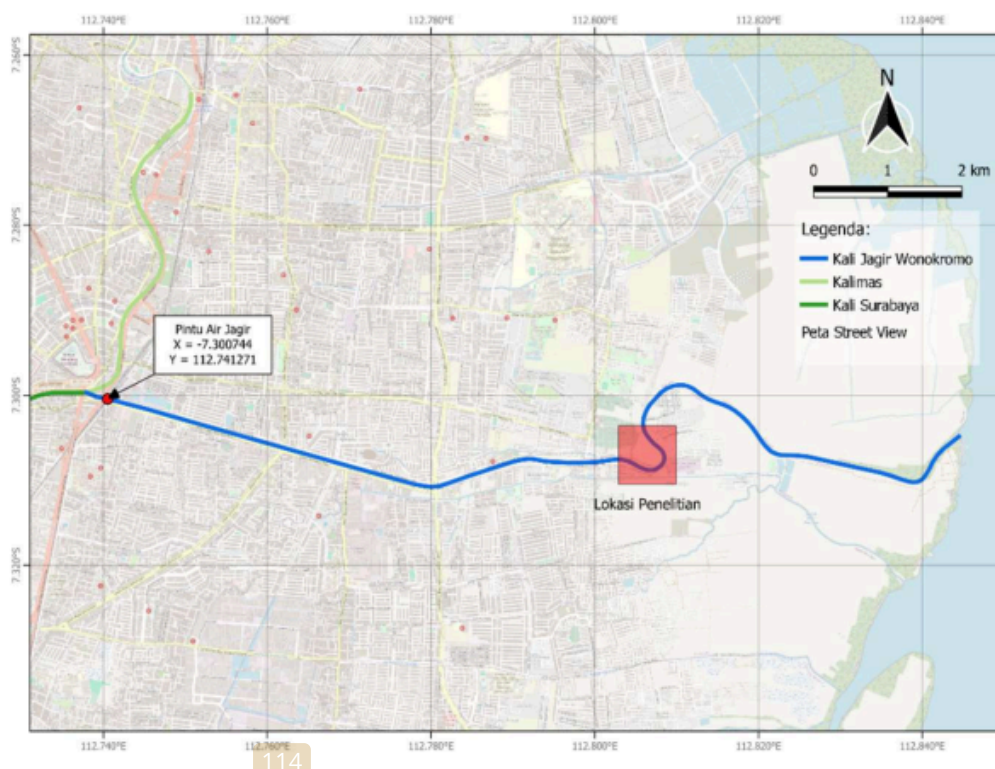
Survei awal lokasi juga berfungsi untuk menentukan kebutuhan dan strategi pengambilan data primer, seperti titik pengukuran kecepatan aliran, lokasi pengambilan sampel sedimen *bed load* dan *suspended load*, serta penentuan penampang sungai. Informasi hasil survei lapangan ini menjadi dasar dalam penyesuaian data sekunder (peta, batimetri, dan data hidrologi) serta sebagai acuan dalam penyusunan domain pemodelan numerik Delft3D agar sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Dengan demikian, survei awal lokasi berperan penting dalam meningkatkan akurasi analisis dan validitas hasil penelitian.

3. Studi literatur

Tahapan ini bertujuan untuk menambah wawasan peneliti mengenai tema penelitian yang akan dikaji, yaitu analisis pola erosi-deposisi akibat perubahan debit banjir pada belokan Sungai Wonokromo. Pada tahap ini, peneliti mencari berbagai informasi terkait kondisi wilayah studi, karakteristik morfologi sungai, serta faktor-faktor hidrologis yang memengaruhi perubahan bentuk Alir sungai. Peneliti juga menelusuri dasar-dasar teori yang relevan melalui jurnal ilmiah, laporan penelitian, buku teks, makalah, publikasi media, serta sumber terpercaya lainnya yang memiliki keterkaitan dengan analisis transport sedimen dan dinamika sungai. Diharapkan informasi yang diperoleh dapat membantu peneliti dalam memahami kondisi eksisting Sungai Wonokromo serta memberikan referensi mengenai penggunaan perangkat lunak yang sesuai, khususnya Delft3D, dalam melakukan pemodelan perubahan morfologi akibat variasi debit banjir.

4. Pengumpulan data

Pengumpulan data adalah proses mengumpulkan berbagai jenis informasi yang diperlukan untuk mendukung pelaksanaan penelitian. Penelitian ini berlokasi di Sungai Wonokromo, yang merupakan bagian dari sistem Sungai Brantas Hilir dan berfungsi sebagai Aliran utama pengendali banjir serta aliran drainase Kota Surabaya. Secara geografis, Sungai Wonokromo mengalir dari Bendung Jagir di Kecamatan Wonokromo menuju muara Wonorejo yang terhubung langsung dengan Selat Madura dan Laut Jawa di bagian timur Kota Surabaya.



Gambar 3.4 Peta Lokasi Penelitian

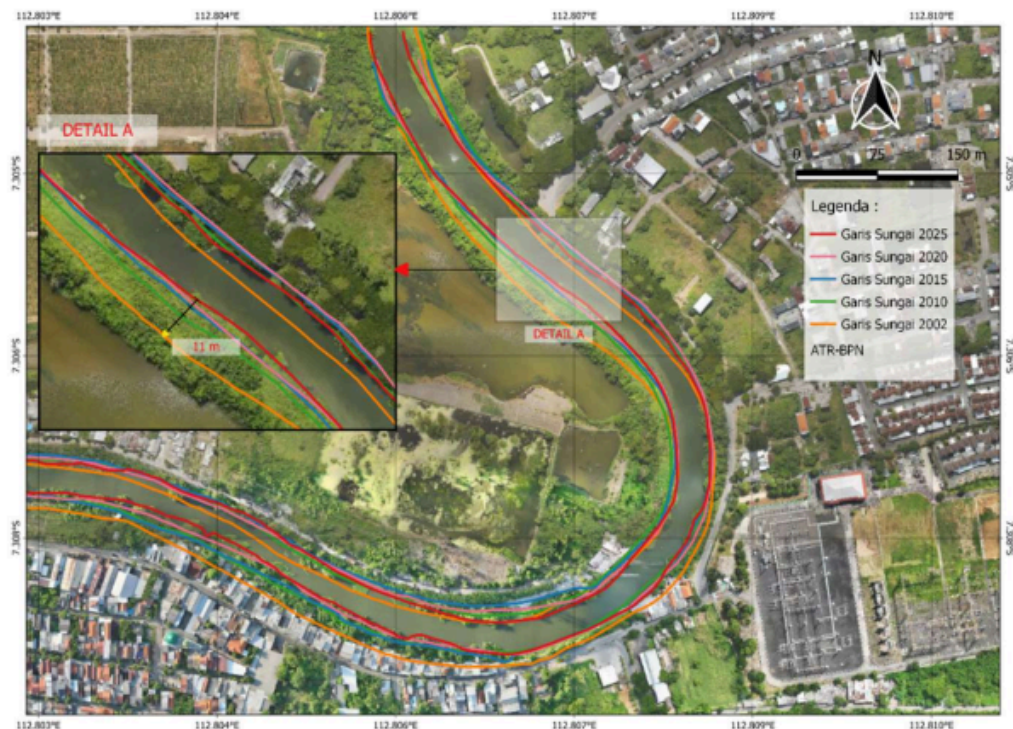
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Fokus penelitian terletak pada belokan Sungai Wonokromo bagian hilir, tepatnya di wilayah Kelurahan Wonorejo, Kecamatan Rungkut, Kota Surabaya, yang berada tidak jauh dari kawasan ekowisata mangrove Wonorejo. Segmen ini dipilih karena menunjukkan bentuk tikungan alami (*meander*) yang cukup tajam dan menjadi area transisi antara aliran sungai dan pasang surut laut, sehingga proses erosi dan deposisi berlangsung sangat dinamis. Berdasarkan pengamatan lapangan dan laporan BBWS Brantas (2023), bagian luar tikungan di wilayah ini mengalami pengikisan tebing (*bank erosion*) yang cukup parah, sedangkan di sisi dalam terjadi penumpukan sedimen (deposisi) yang menyebabkan penyempitan penampang sungai dan pergeseran Alir arus utama (*thalweg*).

Topografi di sekitar lokasi penelitian relatif datar dengan elevasi antara 0 hingga 3 meter di atas permukaan laut (mdpl). Jenis tanah di daerah ini didominasi oleh endapan aluvial muda yang terdiri atas lempung, lanau, dan pasir halus, yang bersifat mudah tererosi dan tertransportasi oleh aliran sungai. Berdasarkan data curah hujan dari BMKG Juanda (2023), wilayah Surabaya bagian timur memiliki curah hujan rata-rata tahunan sekitar 1,700 mm/tahun, dengan intensitas tinggi

pada bulan Desember hingga Maret, yang meningkatkan potensi terjadinya banjir dan transport sedimen.

Secara geografis, lokasi penelitian berada pada kisaran koordinat $7^{\circ}19'25'' - 7^{\circ}19'50''$ LS dan $112^{\circ}48'10'' - 112^{\circ}49'00''$ BT. Untuk titik hulu sungai atau awal penelitian berada pada koordinat -7,307748, 112,804289 dan titik hilir berada pada koordinat -7,305249, 112,806840, total panjang sungai yang diteliti adalah 954m. Daerah sekitar sungai didominasi oleh lahan tambak, vegetasi mangrove, serta permukiman penduduk di sisi dalam tikungan. Kondisi ini menunjukkan adanya tekanan antropogenik, terutama dari aktivitas masyarakat yang mendirikan kandang ternak, bangunan semi permanen, dan pembuangan limbah domestik langsung ke sungai, yang mempercepat proses sedimentasi di sisi dalam tikungan.



Gambar 3.5 Perubahan Penampang Garis Sungai 2002 - 2025
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Dari aspek hidrologi, segmen hilir Sungai Wonokromo ini memiliki karakteristik aliran campuran karena dipengaruhi oleh debit kiriman dari Bendung Jagir di hulu pada Gambar 3.4, dan gelombang pasang surut Laut Jawa di hilir. Saat debit banjir meningkat bersamaan dengan air pasang, kecepatan arus di sisi luar tikungan meningkat secara signifikan sehingga memicu penggerusan dasar dan dinding sungai.

Sebaliknya, ketika pasang menurun atau debit sungai kecil, sedimen terendapkan di sisi dalam sungai sehingga membentuk endapan delta kecil.



Gambar 3.6 Pata Kondisi Sisi Luar dan Sisi Dalam Tikungan
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Kondisi kombinasi antara pengaruh debit banjir dari hulu, pasang surut dari hilir, dan aktivitas manusia di sekitar sempadan, menjadikan belokan Sungai Wonokromo di wilayah Wonorejo sebagai area yang sangat representatif untuk meneliti pola erosi-deposisi akibat perubahan debit banjir. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah bagi perencanaan pengendalian sedimentasi, perlindungan tebing sungai, serta pengelolaan kawasan sempadan secara berkelanjutan di wilayah pesisir Surabaya. Dalam penelitian ini, data yang digunakan terdiri atas data primer dan data sekunder.

a. Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh secara langsung melalui pengamatan di lapangan. Dalam penelitian ini, data primer dikumpulkan melalui *ground check* atau survei lapangan, yang didukung dengan dokumentasi kondisi eksisting lokasi penelitian. Dokumentasi ini berfungsi sebagai data pendukung untuk

menganalisis kondisi spesifik pada lokasi penelitian. Selain dokumentasi, untuk sample sedimen sendiri juga diambil melalui survey lapangan langsung.



Gambar 3.7 Titik Koordinat Pengambilan Data Sekunder
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Data - data tersebut yakni sebagai berikut:

1. *Sample sedimen dasar (bed load)*

Pengambilan data sample sedimen dasar (*bed load*) menggunakan alat *grab sampler*.



Gambar 3.8 *Grab Sampler*

(Sumber : Dokumentasi Peneliti, 2026)

Pengambilan data ini dilakukan dengan mengambil sample sedimen pada 2 titik lokasi seperti pada Gambar 3.7. Setiap titik

diambil 1 sample sedimen sebagai bahan validasi. Pengambilan pada titik pertama dilakukan di tengah penampang pada koordinat -7,307615, 112,803886, dan Pengambilan titik kedua dilakukan di tepi penampang pada koordinat -7,307705, 112,803859.

2. *Sample sedimen layang (suspended load)*

Pengambilan data sample sedimen melayang (*suspended load*) menggunakan alat *suspended sediment sampler* model USDH - 48.



Gambar 3.9 *Suspended Sampler USDH - 48*

(Sumber : Dokumentasi Peneliti, 2026)

Pengambilan data ini dilakukan dengan mengambil sample sedimen pada 1 titik lokasi. Satu titik tersebut diambil 3 sampel sedimen yaitu pada ketinggian 0,8H, 0,5H, dan 0,2H. Pengambilan titik *sample* sedimen layang dilakukan di tengah penampang pada koordinat -7,308552, 112,805842,

3. Kecepatan Aliran 2 titik

Pengambilan data kecepatan aliran juga dilakukan sebagai bahan validasi nantinya. Validasi diperlukan agar keakuratan data yang dihasilkan pada proses simulasi HEC-RAS dan Delft3D dapat menggambarkan keadaan dilapangan secara akurat. Titik pengambilan kecepatan aliran dapat dilihat pada Gambar 3.7, Alat yang digunakan dalam pengambilan data kecepatan aliran adalah *Current Meter*. Pengambilan data dilakukam pada Tengah penampang sungai.

4. Debit Banjir Rencana.

Data debit banjir rencana diperoleh dari Perum Jasa Tirta 1, Jasa ASA Wilayah Sungai Brantas yang beralamatkan di Jl Karah no 6 Jambangan Surabaya.

b. Data Sekunder

Data sekunder adalah data yang diperoleh secara tidak langsung, artinya data tersebut tidak dikumpulkan secara langsung oleh peneliti. Sumber data sekunder umumnya berasal dari jurnal, buku, tesis, laporan instansi, dan sumber terpercaya lainnya. Beberapa data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Pasang Surut

Data pasang surut yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data yang diperoleh dari penelitian sebelumnya (Pamungkas & Patriadi, 2025).

2. Batimetri

Data batimetri yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data yang diperoleh dari penelitian sebelumnya (Maulana N.S. & Patriadi, 2025).

3. Debit Banjir Eksisting

Data Debit banjir eksisting yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data yang diperoleh dari penelitian sebelumnya (Pamungkas & Patriadi, 2025).

5. Pengolahan data sample sedimen

Pengolahan data sample sedimen yang didapatkan dari observasi lapangan kemudian dilakukan tes laboratorium. Tes laboratorium dilaksanakan di Laboratorium Hidroteknik dan Surveying ITS (Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya), tes ini dilakukan untuk mencari nilai D_{50} (ukuran butiran sedimen rata-rata) sebagai salah satu parameter yang dimasukkan dalam perhitungan manual dan visualisasi pada Software HEC-RAS dan Delft3D. Perhitungan angkutan sedimen *bed load* dan *suspended load* dilakukan secara manual menggunakan perbandingan metode Mayer-Petter Muller, Duboys, dan Shield untuk *bed load*, sedangkan untuk *suspended load* menggunakan perbandingan metode Engelund dan Hansen, Einstein, dan Chang simons Richardson. Untuk rumus-rumus metode tersebut sudah dijelaskan di BAB II.

6. Simulasi HEC-RAS

Simulasi menggunakan *software* HEC-RAS dilakukan melalui tahapan (A) pada Gambar 3.2, Uraian penjelasan tahapan tersebut adalah sebagai berikut:

A. *Unsteady Flow*

a. Persiapan Data Topografi (*Terrain*)

Tahap awal pemodelan dimulai dengan melakukan impor data *Terrain* hasil penelitian terdahulu ke dalam fitur *RAS Mapper* sebagai dasar geometri model.

b. Konfigurasi Geometri dan Mesh

Pada menu *Geometric Data*, data *Terrain* yang telah diunggah kemudian dihubungkan dengan pembuatan *2D-Flow Area* sebagai batas domain pemodelan. Dalam studi ini, resolusi komputasi ditentukan dengan mengatur ukuran *mesh* sebesar 10 x 10 meter.

c. Optimalisasi Grid dengan Breaklines

Untuk memastikan orientasi sel mengikuti Alir sungai secara presisi, dibuat *2D Area Breaklines* yang berfungsi membagi *mesh* agar selaras dengan geometri sungai.

d. Penentuan Alir dan *Cross Section*

Kembali ke *RAS Mapper*, dilakukan digitasi Alir sungai (*River*) yang diikuti dengan pembuatan penampang melintang (*Cross Section*) selebar 75 meter dengan interval antar penampang setiap 20 meter. Selanjutnya, dilakukan penentuan *reference points* pada koordinat yang sama dengan lokasi pengambilan sampel sedimen dan pengukuran kecepatan aliran lapangan untuk keperluan validasi data.

e. Pengaturan Batas Model (Boundary Conditions)

Batas-batas pemodelan didefinisikan dengan menambahkan *Boundary Condition (BC) Line* pada bagian hulu dan hilir sungai melalui menu *Geometric Data*.

f. Input Data Hidrograf debit dan Pasang Surut

Data aliran tidak tunak (*unsteady flow*) diinputkan melalui menu *Unsteady Flow Data*. Pada batas hulu, digunakan data *flow hydrograph* berdasarkan hasil pengamatan debit eksisting, sedangkan pada batas hilir digunakan data fluktuasi pasang surut.

g. Parameter Kekasaran aliran

Karakteristik hambatan aliran pada setiap penampang ditentukan dengan menginputkan koefisien kekasaran *Manning* sebesar 0,045 pada menu *Cross Section*.

h. Eksekusi Simulasi

Tahap akhir dilakukan melalui menu *Unsteady Flow Analysis* dengan memuat file geometri dan data aliran yang telah disimpan. Program dijalankan dengan mengaktifkan fitur *geometry preprocessor*, *unsteady flow simulation*, serta *post processor*, kemudian mengatur rentang waktu simulasi (*simulation time*) sebelum proses komputasi dimulai.

B. *Quasy Unsteady Flow*

a. Persiapan Geometri

Prosedur awal untuk pemodelan *Quasi-Unsteady Flow* mengikuti langkah-langkah yang sama dengan persiapan *Unsteady Flow*, mulai dari pengunggahan data *Terrain* hingga pengaturan batas domain pemodelan.

b. Konfigurasi Aliran Quasi-Unsteady

Input data dilakukan melalui menu *Quasi-Unsteady Flow*. Pada bagian hulu, parameter aliran ditentukan menggunakan data *flow hydrograph*, sementara pada bagian hilir digunakan data *stage hydrograph* sebagai kondisi batas elevasi muka air.

c. Parameter Transpor Sedimen

Pengaturan karakteristik sedimen dilakukan pada menu *Sediment Data* dengan menentukan *initial condition* dan *transport parameter*. Dalam penelitian ini, perhitungan transpor sedimen menggunakan metode Meyer-Peter-Muller (MPM), dengan metode Thomas untuk *sorting material*, serta metode Rubey untuk perhitungan *fall velocity*.

d. Penginputan data *Bed Gradation*

Data *bed gradation* diperoleh dari hasil uji gradasi butiran yang sudah dilakukan, kemudian diinputkan sesuai dengan ukuran butir sedimen.

e. Eksekusi Simulasi Sedimen

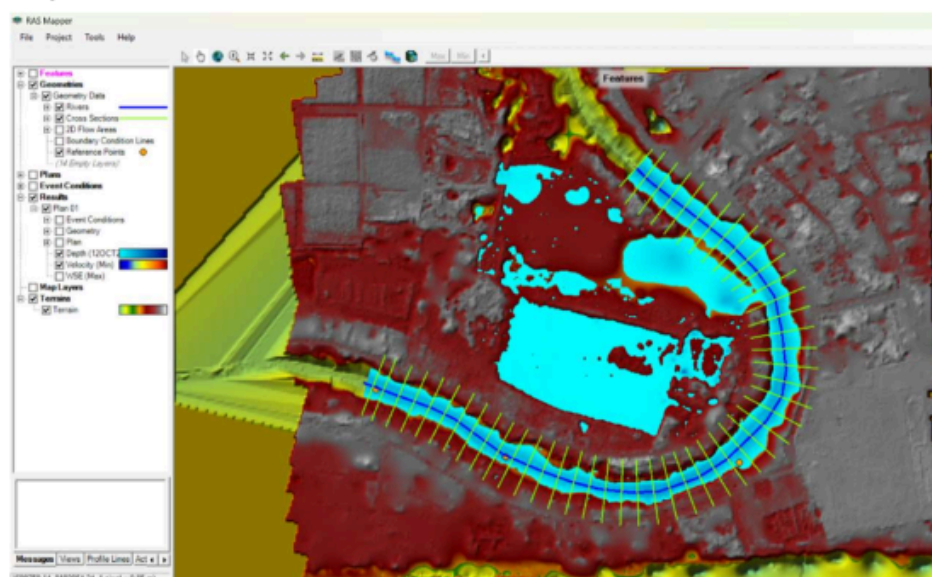
Tahap komputasi dilakukan pada menu *Quasi-Unsteady Flow Analysis* dengan memuat file geometri dan data aliran yang telah disiapkan. Proses simulasi dijalankan dengan mengaktifkan fitur *geometry preprocessor*, *unsteady flow simulation*, *sediment*, serta

post processor. Setelah pengaturan rentang waktu simulasi selesai, proses *compute* dapat dimulai.

1 Berikut ini merupakan konfigurasi beserta penjelasan singkat mengenai beberapa hal yang terdapat dalam *Software* HEC-RAS:

a. RAS Mapper

125 RAS Mapper adalah salah satu fitur dalam HEC-RAS yang digunakan untuk melakukan visualisasi, pengolahan, dan analisis data spasial berbasis peta dalam pemodelan hidrolika sungai. Fitur ini memungkinkan pengguna untuk menampilkan hasil simulasi seperti tinggi muka air, kedalaman, dan kecepatan aliran secara dua dimensi sehingga lebih mudah dipahami secara visual. Selain itu, RAS Mapper juga berperan dalam pembuatan dan pengelolaan geometri model, termasuk pembentukan *terrain* dari data topografi (DEM), penyusunan mesh komputasi, serta penentuan batas domain simulasi. Dengan kemampuannya tersebut, RAS Mapper menjadi alat penting dalam analisis genangan banjir dan interpretasi dinamika aliran sungai secara spasial, serta dapat terintegrasi dengan perangkat lunak Sistem Informasi Geografis seperti QGIS untuk kebutuhan analisis lanjutan.

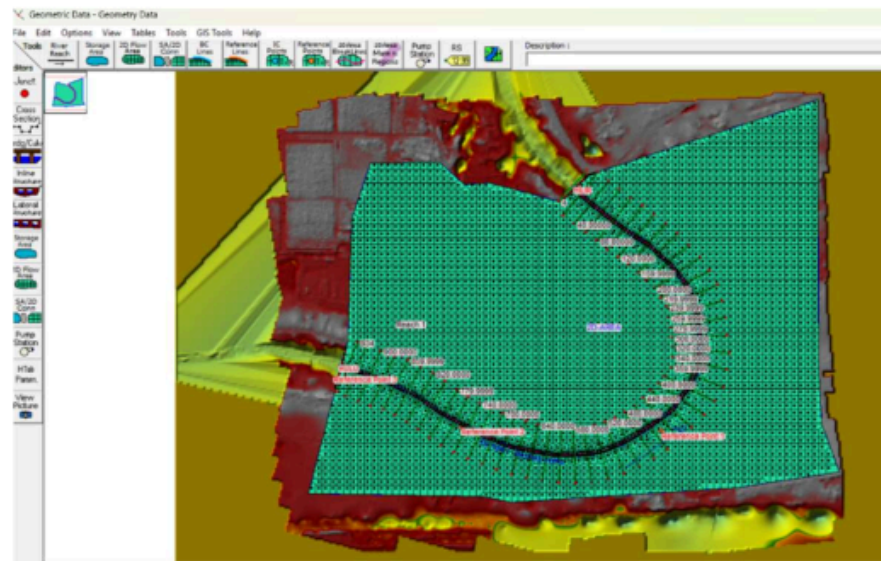


Gambar 3.10 RAS Mapper pada HEC-RAS
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

b. *Geometric Data*

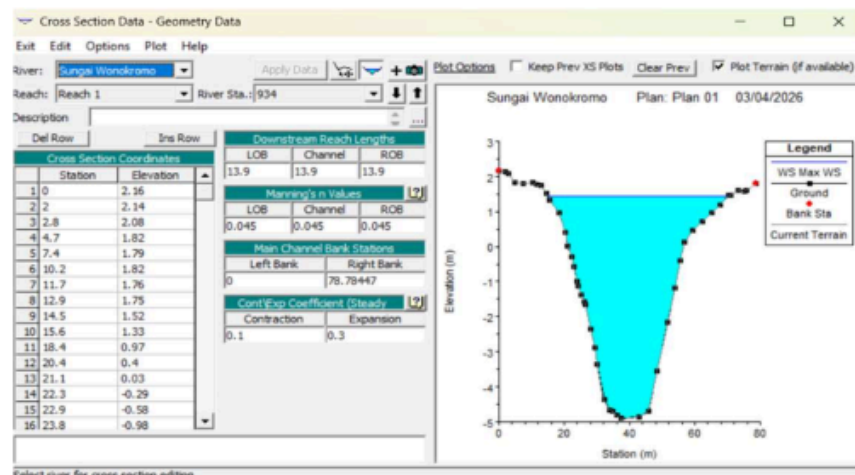
Geometric data adalah data yang merepresentasikan bentuk fisik dan karakteristik geometri suatu sistem sungai atau aliran yang digunakan dalam pemodelan hidrolika. Data ini mencakup informasi seperti

penampang melintang sungai, elevasi dasar sungai, lebar dan bentuk Aliran, kemiringan, serta elemen tambahan seperti tanggul, jembatan, atau struktur hidrolis lainnya. Geometric data menjadi komponen utama dalam simulasi karena menentukan bagaimana aliran air bergerak, menyebar, dan berinteraksi dengan kondisi fisik di lapangan. Dalam pemodelan, data ini biasanya diinput melalui editor geometri atau divisualisasikan menggunakan fitur seperti RAS Mapper, sehingga model dapat menggambarkan kondisi nyata sungai secara akurat dan menghasilkan simulasi yang lebih representatif.



Gambar 3.11 Input *Geometric Data (2D-Area, 2D-Breaklines area, BC Line)*

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 3.12 Input *Cross Section dan Data Manning*

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

c. Boundary Condition

Boundary condition (kondisi batas) dalam pemodelan hidrolika menggunakan HEC-RAS adalah parameter yang ditentukan pada batas awal dan akhir domain model untuk mengontrol bagaimana aliran masuk, keluar, atau berperilaku selama simulasi. Kondisi ini dapat berupa debit aliran (*flow hydrograph*), tinggi muka air (*stage hydrograph*), atau hubungan debit-tinggi muka air (*rating curve*) yang diberikan pada titik-titik tertentu seperti hulu, hilir, maupun batas samping pada model 2D. *Boundary condition* sangat penting karena menjadi penggerak utama simulasi; tanpa penentuan kondisi batas yang tepat, hasil model tidak akan mencerminkan kondisi sebenarnya di lapangan. Oleh karena itu, pemilihan dan penetapan *boundary condition* harus didasarkan pada data hidrologi dan hidraulika yang akurat agar simulasi aliran dan genangan yang dihasilkan dapat dipercaya.

Unsteady Flow Data - Unsteady Flow

File Options Help

Description:

Boundary Conditions Initial Conditions

Stage Hydrograph Flow Hydrograph

Normal Depth Lateral Inflow

T.S. Gate Openings Elev Control

Rules Precipitation

Add RS ... Add SA/2D Flow Area ...

Select Location in:

River	Reach
1 Sungai Wonokrom	Reach 1
2 Sungai Wonokrom	Reach 1

Storage/2D Flow Areas

ID	2D-AREA	BCLine
1	2D-AREA	BCLine: HILIR
2	2D-AREA	BCLine: HULU

Stage Hydrograph

2D: 2D-AREA BCLine: HILIR

☐ Read from DSS before simulation

Select DSS file and Path

File:

Path:

☒ Enter Table

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

☐ Use Simulation Time: Date: 11OCT2025 Time: 1600

☒ Fixed Start Time: Date: 11OCT2025 Time: 1600

Data time interval: 1 Hour

No. Ordinates Interpolate Missing Values Del Row Ins Row

No.	Date	Simulation Time (hours)	Stage (m)
1	11Oct2025	1600	0.119
2	11Oct2025	1700	0.021
3	11Oct2025	1800	-0.079
4	11Oct2025	1900	-0.16
5	11Oct2025	2000	-0.051
6	11Oct2025	2100	0.248
7	11Oct2025	2200	0.632
8	11Oct2025	2300	1.026
9	11Oct2025	2400	1.265
10	12Oct2025	0100	1.274
11	12Oct2025	0200	1.086
12	12Oct2025	0300	0.772
13	12Oct2025	0400	0.443
14	12Oct2025	0500	0.118
15	12Oct2025	0600	-0.185
16	12Oct2025	0700	-0.439

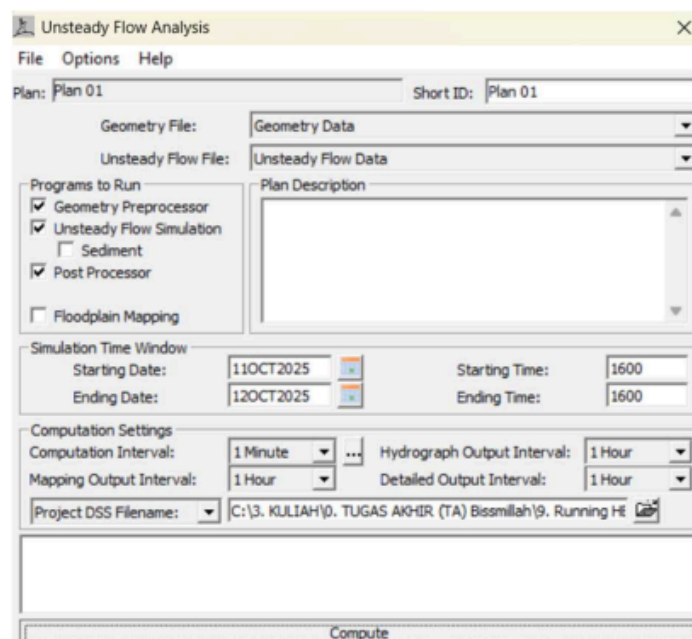
Gambar 3.13 Input *Boundary Condition*

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

d. Unsteady Flow Analysis

Unsteady Flow Analysis dalam HEC-RAS adalah jenis analisis aliran yang mempertimbangkan perubahan kondisi aliran terhadap waktu, sehingga debit, kecepatan, dan tinggi muka air tidak dianggap konstan melainkan berubah secara dinamis selama periode simulasi.

Analisis ini digunakan untuk memodelkan fenomena yang bersifat tidak tetap seperti banjir, gelombang aliran, atau pengaruh pasang surut, di mana kondisi aliran pada suatu waktu sangat dipengaruhi oleh kondisi sebelumnya. Dalam penerapannya, *Unsteady Flow Analysis* memerlukan input berupa hydrograph debit atau tinggi muka air sebagai *boundary condition* serta pengaturan interval waktu komputasi. Dengan pendekatan ini, model mampu merepresentasikan perilaku aliran secara lebih realistis dibandingkan analisis *steady flow*, terutama untuk studi genangan banjir dan dinamika aliran sungai yang kompleks.

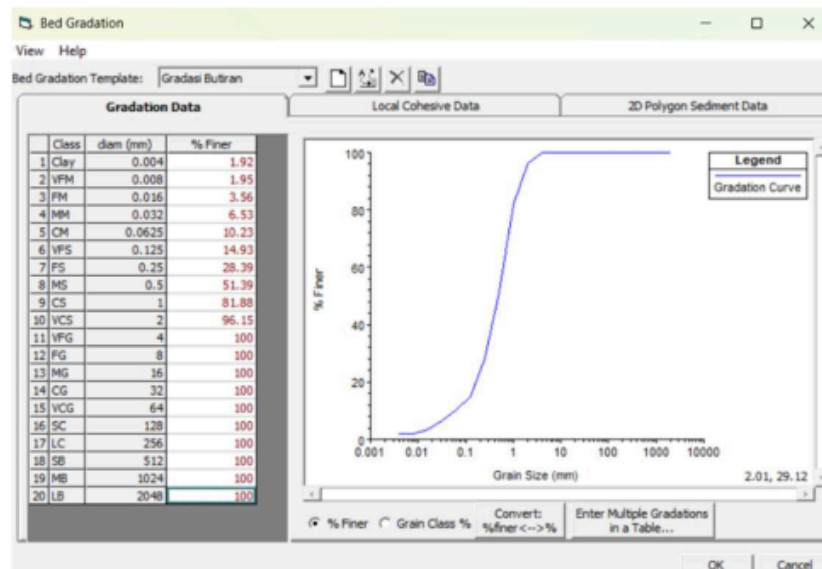


Gambar 3.14 *Compute Unsteady Flow Analysis*
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

e. *Quasi Unsteady Flow Analysis*

Quasi Unsteady Flow Analysis dalam HEC-RAS adalah pendekatan analisis aliran yang memodelkan perubahan kondisi aliran terhadap waktu, tetapi tidak sepenuhnya menyelesaikan persamaan aliran tak tunak secara kontinu seperti pada *unsteady flow*. Dalam metode ini, hidrograf aliran yang berubah terhadap waktu dipecah menjadi beberapa kondisi aliran tunak (*steady*) pada interval waktu tertentu, sehingga setiap langkah waktu dihitung sebagai kondisi *steady* yang berdiri sendiri. Pendekatan ini umumnya digunakan dalam simulasi transport sedimen karena lebih stabil secara numerik dan lebih sederhana dibandingkan *unsteady flow* penuh, namun tetap mampu

merepresentasikan tren perubahan debit dan respon morfologi sungai secara bertahap. Meskipun demikian, karena tidak mempertimbangkan efek dinamika gelombang aliran secara detail, hasilnya cenderung kurang akurat untuk fenomena yang sangat dipengaruhi oleh perubahan cepat terhadap waktu seperti banjir ekstrem atau gelombang pasang surut.



Gambar 3.15 Input *Bed Gradation* Sedimen
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

The 'Sediment Transport Analysis' window contains the following input fields and options:

- Plan :** [Empty field] **Short ID :** [Empty field]
- Geometry File :** Geometry Data
- Quasi-Unsteady Flow :** [Dropdown menu]
- Sediment Data :** [Dropdown menu]
- Simulation Time Window :**
 - Starting Date :** 11OCT2025
 - Ending Date :** 12OCT2025
 - Starting Time :** 1600
 - Ending Time :** 1600
- Plan Description :** [Text area]
- ☐ **Mixed Flow (Beta)**
- Compute** button

At the bottom, there is a text prompt: 'Enter/Edit short identifier for plan (used in plan comparisons)'.

Gambar 3.16 *Compute Quasy Unsteady Flow*
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

7. Simulasi Delft3D

Simulasi menggunakan *Software Delft3D* dilakukan melalui tahapan (B) pada Gambar 3.2. Uraian penjelasan tahapan tersebut adalah sebagai berikut:

- a. Tahap pertama dalam pengolahan data adalah mendigitasi batas antara daratan dan perairan sungai serta menyesuaikan datum sesuai referensi koordinat yang digunakan. Data batas daratan yang digunakan dalam perangkat lunak Delft3D memiliki format *landboundary* (.ldb). Demikian pula, data batimetri perlu didigitasi untuk membedakan wilayah daratan dan perairan sungai. Proses ini penting karena mesh pada Delft3D menggunakan sistem *rectangular grid* dan bukan triangulasi, sehingga memerlukan pemisahan yang jelas antara area daratan dan perairan.
- b. Tahap selanjutnya adalah pembuatan kisi-kisi (*grid*) pada domain lokasi penelitian, khususnya di belokan Sungai Wonorejo. Grid dibuat dengan pola persegi, dan proses pengeditan grid dilakukan di dalam perangkat lunak Delft3D. Semakin kecil resolusi grid yang digunakan, semakin tinggi pula tingkat ketelitian dan akurasi model.
- c. Proses visualisasi perubahan garis pantai memerlukan beberapa data pendukung, antara lain data pasang surut dan data debit sungai. Data pasang surut digunakan selanjutnya untuk memvalidasi output pemodelan. Hasil yang diperoleh dari proses ini meliputi arah dan kecepatan arus serta laju sedimentasi di wilayah belokan Sungai Wonorejo.
- d. Hasil dari pemodelan pola arus yang terjadi selanjutnya dapat dilakukan pemodelan numerik sedimentasi dengan menambahkan data sedimen (D50) yang didapatkan pada pengujian laboratorium sebelumnya.

Berikut ini merupakan konfigurasi beserta penjelasan singkat mengenai beberapa hal yang terdapat dalam *Software Delft3D*:

a. GRID/RGFGRID

Delft3D-FLOW.RGFGRID adalah program untuk pembangkitan dan memanipulasi grid kurvilinear terstruktur untuk Delft3D-FLOW dan Delft3D-WAVE, serta grid tak terstruktur untuk D-Flow *Flexible Mesh*. Sistem koordinatnya dapat berupa *Cartesian* atau bola. Delft3D-FLOW adalah program simulasi untuk aliran dan transpor hidrodinamik dalam 2 dan 3

dimensi pada grid kurvilinear, sedangkan D-Flow *Flexible Mesh* untuk grid tak terstruktur (RGFGRID, 2025).

b. QUICKIN

Berfungsi untuk melakukan interpolasi antara domain grid dan data batimetri di wilayah lokasi penelitian. QUICKIN adalah program untuk pembangkitan, interpolasi, atau manipulasi besaran ruang yang bervariasi seperti batimetri, kondisi awal, atau bidang parameter pada kisi Kartesius atau bola (kurvilinear), misalnya, yang dibuat dengan RGFGRID. Batimetri dapat dihasilkan untuk program simulasi hidrodinamik Delft3D-FLOW dan Delft1D2D. QUICKIN dapat menampilkan animasi berkas banjir yang dihasilkan dengan Delft1D2D (QUICKIN, 2025). Grid dan batimetri yang telah di interpolasikan merupakan data kedalaman awal yang ada di lokasi studi dan nantinya data ini akan dipergunakan sebagai input di DELFT3D FLOW.

c. FLOW

FLOW merupakan modul di Delft3D-FLOW untuk konfigurasi pemodelan. Modul ini terdiri atas berbagai fitur yang mengatur proses visualisasi setelah data pemodelan *Hydro-Morphodynamic* dimasukkan (FLOW, 2025). Adapun penjelasan singkat dari setiap fitur yang terdapat di Flow input yakni sebagai berikut (FLOW, 2025):

1. Domain

Pada menu *Flow Input* pada perangkat lunak Delft3D, bagian Domain digunakan untuk mendefinisikan wilayah atau area komputasi yang akan disimulasikan dalam model hidrodinamika. Domain merupakan representasi ruang perairan yang menjadi tempat berlangsungnya proses aliran, pasang surut, sedimentasi, maupun *transport* sedimen yang dihitung oleh model.

Secara umum, domain dibangun berdasarkan grid atau *mesh* yang telah dibuat sebelumnya pada modul grid generator. Domain menentukan batas spasial simulasi, sehingga seluruh perhitungan kecepatan aliran, elevasi muka air, debit, hingga perubahan morfologi hanya dilakukan di dalam area tersebut. Pada penelitian sungai atau estuari, domain biasanya mencakup bagian hulu, hilir, serta area tikungan atau lokasi yang menjadi fokus kajian.

Dalam menu domain terdapat beberapa komponen penting, antara lain:

A. *Grid Definition.*

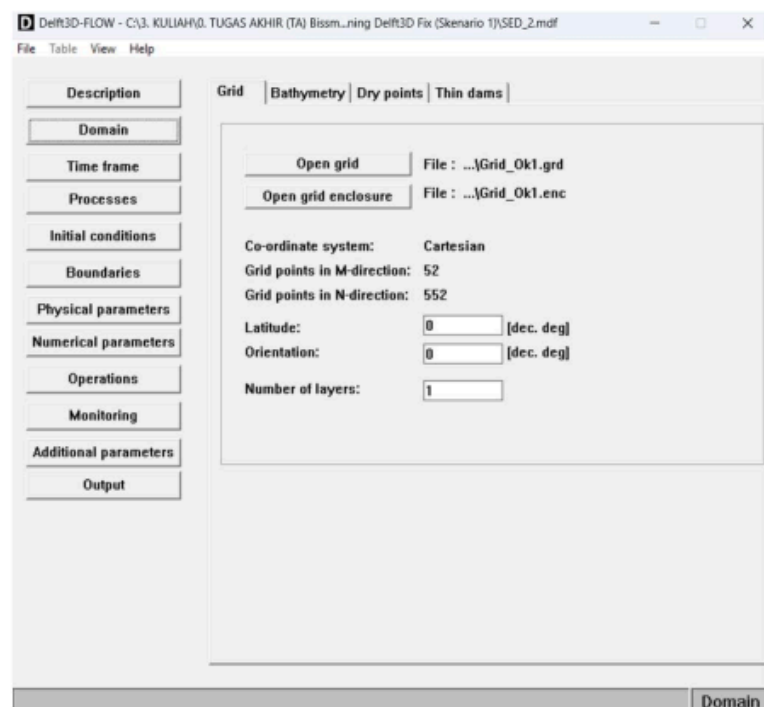
Menentukan file grid yang digunakan sebagai dasar pembagian area komputasi. Grid terdiri atas koordinat horizontal yang membagi domain menjadi sejumlah sel perhitungan. Semakin rapat grid, maka hasil simulasi menjadi lebih detail, tetapi waktu komputasi juga semakin besar.

B. *Bathymetry/Depth*

Berisi data kedalaman dasar perairan pada setiap grid. Data bathimetri sangat penting karena mempengaruhi distribusi kecepatan aliran, arah arus, serta pola sedimentasi dan erosi.

C. *Boundary Location*

Menentukan posisi batas model, baik batas terbuka (*open boundary*) maupun batas tertutup. Pada simulasi sungai, batas hulu biasanya diberi input debit, sedangkan batas hilir dapat diberi elevasi pasang surut.

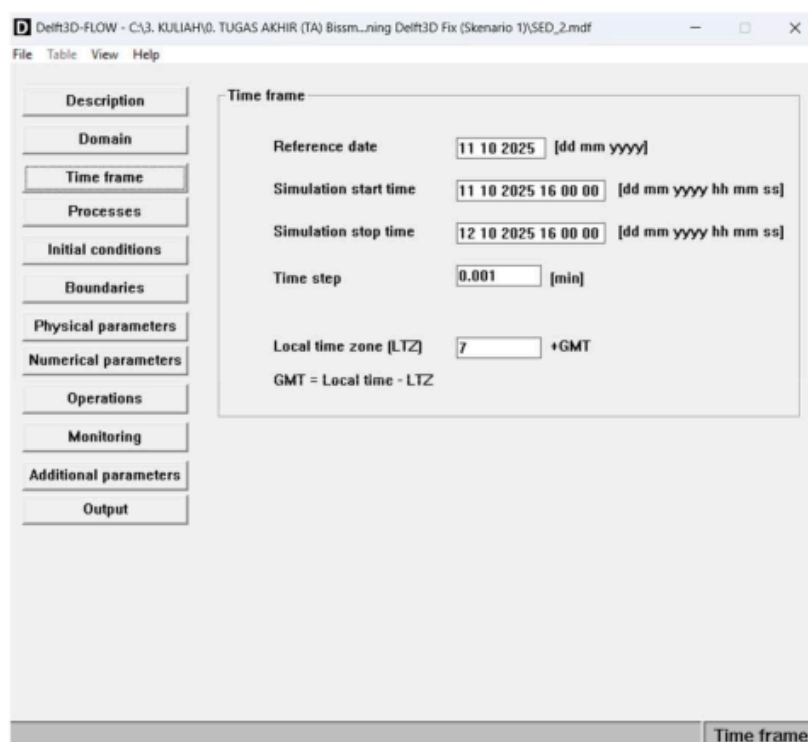


Gambar 3.17 Menu *Domain*
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

2. *Time Frame*

Pada menu Time Frame di modul Flow Input Delft3D, pengaturan waktu simulasi digunakan untuk menentukan kapan simulasi dimulai dan kapan simulasi berakhir.

Pada penelitian ini simulasi dimulai pada tanggal 11/10/2025 (16:00) s/d 12/10/2025 (16:00). Artinya simulasi dilakukan 24 jam. Dalam rentang waktu tersebut, Delft3D akan melakukan perhitungan perubahan elevasi muka air, kecepatan aliran, debit, arus, maupun transport sedimen pada setiap time step yang telah ditentukan.



Gambar 3.18 Menu *Time Frame*
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

3. *Processes*

Pada menu *Process* di *Flow Input* Delft3D, pengguna menentukan proses fisik apa saja yang akan dihitung selama simulasi berlangsung. Menu ini sangat penting karena menjadi inti dari mekanisme perhitungan model hidrodinamika maupun morfodinamika.

Pada bagian *proseses*, Delft3D menyediakan beberapa pilihan proses yang dapat diaktifkan maupun dinonaktifkan

sesuai kebutuhan penelitian. Setiap proses memiliki fungsi tersendiri terhadap hasil simulasi.

Beberapa process yang umum digunakan antara lain:

A. *Hydrodynamic*

Digunakan untuk menghitung dinamika aliran air seperti elevasi muka air, arah arus, kecepatan aliran, dan distribusi debit. Process ini merupakan proses utama yang hampir selalu diaktifkan dalam simulasi sungai maupun estuari.

B. *Transport*

Berfungsi menghitung perpindahan material atau zat di dalam aliran, misalnya sedimen tersuspensi, salinitas, temperatur, maupun polutan. Pada simulasi sedimen Sungai Wonokromo, process ini digunakan untuk melihat distribusi dan pergerakan sedimen sepanjang sungai.

C. *Morphology*

Digunakan untuk menghitung perubahan bentuk dasar sungai atau dasar perairan akibat erosi dan sedimentasi. Ketika *morphology* diaktifkan, model akan memperbarui elevasi dasar secara bertahap selama simulasi berlangsung.

D. *Waves*

Menghubungkan simulasi dengan pengaruh gelombang. Process ini biasanya digunakan pada wilayah pantai, muara, atau laut terbuka yang dipengaruhi gelombang signifikan.

E. *Turbulence Model*

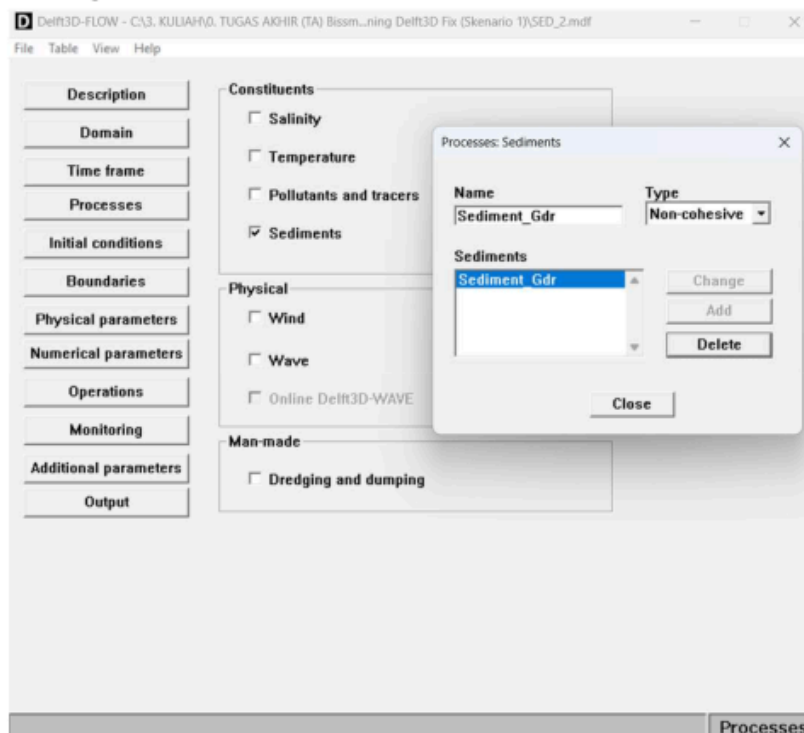
Digunakan untuk memperhitungkan efek turbulensi aliran. Turbulensi mempengaruhi distribusi kecepatan dan transport sedimen di dalam kolom air.

F. *Salinity and Temperature*

Digunakan apabila simulasi melibatkan perbedaan densitas akibat salinitas atau temperatur air.

Dalam penelitian hidrodinamika Sungai Wonokromo, process yang paling umum diaktifkan adalah *hydrodynamics*, *transport sediment*, dan *morphology*. Kombinasi ketiga process tersebut memungkinkan model

mensimulasikan hubungan antara aliran sungai, distribusi sedimen, serta perubahan morfologi dasar sungai pada area tikungan.



Gambar 3.19 Menu *Process*
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

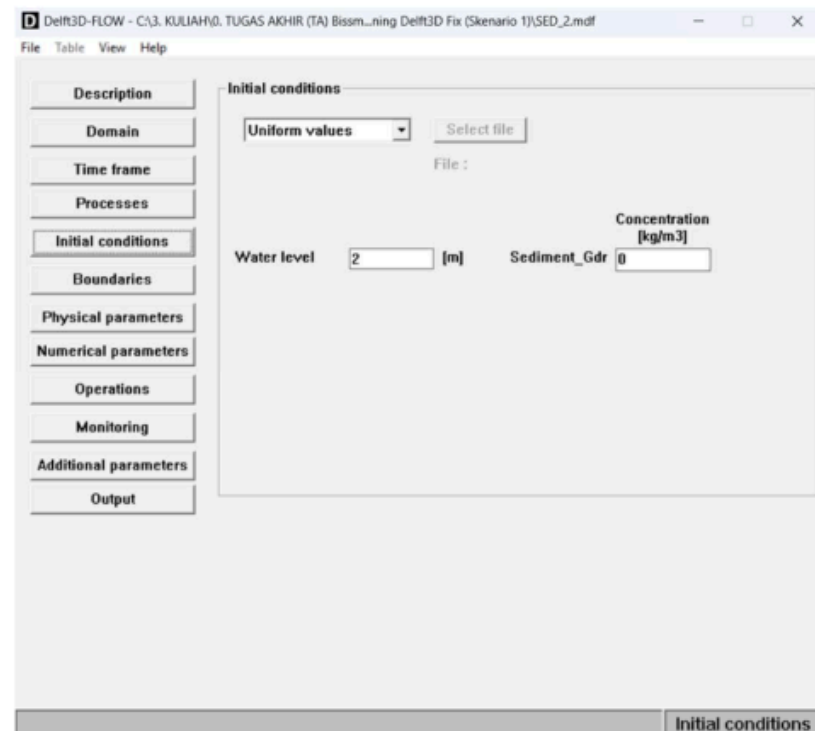
4. *Initial Condition*

Pada menu *Initial Condition* di *Flow Input* Delft3D, pengguna menentukan kondisi awal model sebelum simulasi dijalankan. *Initial condition* berfungsi sebagai nilai permulaan yang akan digunakan Delft3D pada saat waktu simulasi dimulai.

Kondisi awal ini sangat penting karena mempengaruhi kestabilan model dan hasil simulasi pada tahap awal perhitungan. Jika *initial condition* tidak sesuai dengan kondisi lapangan, maka model dapat menghasilkan ketidakstabilan numerik atau membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai kondisi yang realistis.

Dalam simulasi hidrodinamika dan morfodinamika Sungai Wonokromo, *initial condition* biasanya diatur berdasarkan kondisi eksisting lapangan pada awal waktu simulasi, misalnya elevasi muka air awal, debit awal sungai, serta

konsentrasi sedimen awal. Pengaturan ini bertujuan agar model dapat langsung mendekati kondisi nyata sehingga hasil simulasi lebih akurat.



Gambar 3.20 Menu *Initial Condition*
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

5. *Boundaries*

Pada menu *Boundaries* di *Flow Input Delft3D*, pengguna menentukan kondisi batas yang menjadi masukan utama bagi model hidrodinamika. *Boundary* atau batas model merupakan lokasi tempat air masuk maupun keluar dari domain simulasi. Kondisi batas ini sangat penting karena mengontrol perilaku aliran di dalam domain selama simulasi berlangsung.

Dalam pemodelan sungai, estuari, maupun wilayah pesisir, *boundaries* digunakan untuk merepresentasikan kondisi nyata di lapangan, seperti debit sungai dari arah hulu atau pasang surut dari arah laut. Tanpa *boundary condition*, Delft3D tidak dapat menghitung pergerakan aliran secara realistis.

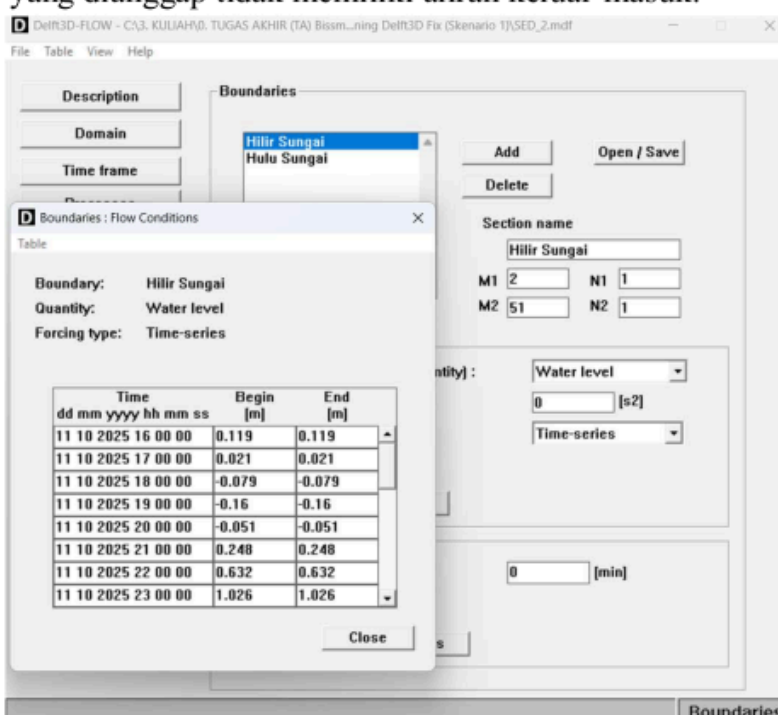
Secara umum, *boundaries* dibagi menjadi dua jenis utama, yaitu:

A. *Open Boundary*

Merupakan batas terbuka yang memungkinkan air masuk atau keluar dari domain simulasi. Pada batas ini biasanya diberikan data debit, elevasi muka air, kecepatan arus, maupun data pasang surut.

B. *Close Boundary*

Merupakan batas tertutup yang tidak memperbolehkan aliran melewati batas tersebut. *Closed boundary* biasanya digunakan pada tepi daratan atau sisi sungai yang dianggap tidak memiliki aliran keluar-masuk.



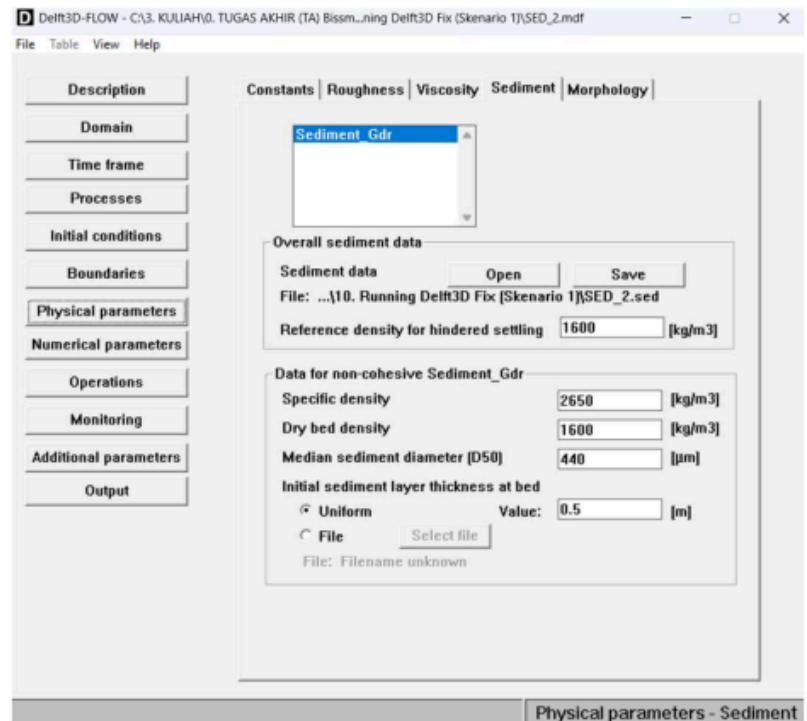
Gambar 3.21 Menu *Boundaries*
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

6. *Physical Parameters*

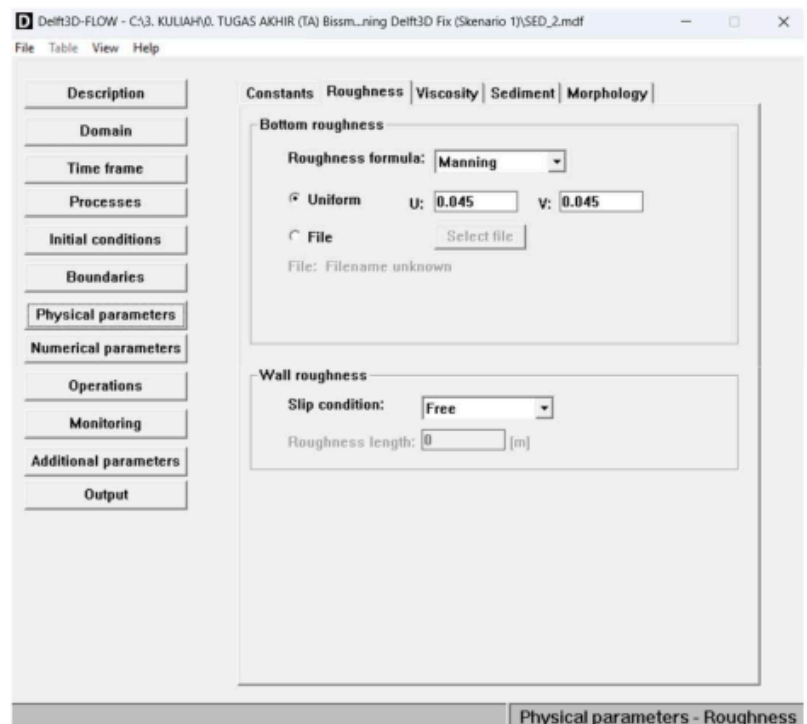
Pada menu *Physical Parameters* di *Flow Input Delft3D*, pengguna mengatur parameter fisik yang mempengaruhi perilaku aliran dan proses hidrodinamika selama simulasi berlangsung. Parameter ini digunakan untuk merepresentasikan kondisi fisik nyata di lapangan agar hasil simulasi mendekati kondisi sebenarnya.

Physical parameters sangat penting karena menentukan bagaimana air bergerak, kehilangan energi, mengalami turbulensi, serta berinteraksi dengan dasar sungai maupun

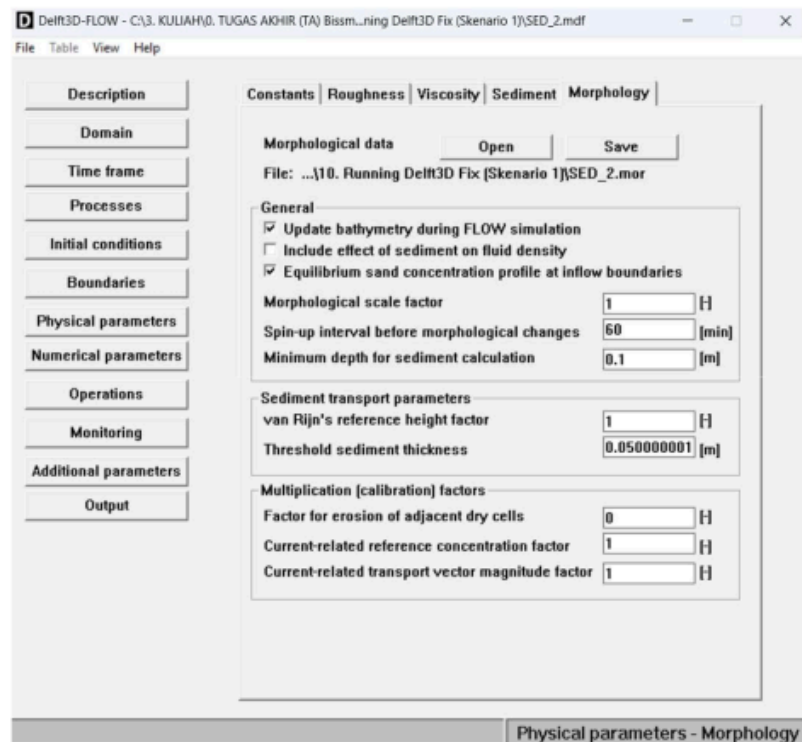
lingkungan sekitarnya. Kesalahan dalam menentukan parameter fisik dapat menyebabkan hasil simulasi menjadi tidak akurat.



a.



b.



c.

Gambar 3.22 Input *Sediment* (a.), Input *Roughness* (b.),
Morphology (c.)

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

7. *Monitoring*

Pada menu *Monitoring* di *Flow Input Delft3D*, pengguna menentukan titik atau lokasi pengamatan dalam domain simulasi yang digunakan untuk memantau hasil perhitungan model selama simulasi berlangsung. *Monitoring* berfungsi untuk merekam parameter tertentu pada lokasi spesifik sehingga hasil simulasi dapat dianalisis lebih detail tanpa harus melihat seluruh domain secara keseluruhan.

Menu ini sangat penting untuk proses evaluasi, validasi, dan analisis hasil model, karena memungkinkan pengguna membandingkan output simulasi dengan data observasi lapangan pada titik-titik tertentu.

8. *Running Model*

Tahapan pelaksanaan model FLOW dilakukan sesuai dengan folder output yang dihasilkan dari setiap konfigurasi input. Sebelum menjalankan output dari grid utama, dilakukan proses NESTHD1, yang menghasilkan file output

berupa *observation* (.obs) dan *administration* (.adm). Setelah proses NESTHD1 selesai, dilanjutkan dengan proses NESTHD2, yang menghasilkan *file forcing type* (.bct) dan *transport condition* (.bcc). Output dari NESTHD2 memberikan pola sebaran arus sesuai dengan *time series* yang ditentukan, serta memungkinkan visualisasi kumulatif dari aktivitas sedimentasi dan erosi di titik-titik observasi penelitian.

8. Analisis data

Proses analisis data dilakukan dengan mengamati dan mengevaluasi hasil pengolahan data yang telah diperoleh. Tahapan analisis yang diterapkan meliputi:

a. Validasi model metode RMSE dan NSE.

Data yang dihasilkan dari simulasi perlu dilakukan validasi data dengan tujuan agar data yang diperoleh dari simulasi mampu mendekati data yang diperoleh dari observasi lapangan. Langkah ini sangat penting sebagai tahap awal karena data yang mendekati kondisi lapangan adalah data yang bagus karena dapat merepresentasikan keadaan sesungguhnya di lapangan.

b. Analisis pola sebaran arus dan kecepatan aliran.

Dilakukan untuk mengevaluasi distribusi dan karakteristik aliran di wilayah penelitian.

c. Analisis pola sebaran angkutan sedimen.

Bertujuan untuk menilai distribusi sedimen, baik *bed load* maupun *suspended load*, di sepanjang area penelitian.

d. Analisis perubahan morfologi sungai (*Bed Level Changes*)

Dilakukan untuk mengidentifikasi dampak sedimentasi terhadap perubahan dasar sungai, termasuk erosi dan deposisi, sesuai titik-titik pengamatan pada kondisi eksisting.

9. Penyusunan Laporan

Tahap penyusunan laporan merupakan langkah akhir setelah seluruh proses pengolahan data dan analisis selesai dilakukan. Hasil dari kedua tahapan tersebut disajikan dan dijelaskan dalam laporan, yang selanjutnya digunakan untuk merumuskan kesimpulan penelitian serta memberikan rekomendasi terkait permasalahan yang dikaji.

3.5. Bahan dan Peralatan Penelitian

Penelitian yang dilakukan membutuhkan peralatan - peralatan yang nantinya dapat membantu dalam memaksimalkan dan mengoptimalkan proses pengerjaan dalam pengolahan data, proses visualisasi numerik dan juga penyusunan laporan tugas akhir. Berikut ini merupakan data Data dan peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1 Alat Penelitian

No.	Alat	Fungsi
1.	Laptop • Processor: Intel Core i5-13450HX (16 CPUs) ~ 2,4 GHz • NVIDIA GeForce RTX 3050 • 16384 MB RAM • Windows 11 Home • Single Language 64 bit	Berfungsi untuk mengolah data, menjalankan perangkat lunak dan Menyusun laporan.
2.	Alat Tulis	Berfungsi untuk mencatat data.
3.	QGIS (<i>Quantum-Geographic Information System</i>)	Berfungsi untuk mengubah format batimetri yang semula file tiff. Menjadi file xyz. Dan digunakan untuk membuat peta-peta titik pengambilan data.
4.	Microsoft Excel	Berfungsi untuk mengolah data
5.	HEC-RAS	Berfungsi sebagai pemodelan untuk pasang surut, kecepatan aliran, dan debit eksisting dan sebagai bahan validasi.
6.	Delft3D	Berfungsi untuk memodelkan perubahan morfologi sungai, mengolah data sedimentasi dan data arus.
7.	Notepad++	Berfungsi untuk mencatat data dari QGIS ke Delft3D.
8.	MatLab	Memvisualisasi hasil dari Delft3D.
9.	Microsoft Office Word	Penyusunan Laporan.

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

3.6. ¹Sumber Data

Berdasarkan aspek hidromorfologi dalam memvisualkan dan memodelkan perubahan morfologi pada tikungan Sungai Wonokromo terutama untuk analisis erosi-deposisi maka data-data yang diperlukan akan diolah pada software demi kelancaran penelitian ini seperti yang tersaji dalam Tabel 3.2 sebagai berikut:

Tabel 3.2 Data-data yang dibutuhkan

Data	Spesifikasi Data (Tahun)	Sumber	Software	Rumusan Masalah
Topografi (Batimetri)	2025	Penelitian Sebelumnya (Nauval, 2025)	Excel, Notepad++, , HEC-RAS, Delft3D	1,2 dan 3
Kecepatan Aliran 2 Titik	2025	Observasi Lapangan	Excel, Notepad++, , HEC-RAS, Delft3D	1,2 dan 3
Data pasang surut	2025	Penelitian Sebelumnya (Thoriq, 2025)	Excel, Notepad++, , HEC-RAS, Delft3D	1,2, dan 3
Debit Eksisting	2025	Penelitian Sebelumnya (Thoriq, 2025)	Excel, Notepad++, , HEC-RAS, Delft3D	
Debit Rencana	2025	Perum Jasa Tirta 1	Excel, Notepad++, , HEC-RAS, Delft3D	1,2, dan 3
Sample sedimen dasar (<i>bed load</i>)	2025	Observasi Lapangan	Excel, Notepad++, , HEC-RAS, Delft3D	2 dan 3
Sample sedimen layang (<i>suspended load</i>)	2025	Observasi Lapangan	Excel, Notepad++, , HEC-RAS, Delft3D	2 dan 3

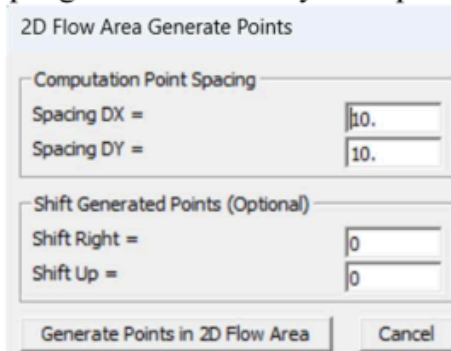
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

3.7. Desain Pemodelan Awal

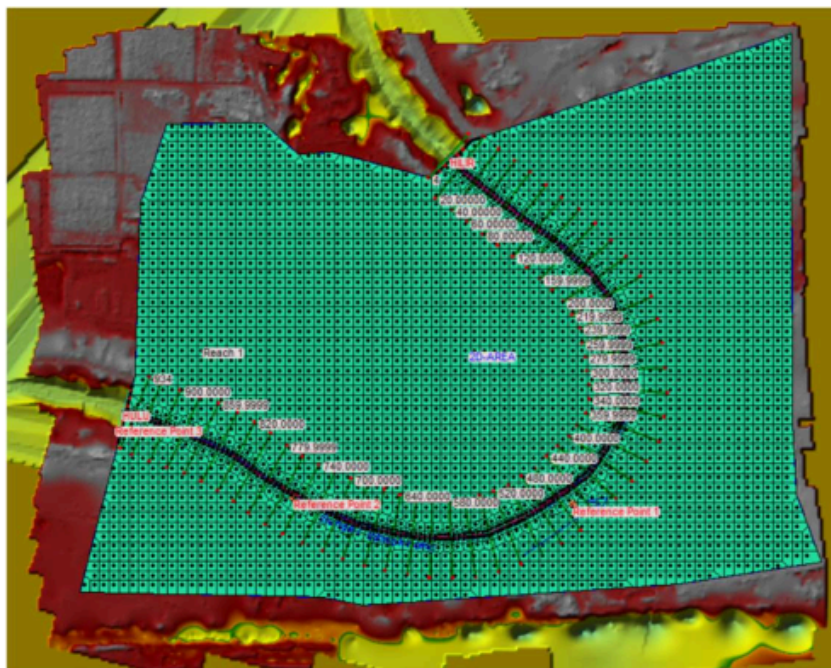
3.7.1. Desain Pemodelan HEC-RAS

3.7.1.1. Pembangunan *Mesh/Grid* Pemodelan

Grid yang digunakan pada pemodelan ini adalah menggunakan 2D Flow Area dengan ukuran $Dx = 10$ dan $Dy = 10$, Tahapan pembuatan 2D Flow Area ini yang pertama adalah menginput data *terrain* yang sudah ada, kemudian menginputkan 2D Flow Area dengan pengaturan Dx dan Dy 10 seperti Gambar 3.23,



Gambar 3. 23 Ukuran *Mesh/Grid* pada Pemodelan HEC-RAS
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

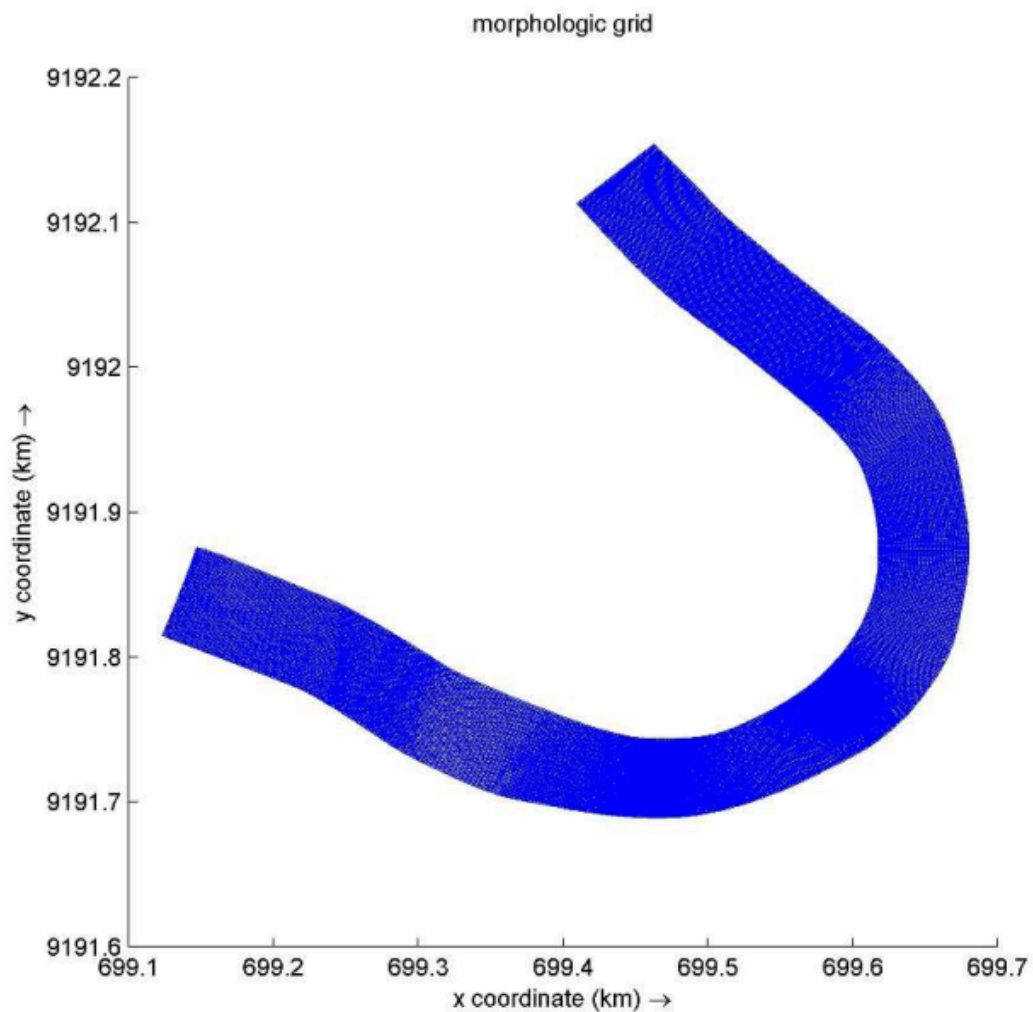


Gambar 3. 24 *Mesh/Grid* Awal Pemodelan HEC-RAS
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

3.7.2. Desain Pemodelan Delft3D

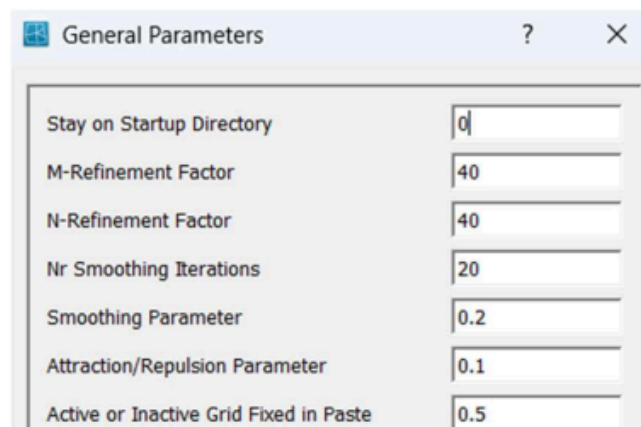
3.7.2.1. Pembangunan Mesh/Grid Pemodelan

Grid pemodelan yang digunakan pada penelitian ini berupa *Rectangular grid* yang mengacu pada sistem koordinat kartesian. Proses pembuatan grid dilakukan dengan menyesuaikan bentuk grid terhadap *landboundary* (.ldb) pada area penelitian. *Landboundary* berfungsi sebagai garis batas antara wilayah daratan dan perairan yang digunakan dalam perangkat lunak Delft3D, sehingga grid yang terbentuk dapat mengikuti kondisi geometri lokasi studi secara lebih representatif.



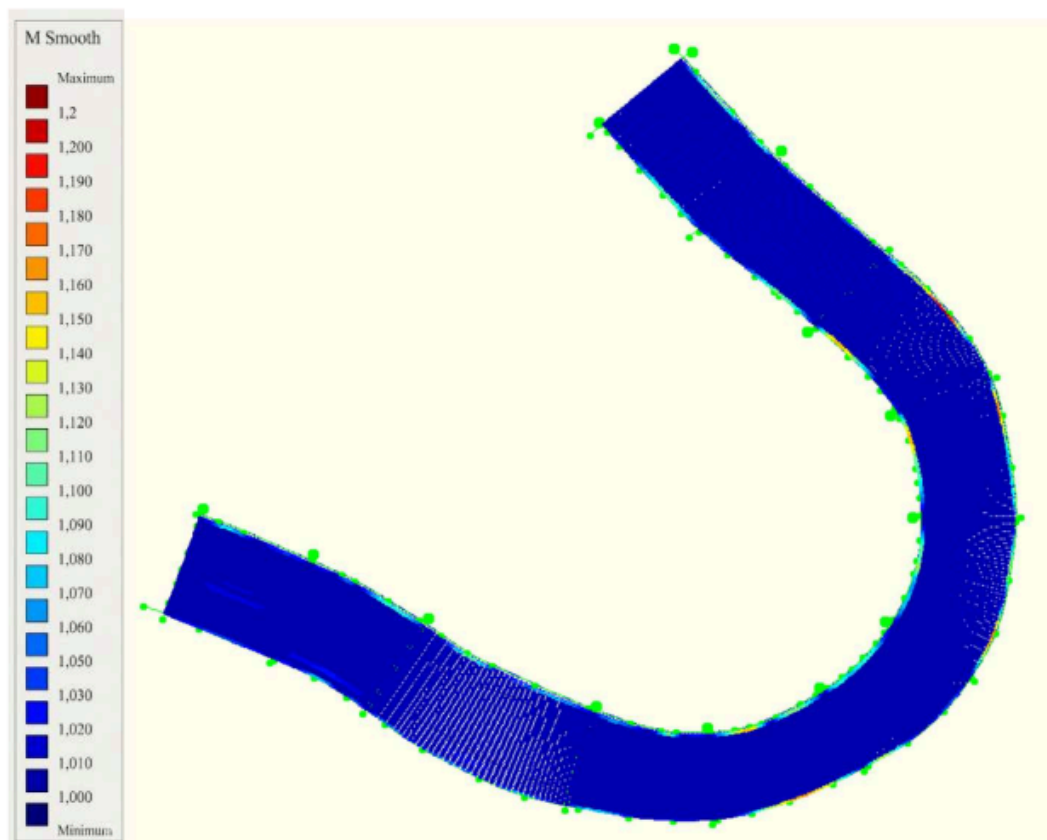
Gambar 3. 25 Mesh/Grid Pemodelan Delft3D
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Ukuran grid pada pemodelan Delft3D ini adalah 40 x 40 sesuai dengan Gambar 3.26, Pada *M-Refinement Factor* dan *N-Refinement Factor*.

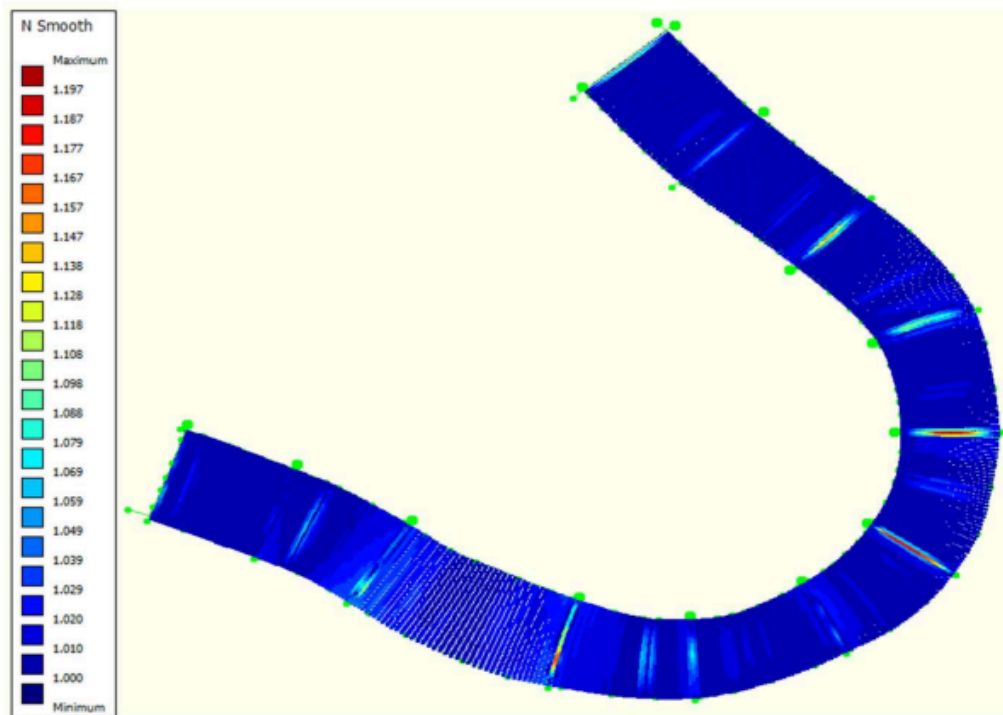


Gambar 3. 26 Ukuran *Mesh/Grid* pada Pemodelan Delft3D
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

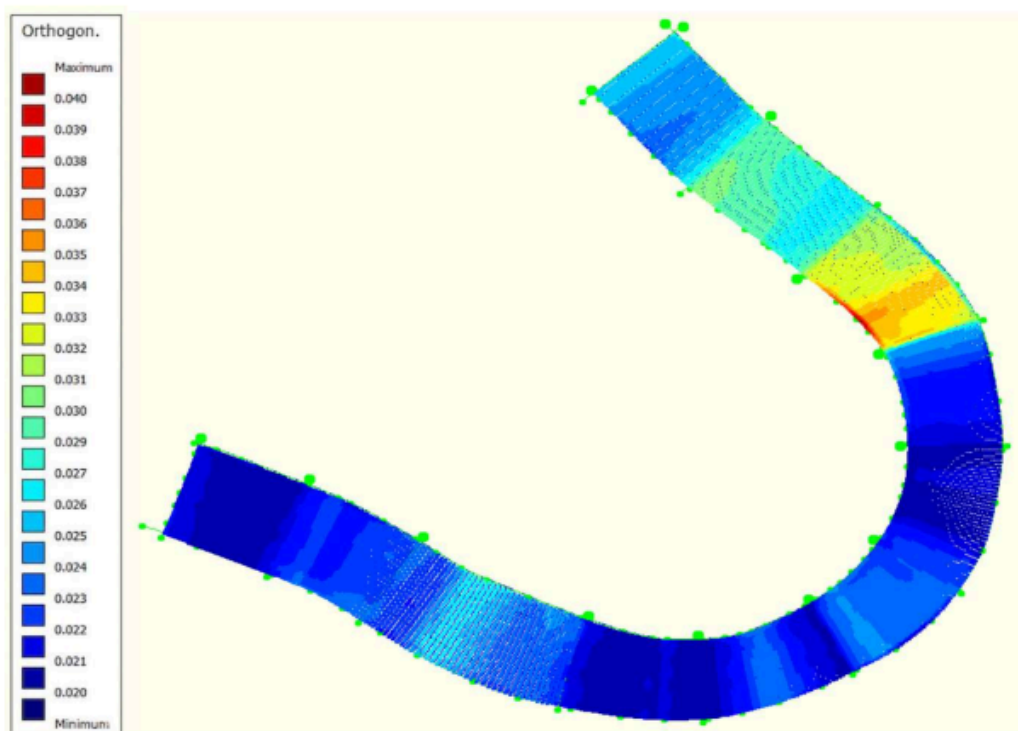
Adapun peraturan/syarat syarat yang harus dipenuhi agar grid yang dibangun bisa memodelkan kondisi eksisting dengan maksimal, diantaranya adalah pada *toolbar view* bagian *grid property*, *orthogonality* yang dibangun harus diantara 0,02 – 0,04 dan pada menu *M-Smoothness* dan *N-Smoothness* angka maksimal adalah 1,2,(RGFGRID, 2025).



a.



b.

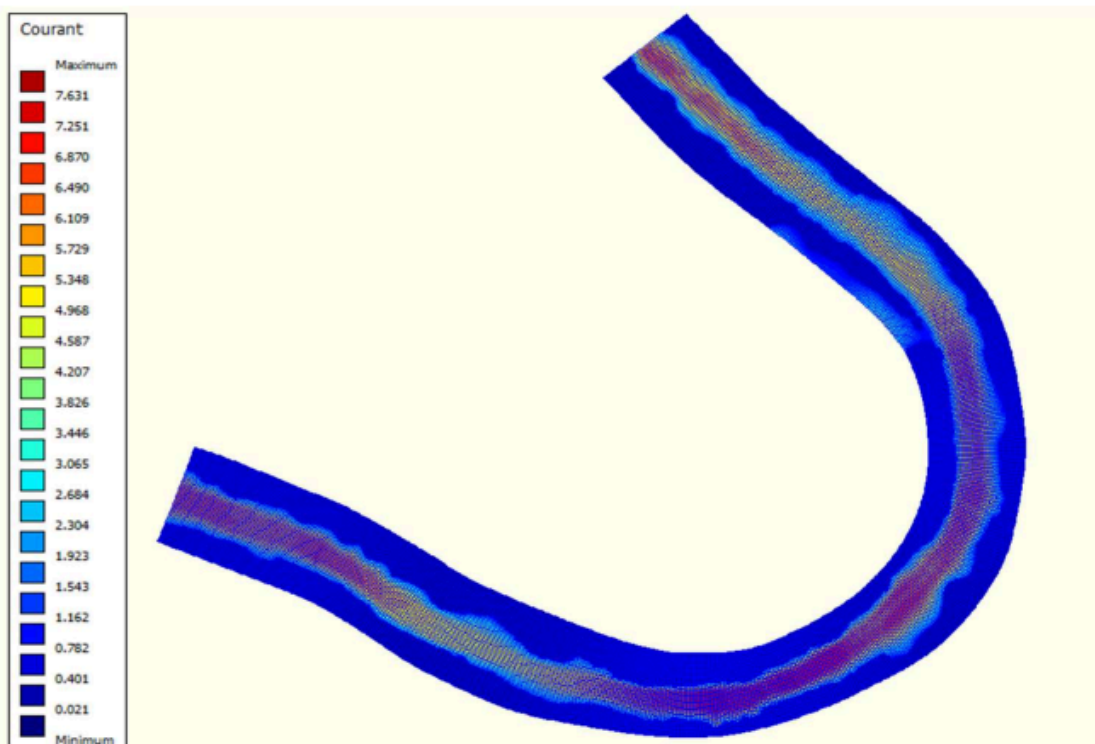


c.

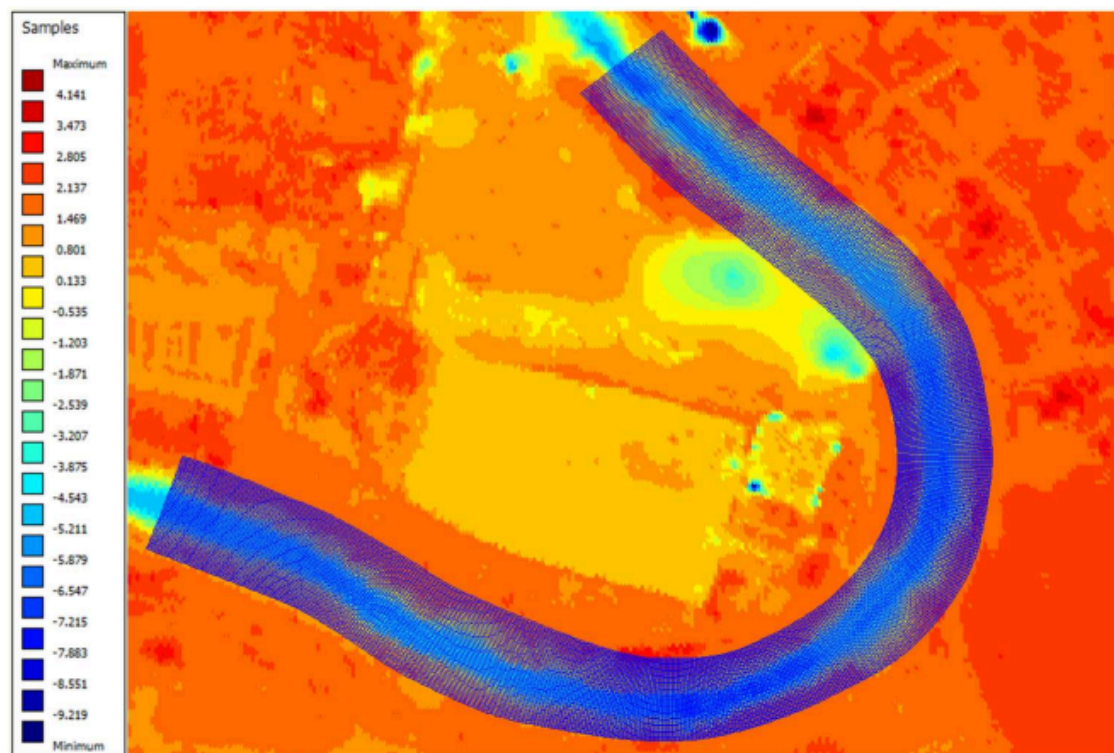
Gambar 3.27 (a.) *M-Smoothness*, (b.) *N-Smoothness*, (c.) *Orthogonality*
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

3.7.2.2. ¹ Domain Kedalaman

Skenario wilayah pemodelan awal yang merupakan proses interpolasi data kedalaman atau batimetri pada QUICKIN dilakukan dengan menginput data yang sudah diperoleh dari penelitian (Maulana N.S. & Patriadi, 2025). Namun, data yang diperoleh merupakan data yang berbentuk file tif. Delft3D sendiri hanya bisa menginput data file xyz., sehingga dilakukan pengubahan format data melalui aplikasi QGIS untuk memperoleh data yang berformat xyz. Pada penginputan data batimetri atau topografi di QUICKIN pada Delft3D untuk tanda positif (+) digunakan untuk wilayah lautan dan untuk tanda *negative* (-) digunakan untuk wilayah daratan. Output yang dihasilkan dari proses interpolasi data kedalaman ini adalah DEPTH (.dep). dengan pengaturan yaitu *courant number* harus dibawah 10 sesuai dengan Delft3D *user Manual* (QUICKIN, 2025).



Gambar 3.28 *Courant Number*
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 3.29 Desain Model Kedalaman Awal
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

3.7.2.3. ¹ Parameter Model

Parameter pemodelan yang digunakan dalam penelitian ini menggabungkan perhitungan antara parameter hidrodinamika dengan morfologi seperti yang disajikan pada Tabel 3.3 untuk skenario 1 dan Tabel 3.4, untuk skenario 2 di bawah ini.

Tabel 3.3 Parameter Model Skenario 1 debit eksisting

Komponen	⁴ Jenis Data		
Domain	Grid (grd.) dan (enc.)		
	Batimetri (xyz.)		
Time Frame	Waktu		Pukul
	Mulai Simulasi	11 okt 2025	16:00
	Selesai Simulasi	12 okt 2025	16:00
	Time Step		
Processes	Constituents:		
	Sedimen Non-Kohesif (0,44 mm) sand		

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 3.3 Parameter Model Skenario 1 debit eksisting
(Lanjutan)

Komponen	Jenis Data		Komponen
<i>Boundary Condition</i>	<i>Open Boundary Hulu (Flow Hydrograph)</i>		<i>Time Series</i>
	<i>Open Boundary Hilir (Stage Hydrograph)</i>		<i>Time Series</i>
<i>Physical Parameter</i>	Konstanta :		
	Gravitasi		
	Densitas Air		
	Koefisien Kekerasan :		
	Manning		
	Sedimen Non-Kohesif		
	Berat Jenis		
	Berat Kering		
	D50 Sedimen		
	Morfologi :		
	Faktor Skala Morfologi		
	Interval Putaran sebelum Perubahan Morfologi		

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 3.4 Parameter Model Skenario 2 debit rencana

Komponen	Jenis Data		
<i>Domain</i>	Grid (grd.) dan (enc.)		
	Batimetri (xyz.)		
<i>Time Frame</i>	Waktu		Pukul
	Mulai Simulasi	11 okt 2025	16:00
	Selesai Simulasi	12 okt 2025	16:00
	<i>Time Step</i>		
<i>Processes</i>	Constituents:		
	Sedimen Non-Kohesif (0,44 mm) sand		
<i>Boundary Condition</i>	Debit dari Perum Jasa Tirta 1		(Debit Konstan)

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 3.4 Parameter Model Skenario 2 debit rencana
(Lanjutan)

Komponen	Jenis Data	
	<i>Open Boundary Hilir (Stage Hydrograph)</i>	<i>Time Series</i>
<i>Physical Parameter</i>	Konstanta :	
	Gravitasi	
	Densitas Air	
	Koefisien Kekerasan :	
	Manning	
	Sedimen Non-Kohesif	
	Berat Jenis Sedimen	
	Berat Kering Sedimen	
	D50 Sedimen	
	Morfologi :	
	Faktor Skala Morfologi	
	Interval Putaran sebelum Perubahan Morfologi	

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

¹ Keluaran atau *output* yang dihasilkan dari gabungan parameter pemodelan seperti yang telah disajikan pada Tabel 3.3 dan Tabel 3.4 yakni berupa hasil visualisasi kecepatan arus, arah arus dan morfologi dasar perairan (*Cumm. Erotion / Sedimentation*) yang sesuai dengan aliran pada komputasional grid pemodelan.

⁴
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

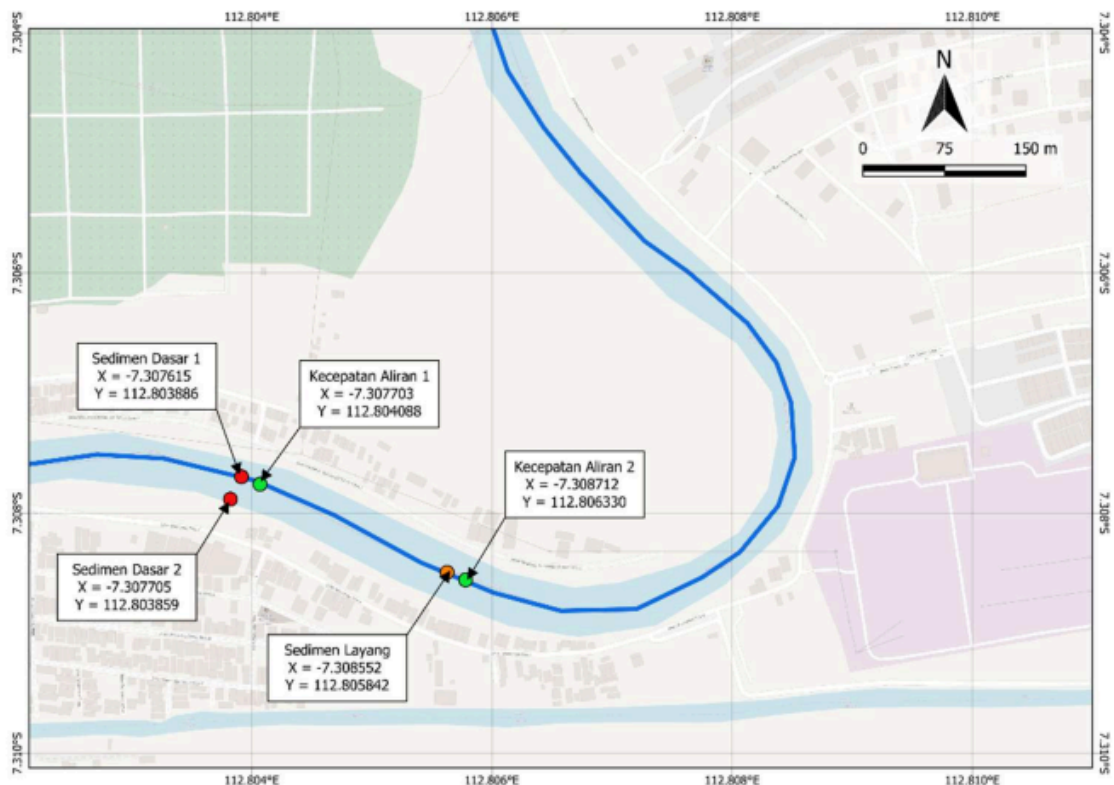
4.1. Analisis Kondisi Hidrodinamika Eksisting

4.1.1. Pengambilan Data Lapangan

Pengambilan data lapangan dilakukan secara langsung di Lokasi studi pada tanggal 12 Oktober 2025, Untuk titik-titik pengambilan sudah dijelaskan pada BAB III.

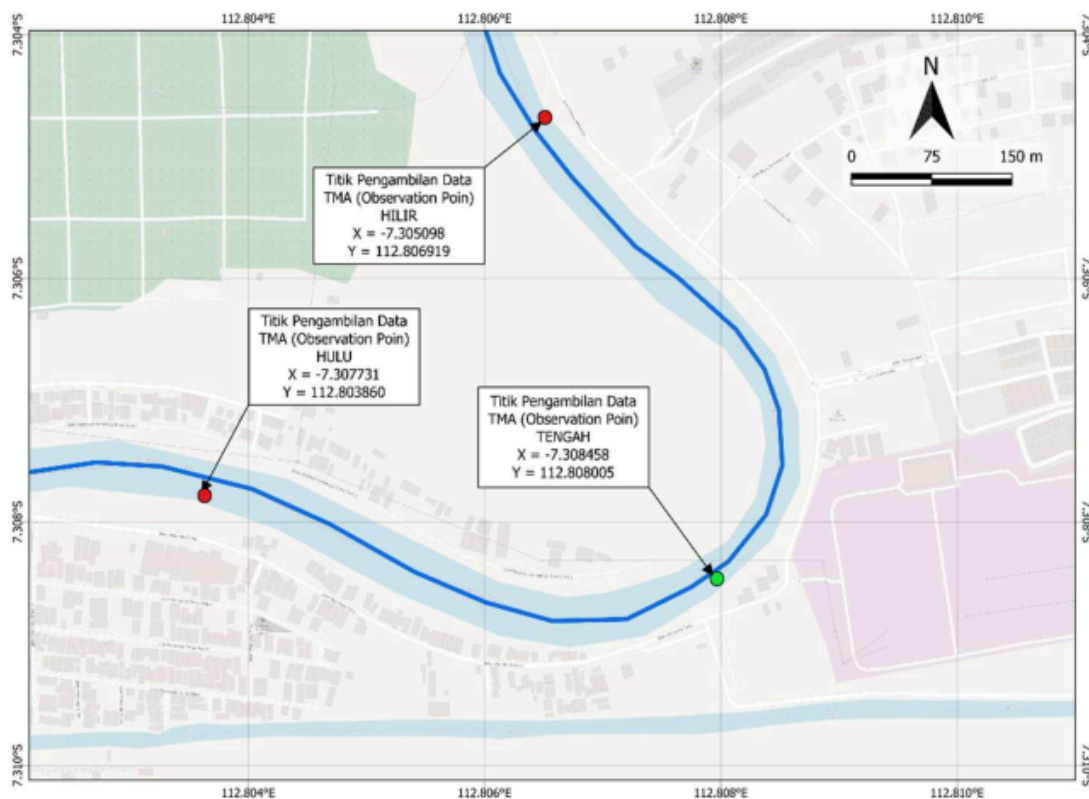


Gambar 4.1 Pengambilan Data Lapangan
(Sumber : Dokumentasi Peneliti, 2025)



Gambar 4.2 Titik Pengambilan Data Lapangan
(Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026)

Gambar 4.2, menunjukkan lokasi titik pengamatan pada area tikungan Sungai Wonokromo yang digunakan untuk menganalisis hubungan antara karakteristik hidrodinamika aliran dan distribusi sedimen. Area penelitian berada pada segmen tikungan sungai, karena pada bagian ini umumnya terjadi perubahan pola aliran yang dapat memengaruhi proses erosi, sedimentasi, dan *transport* sedimen.

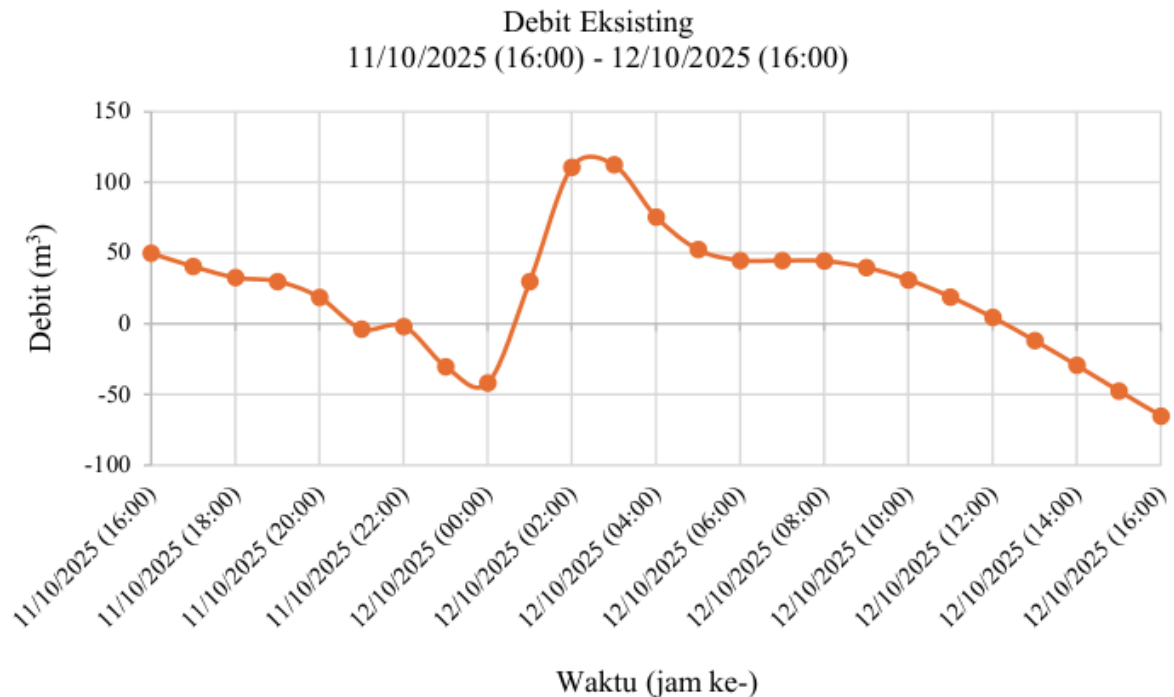


Gambar 4.3 Titik Pengambilan Data Tinggi Muka Air (*Observation Point*)
(Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026)

Gambar 4.3, menunjukkan lokasi titik pengambilan data Tinggi Muka Air (TMA) atau *observation point* pada segmen tikungan Sungai Wonokromo yang digunakan dalam proses pengumpulan data hidrodinamika. Titik pengamatan ditempatkan pada tiga lokasi yang mewakili kondisi aliran sepanjang area penelitian, yaitu titik hulu, titik tengah, dan titik hilir. dalam penelitian ini proses validasi model hanya dilakukan menggunakan titik pengamatan tengah. Pemilihan titik tengah didasarkan pada posisinya yang berada tepat pada area tikungan utama, sehingga dinilai paling representatif dalam menggambarkan respons hidrodinamika terhadap perubahan arah aliran. Pada bagian tikungan, interaksi antara gaya sentrifugal, distribusi kecepatan aliran, serta perubahan elevasi muka air umumnya lebih dominan dibandingkan pada bagian hulu dan hilir.

4.1.2. Debit Aliran Eksisting

Data debit aliran diperoleh dari penelitian sebelumnya.



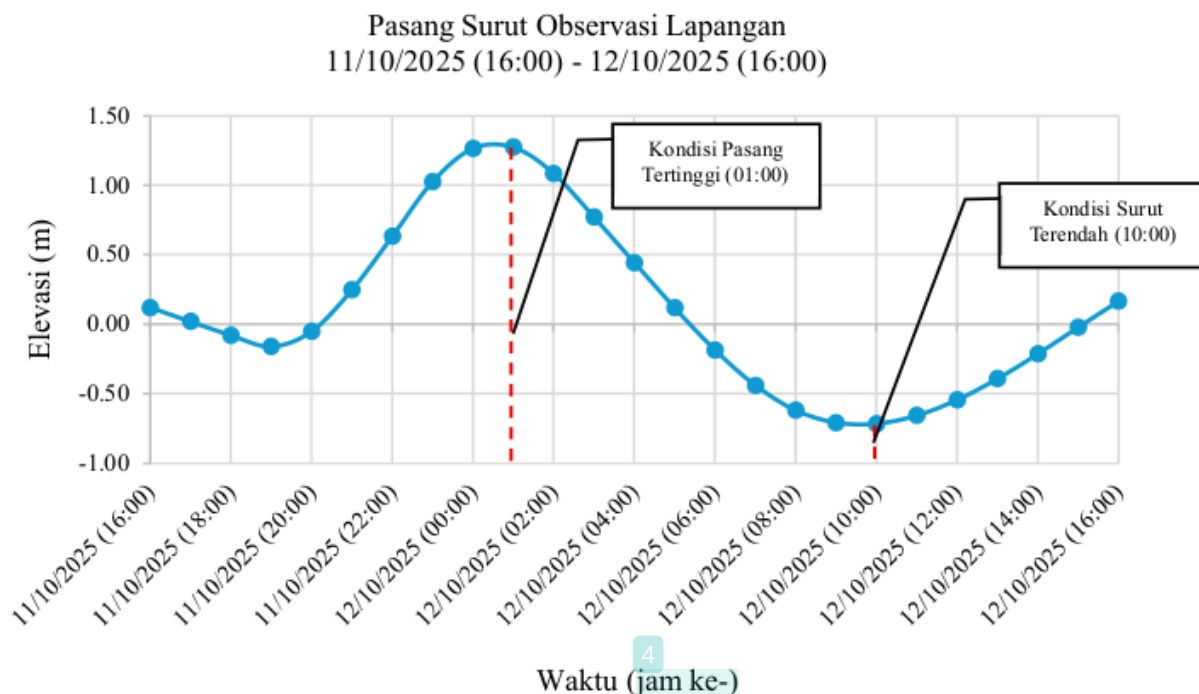
Gambar 4.4 Data Debit Eksisting
Sumber : (Pamungkas & Patriadi, 2025).

Dari Gambar 4.4. tersebut, dapat diidentifikasi karakteristik ekstrem aliran sebagai berikut:

1. Debit Maksimum (Q_{peak}): Tercatat sebesar $114,744 \text{ m}^3/\text{s}$ yang terjadi pada pukul 02:55 WIB (dini hari). Lonjakan debit yang signifikan ini terlihat pada grafik sekitar jam ke-10 hingga 11 dari waktu awal pengamatan.
2. Debit Negatif (Arus Balik): Teridentifikasi adanya aliran balik (*backwater*) yang ditunjukkan dengan nilai debit negatif. Nilai terendah (arus balik terbesar) tercatat sebesar $-43,94 \text{ m}^3/\text{s}$ pada pukul 23:55 WIB. Fenomena debit negatif ini juga terlihat kembali pada akhir periode pengamatan (sekitar pukul 14:40 keesokan harinya) dengan nilai $-41,40 \text{ m}^3/\text{s}$. Hal ini mengindikasikan adanya pengaruh pasang air laut yang kuat yang mendominasi aliran sungai pada jam-jam tersebut, sehingga air bergerak dari hilir ke hulu.

4.1.3. Pasang Surut

4.1.3.1. Pasang Surut Observasi Lapangan



Gambar 4.5 Pasang Surut Observasi Lapangan
(Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026)

Gambar 4.5. memperlihatkan tipe pasang surut harian ganda (*semi-diurnal*), yaitu dalam satu hari terjadi satu kali pasang maksimum dan satu kali surut minimum yang cukup jelas. Titik pengambilan data pasang surut dilakukan pada titik tengah sesuai dengan Gambar 4.3, Berdasarkan Gambar 4.5, dapat disimpulkan bahwa:

1. Kondisi Pasang Tertinggi (*High Water Level*): Terjadi pada rentang jam ke-8 hingga jam ke-9 yaitu pukul 00:00 hingga 01:00 dini hari dengan elevasi puncak mencapai +1,274 m pada jam ke-9 (01:00).
2. Kondisi Surut Terendah (*Low Water Level*): Terjadi pada siang hari pukul 08:00 hingga 11:00 di rentang jam ke-16 hingga jam ke-19 dengan titik terendah mencapai -0,714 m pada jam ke-18 (10:00).
3. Tunggang Pasang Surut (*Tidal Range*): Jarak total dari titik pasang tertinggi ke surut terendah adalah sekitar 1,989 m.
4. Pola muka air menunjukkan tipe pasang surut harian ganda (*semi-diurnal*), yang ditandai dengan terjadinya dua kali pasang dan dua kali

surut dalam satu hari pengamatan dengan tinggi pasang dan rendah surut yang relatif berbeda.

4.1.3.2. Pasang Surut Simulasi HEC-RAS

Kondisi sebaran tinggi muka air (*Water Surface Elevation*) di belokan Sungai Wonokromo pada saat mencapai kondisi pasang tertinggi disajikan pada Gambar 4.6, Visualisasi ini diperoleh dari hasil ekspor pemodelan hidrolika dua dimensi HEC-RAS.



Gambar 4.6 Hasil Simulasi HEC-RAS Pada Saat Pasang Tertinggi
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Gambar 4.6, menunjukkan bahwa pada saat tanggal 12/10/2025 pukul 01.00 WIB. Terjadi pasang tertinggi. Area berwarna biru menunjukkan wilayah yang mengalami penggenangan akibat luapan aliran sungai. Berdasarkan hasil visualisasi, genangan terlihat menyebar mengikuti morfologi sungai dan topografi wilayah sekitar. Sebaran genangan cenderung meluas pada area yang memiliki elevasi relatif lebih rendah sehingga air lebih mudah melimpas dan mengisi daerah tersebut.

Hasil pemodelan HEC-RAS pada kondisi pasang tertinggi mampu merepresentasikan kondisi hidrodinamika lapangan dengan baik, dimana elevasi muka air yang tinggi menyebabkan meluapnya kondisi hidrodinamika

di daerah *inner bank* Kondisi tersebut berpotensi mempengaruhi proses sedimentasi dan perubahan morfologi pada area kolam alami maupun Aliran sungai di sekitarnya.

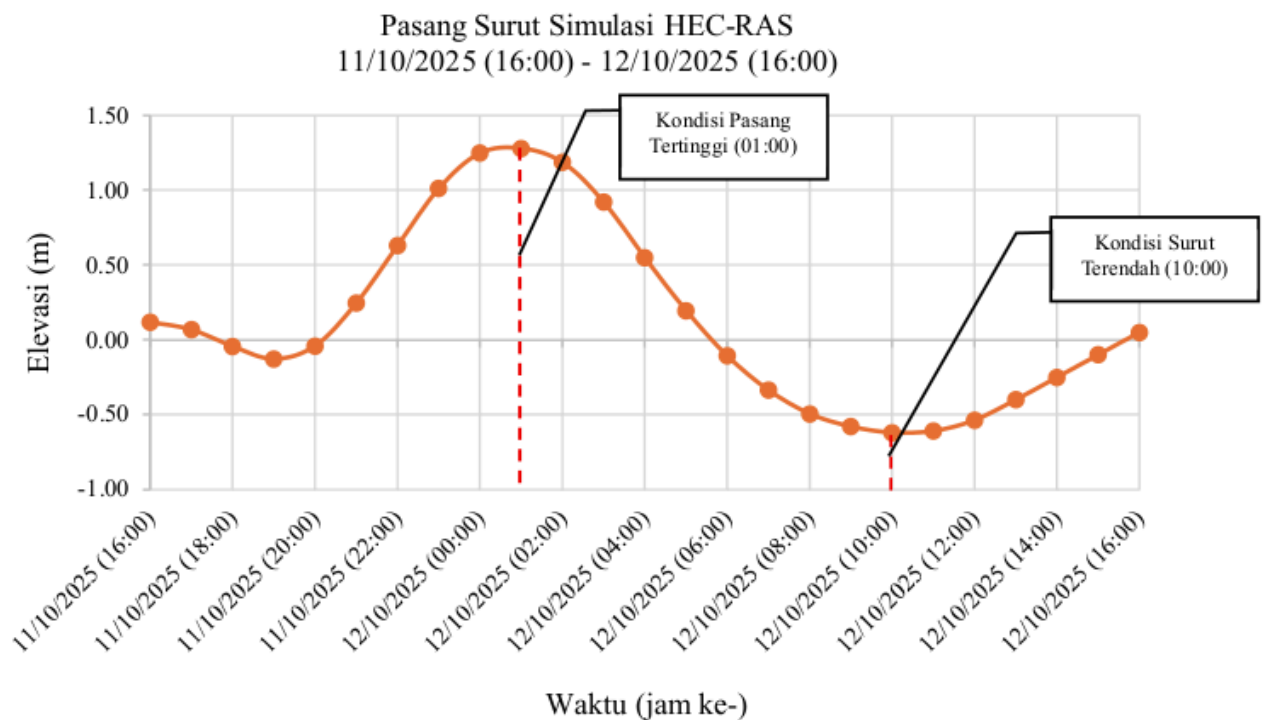


Gambar 4.7 Hasil Simulasi HEC-RAS Pada Saat Surut Terendah
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Gambar 4.7. menunjukkan bahwa pada tanggal 12 oktober 2025 (10.00 WIB) terjadi surut terendah. Angka penurunan *Water Surface Elevation* menunjukkan sekitar -1,50 dari MSL, dibandingkan pada saat kondisi pasang, pada saat kondisi surut terendah ini air yang meluap membentuk kolam alami pada saat air sungai mengalami surut.

Berdasarkan visualisasi spasial pada Gambar 4.6, dan Gambar 4.7, kemudian dapat diambil data grafik pasang surut air yang disesuaikan dengan lokasi titik pengamatan tinggi muka air lapangan (Representasi oleh titik oranye bagian tengah).

Hasil pemodelan HEC-RAS pada kondisi surut terendah mampu merepresentasikan kondisi hidrodinamika lapangan dengan baik, dimana elevasi muka air yang rendah menyebabkan berkurangnya konektivitas antara sungai utama dan area genangan di sekitarnya. Kondisi tersebut berpotensi mempengaruhi proses sedimentasi dan perubahan morfologi pada area kolam alami maupun aliran sungai di sekitarnya.



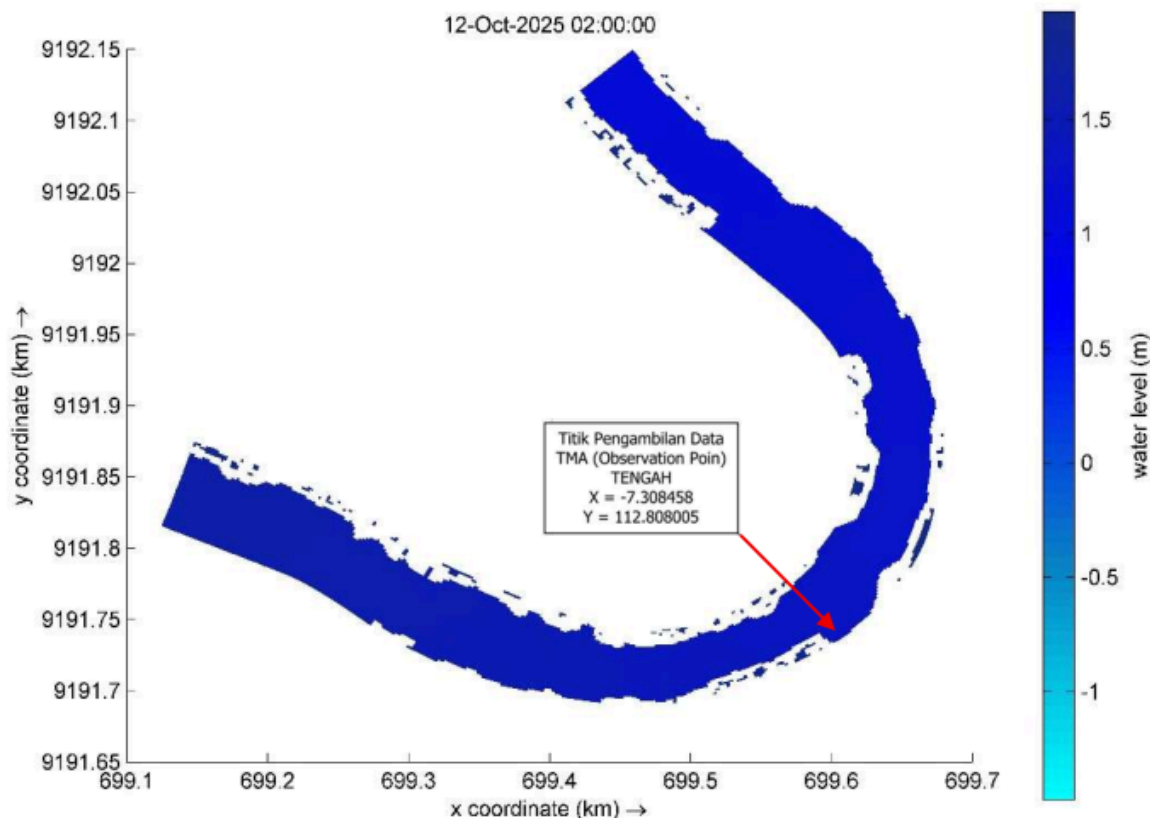
Gambar 4.8 Pasang Surut Simulasi HEC-RAS
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Grafik Pasang Surut HEC-RAS pada Gambar 4.8. menunjukkan hasil simulasi fluktuasi muka air selama 24 jam yang secara umum mengikuti pola pasang surut yang mirip dengan data observasi. Berdasarkan Gambar 4.8. dapat disimpulkan bahwa:

1. Kondisi Pasang Tertinggi (*High Water Level*): Terjadi pada rentang jam ke-7 hingga jam ke-10 yaitu pukul 23:00 hingga 02:00 dini hari dengan elevasi puncak mencapai +1,280 m pada jam ke-9 (01:00).
2. Kondisi Surut Terendah (*Low Water Level*): Terjadi pada siang hari pukul 10:00 hingga 11:00 di rentang jam ke-18 hingga jam ke-19 dengan titik terendah mencapai -0,619 m pada jam ke-18 (10:00).
3. Tunggang Pasang Surut (*Tidal Range*): Jarak total dari titik pasang tertinggi ke surut terendah adalah sekitar 1,899 m.

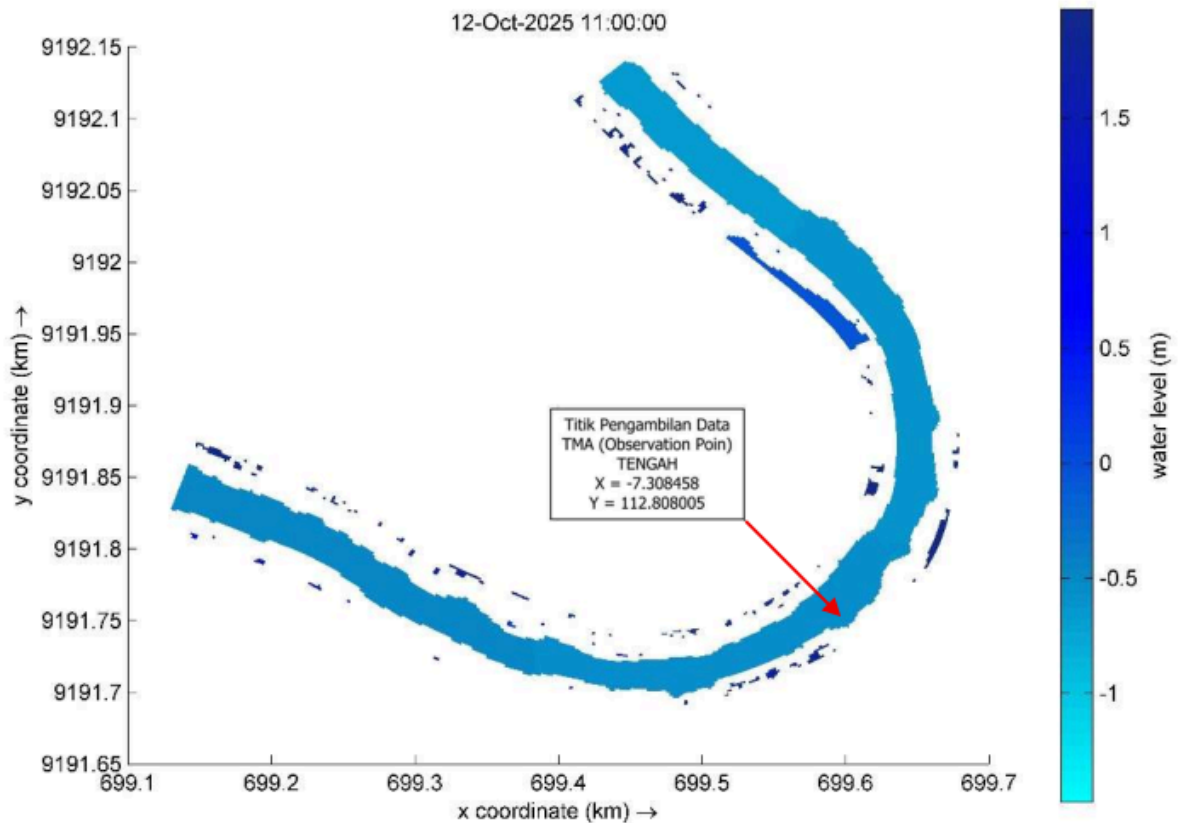
4.1.4. Pasang Surut Simulasi Delft3D

Kondisi pasang maksimal dan surut minimal yang dihasilkan oleh simulasi Delft3D dapat dilihat pada Gambar 4.9. dan Gambar 4.10, berikut.



Gambar 4.9 Hasil Simulasi Delft3D Pada Saat Pasang Tertinggi
(Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026)

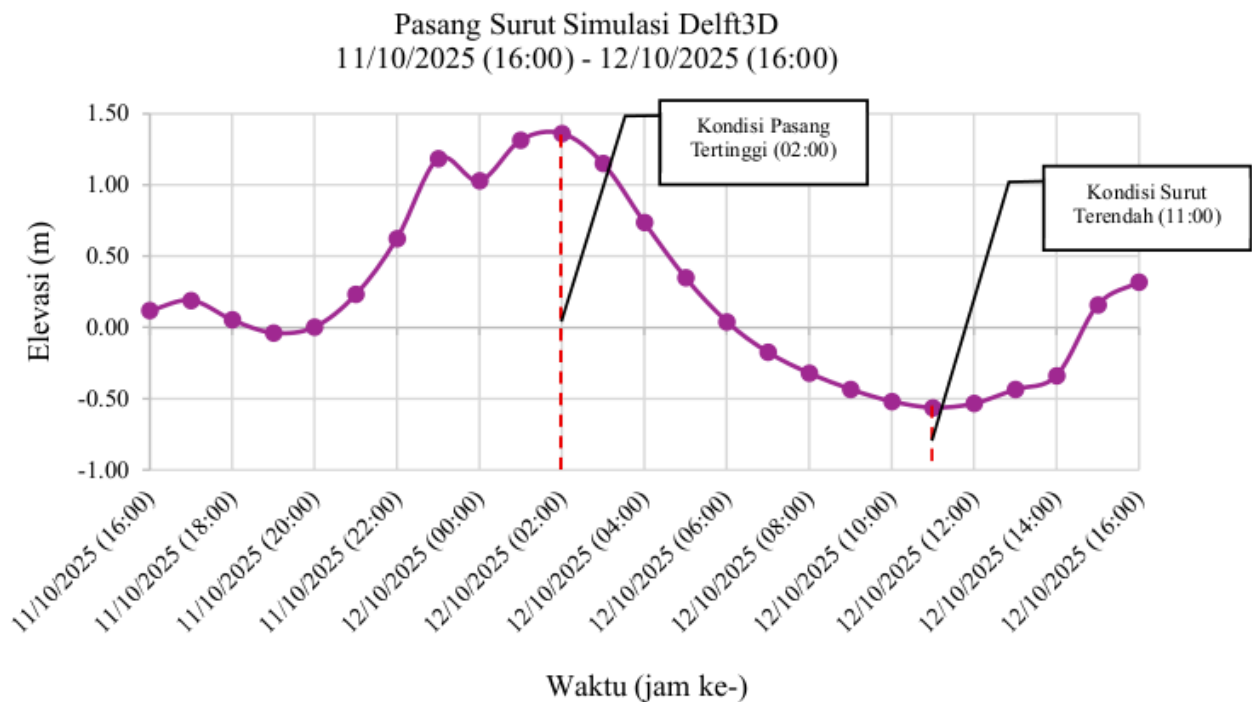
Gambar 4.9 menunjukkan muka air sungai berada pada elevasi yang lebih tinggi yang ditunjukkan oleh dominasi warna biru tua di sepanjang Alir sungai. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengaruh pasang menyebabkan peningkatan muka air secara merata pada seluruh ruas sungai sehingga kapasitas tampungan sungai menjadi lebih besar. Kenaikan muka air tersebut juga dapat memperlambat aliran ke arah hilir akibat adanya efek pembendungan (*backwater*) dari pasang laut.



4
Gambar 4.10 Hasil Simulasi Delft3D Pada Saat Surut Terendah
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Gambar 4.10 terlihat adanya penurunan muka air yang ditunjukkan oleh perubahan warna menjadi lebih muda. Penurunan elevasi muka air ini mengindikasikan berkurangnya volume air di dalam sungai akibat pengaruh surut. Pada kondisi ini, aliran sungai cenderung bergerak lebih bebas menuju hilir karena pengaruh pasang sudah berkurang, sehingga kapasitas pengaliran sungai menjadi lebih baik dibandingkan saat pasang.

Untuk memunculkan grafik yang mewakili kondisi pasang surut simulasi Delft3D, diinputkan data *observation point* sesuai dengan koordinat titik pengambilan tinggi muka air tengah.



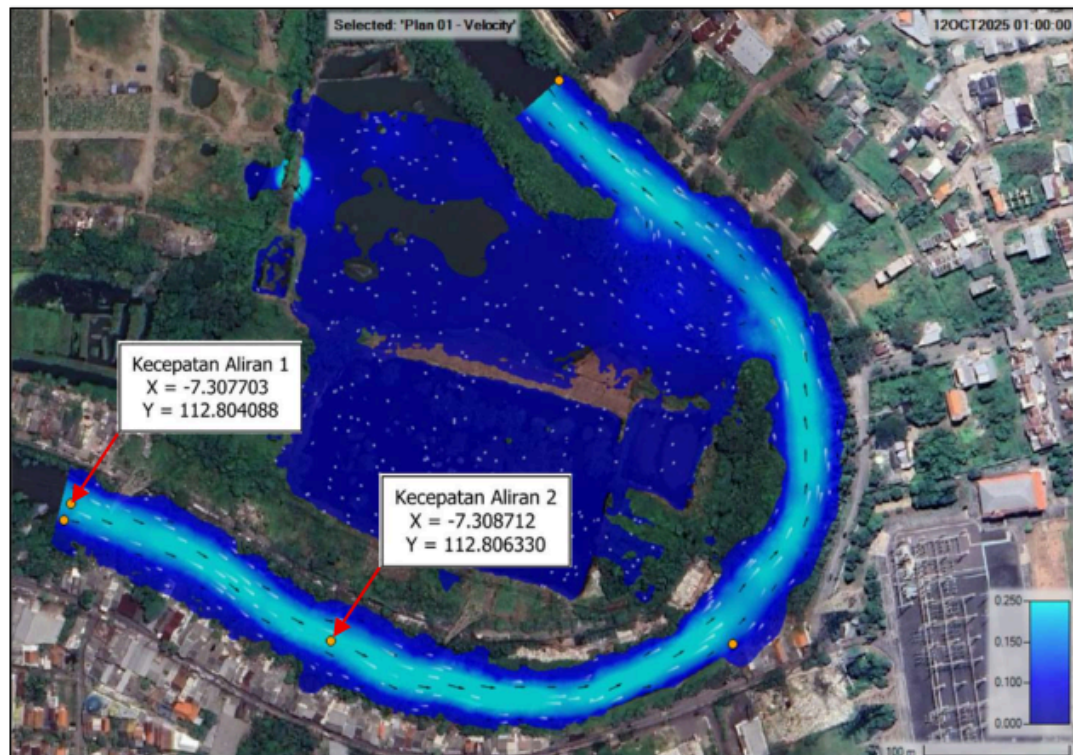
Gambar 4.11 Pasang Surut Simulasi Delft3D
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan Gambar 4.11, dapat disimpulkan bahwa :

1. Kondisi Pasang Tertinggi (*High Water Level*): Terjadi pada rentang jam ke-7 hingga jam ke-10 yaitu pukul 23:00 hingga 02:00 dini hari dengan elevasi puncak mencapai +1,363 m pada jam ke-10 (02:00).
2. Kondisi Surut Terendah (*Low Water Level*): Terjadi pada siang hari pukul 10:00 hingga 12:00 di rentang jam ke-18 hingga jam ke-20 dengan titik terendah mencapai -0,563 m pada jam ke-19 (11:00)
3. Tunggang Pasang Surut (*Tidal Range*): Jarak total dari titik pasang tertinggi ke surut terendah adalah sekitar 1,926 m.

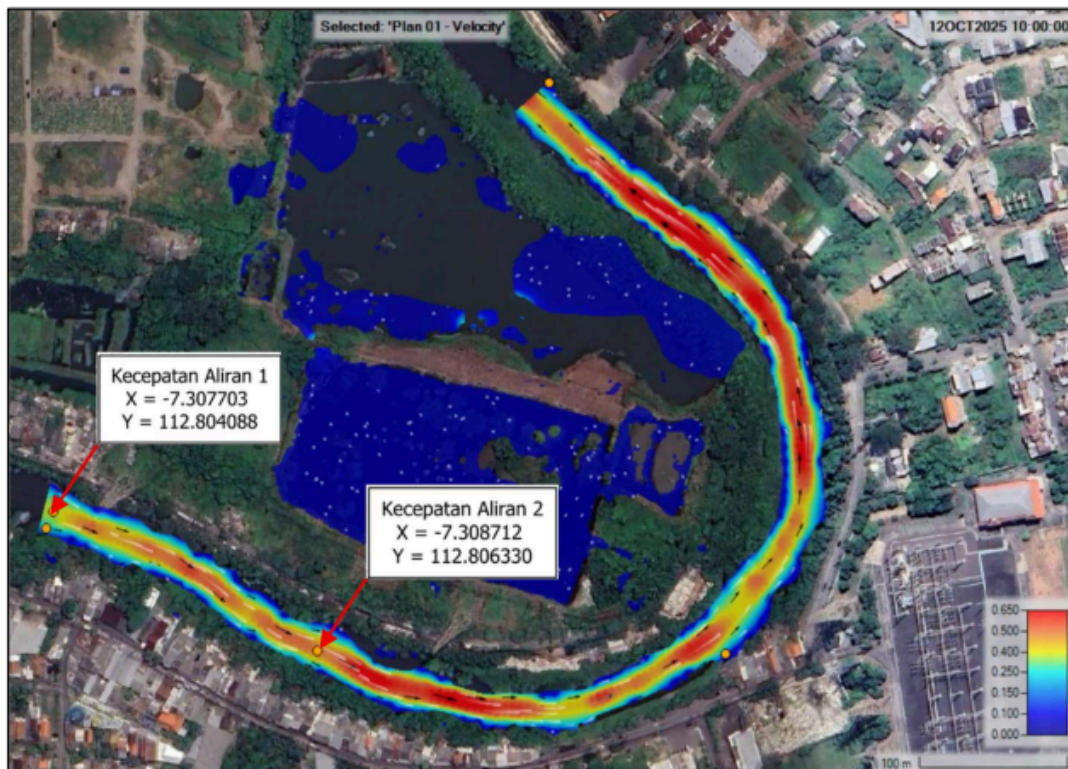
4.1.5. Distribusi Kecepatan Aliran Simulasi HEC-RAS

Kondisi distribusi kecepatan aliran (*Velocity*) di belokan Sungai Wonokromo pada saat mencapai kondisi pasang tertinggi dan surut tertinggi disajikan pada Gambar 4.12, dan Gambar 4.13, Visualisasi ini diperoleh dari hasil ekspor pemodelan hidrolika dua dimensi HEC-RAS.



Gambar 4.12 Distribusi Kecepatan Aliran Simulasi HEC-RAS Pada Saat Pasang Tertinggi
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Dari Gambar 4.12 dapat diketahui bahwa pada saat pasang maksimal, distribusi aliran yaitu mengalir dari hulu ke hilir dengan kecepatan yang cenderung lebih cepat pada posisi tengah penampang sungai. kecepatan aliran relatif rendah dan cenderung merata di sepanjang Alir sungai dengan kisaran sekitar 0,00–0,25 m/s. Dominasi warna biru hingga hijau menunjukkan bahwa energi aliran berkurang akibat pengaruh pasang yang menyebabkan peningkatan muka air dan efek *backwater*. Kondisi ini mengakibatkan aliran bergerak lebih lambat sehingga potensi pengendapan sedimen menjadi lebih besar, terutama pada bagian tikungan dan area dengan kecepatan rendah.

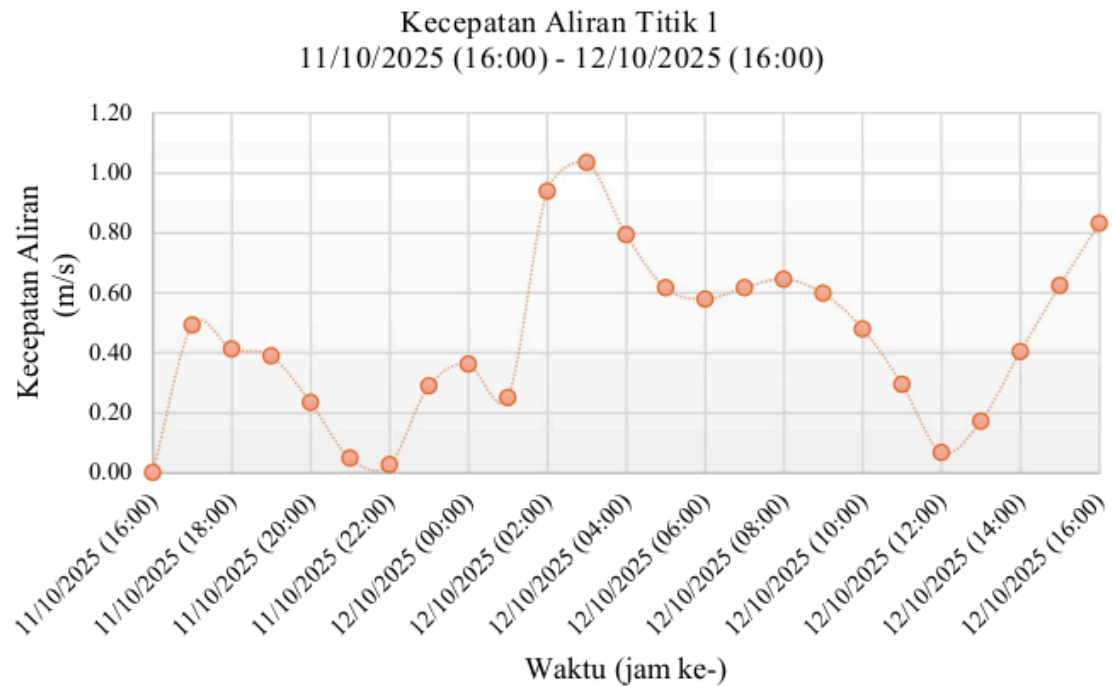


Gambar 4.13 Distribusi Kecepatan Aliran Simulasi HEC-RAS Pada Saat Surut Terendah

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Gambar 4.13 menunjukkan kecepatan aliran meningkat secara signifikan dengan kisaran mencapai sekitar 0,65 m/s. Hal ini ditunjukkan oleh dominasi warna kuning, oranye, hingga merah pada bagian tengah Alir sungai. Peningkatan kecepatan terjadi karena muka air menurun sehingga aliran memiliki gradien energi yang lebih besar untuk mengalir ke arah hilir. Kecepatan tertinggi umumnya berada pada bagian tengah Aliran dan sisi luar tikungan, sedangkan kecepatan lebih rendah terjadi di dekat tebing sungai dan area genangan.

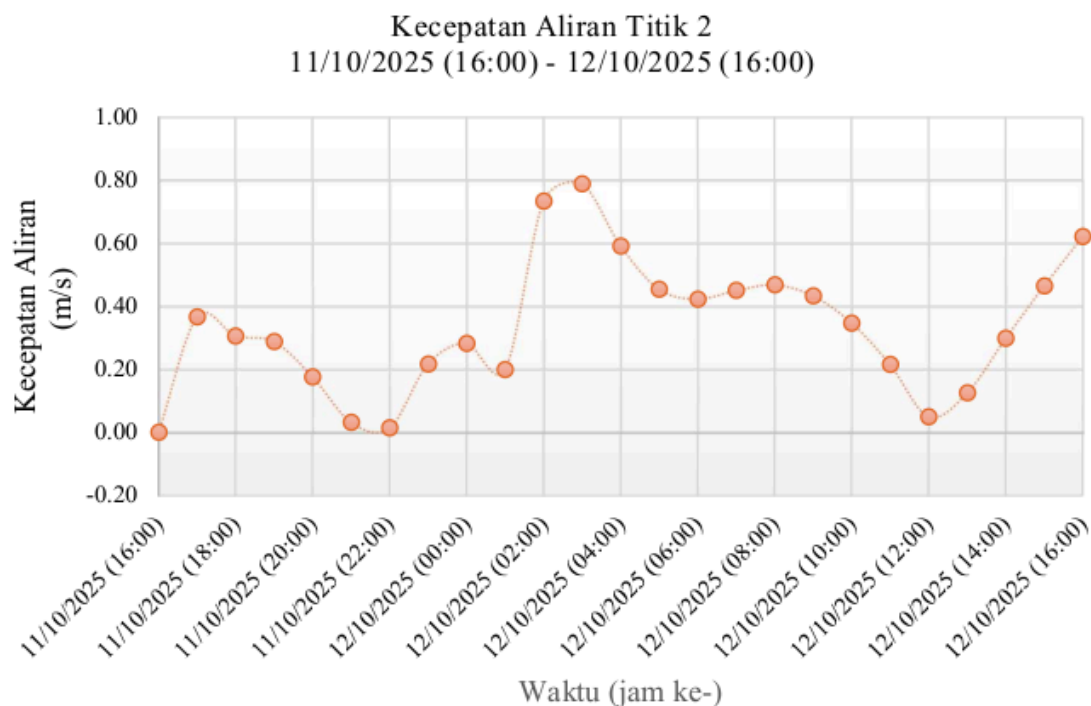
Berdasarkan visualisasi spasial ¹ pada Gambar 4.12, dan Gambar 4.13, kemudian dapat diambil data grafik pasang surut air yang disesuaikan dengan lokasi titik pengambilan data kecepatan aliran observasi lapangan (Representasi oleh titik oranye) (kanan titik 1, kiri titik 2).



Gambar 4.14 Kecepatan Aliran Titik 1 Simulasi HEC-RAS
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan Gambar 4.14, dapat disimpulkan bahwa:

1. Kondisi kecepatan aliran puncak di titik koordinat *reference point* terjadi pada saat jam ke-11 (12/10/2025 03,00 WIB) sebesar 1,035 m/s.
2. Kondisi kecepatan aliran terendah di titik koordinat *reference point* terjadi pada saat jam ke-6 (11/10/2025 22,00 WIB) sebesar 0,027 m/s.
3. Pola kecepatan aliran secara visual sejalan dengan perubahan debit eksisting, pada saat debit puncak (Q_{peak}) kecepatan aliran juga tinggi.



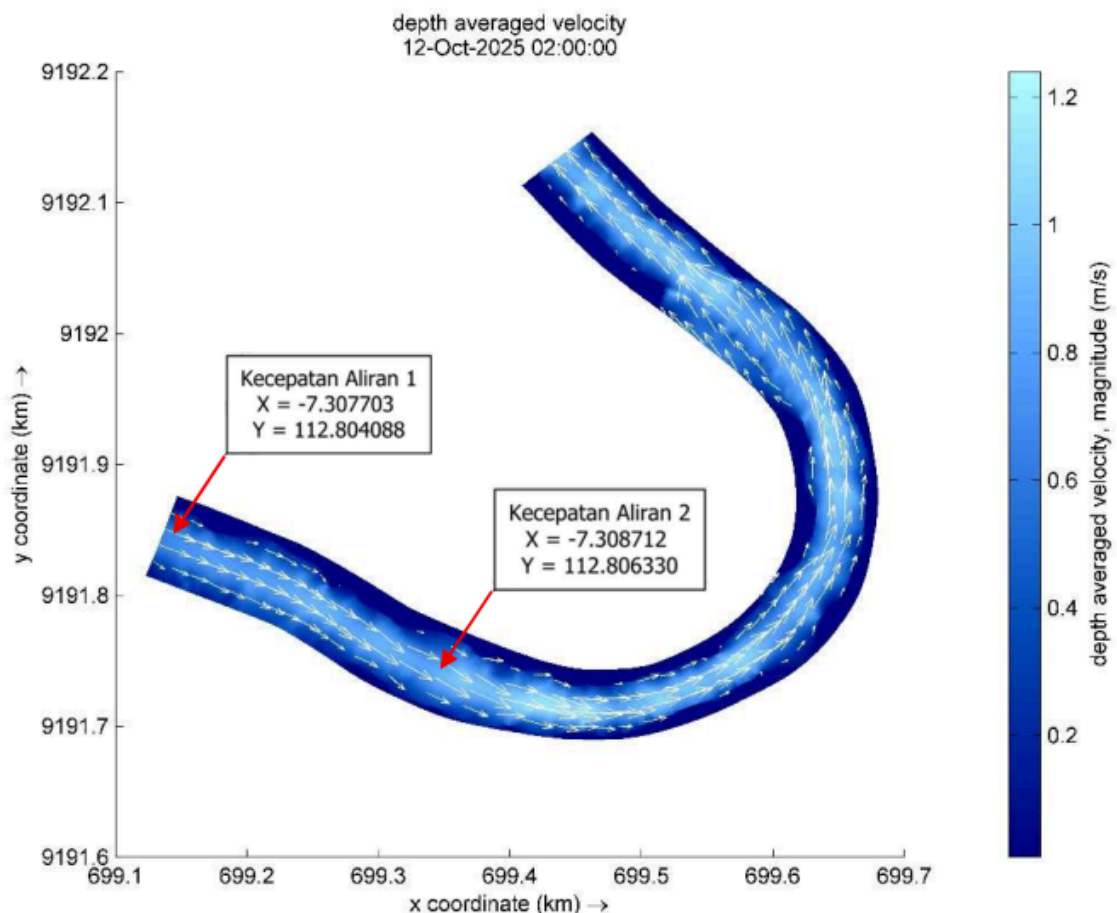
Gambar 4.15 Kecepatan Aliran Titik 2 Simulasi HEC-RAS
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan Gambar 4.15, dapat disimpulkan bahwa:

1. Kondisi kecepatan aliran puncak di titik koordinat reference point terjadi pada saat jam ke-11 (12/10/2025 03,00 WIB) sebesar 0,788 m/s.
2. Kondisi kecepatan aliran terendah di titik koordinat reference point terjadi pada saat jam ke-6 (11/10/2025 22,00 WIB) sebesar 0,014 m/s.
3. Pola kecepatan aliran secara visual sejalan dengan perubahan debit eksisting, pada saat debit puncak (Q_{peak}) kecepatan aliran juga tinggi.

4.1.6. Distribusi Kecepatan Aliran Simulasi Delft3D

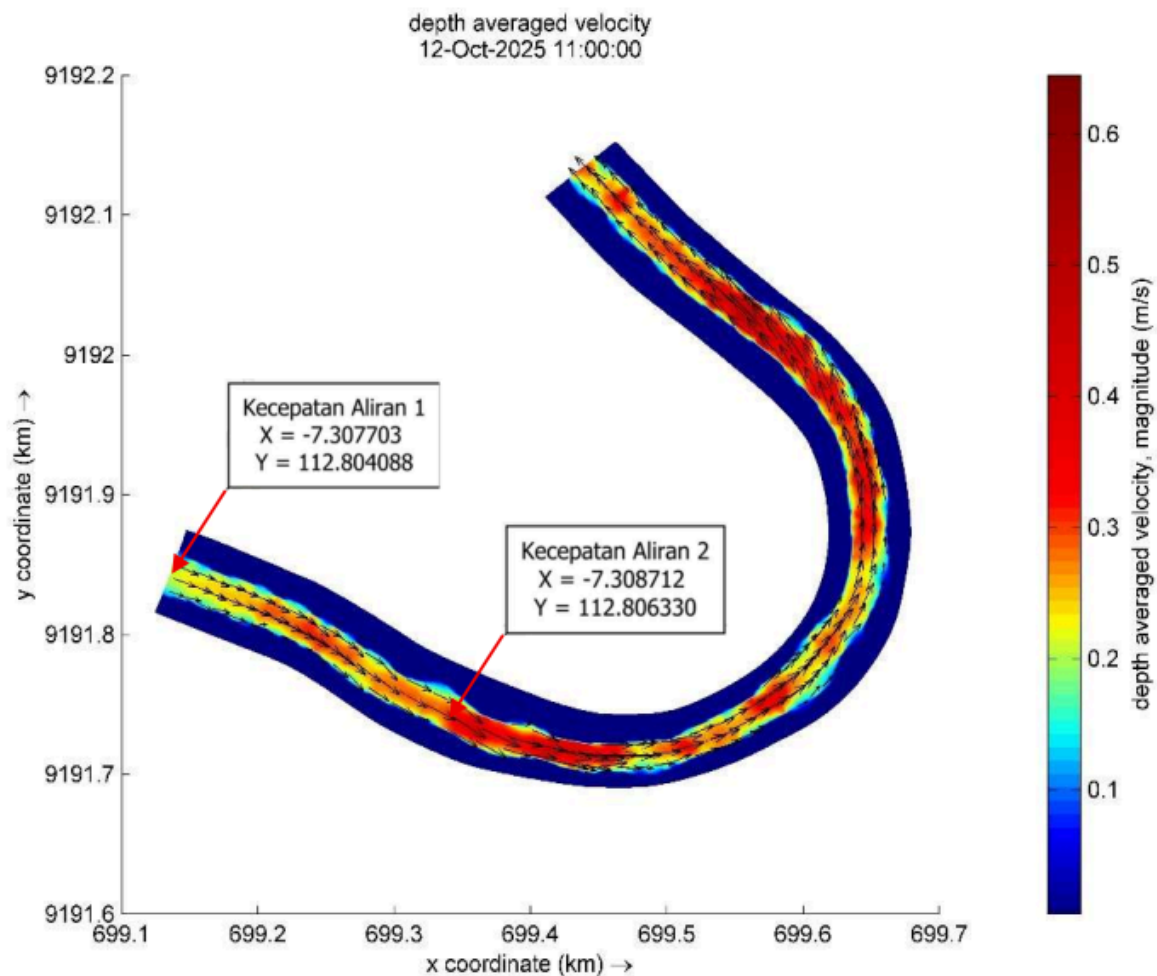
Kondisi distribusi kecepatan aliran pada saat pasang tertinggi terjadi pada pukul (12/10/2025 02,00 WIB) dan surut terendah terjadi pada pukul (12/10/2025 11,00 WIB). Simulasi kecepatan aliran yang dihasilkan oleh simulasi Delft3D dapat dilihat pada Gambar 4.16. dan Gambar 4.17. berikut.



Gambar 4.16 Distribusi Kecepatan Aliran Simulasi Delft3D Pada Saat Pasang Tertinggi

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

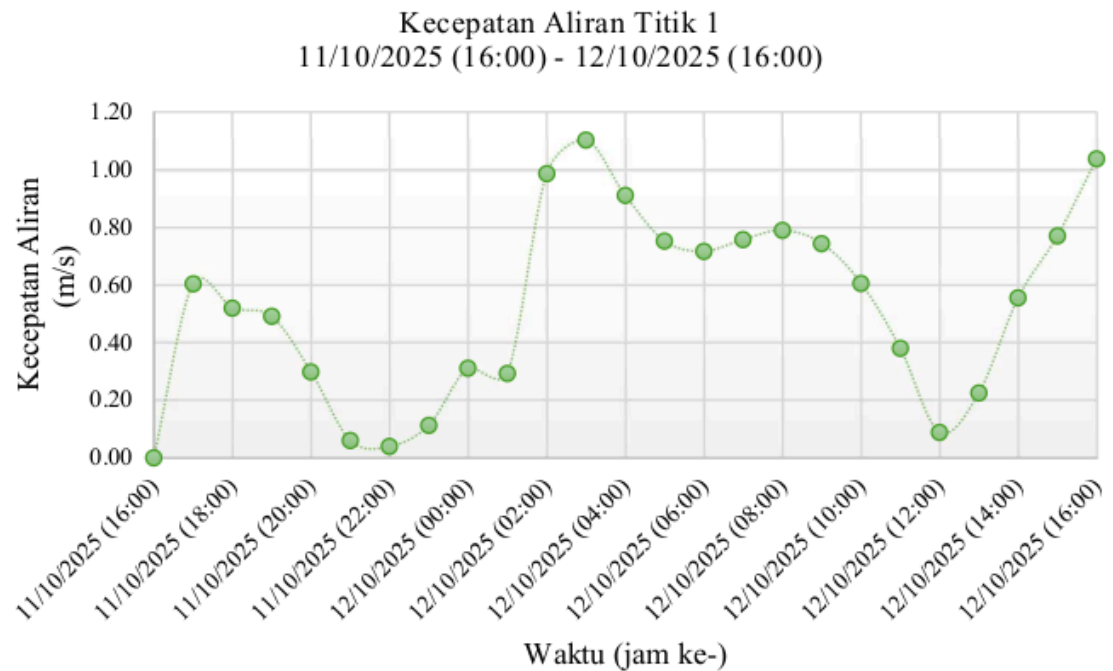
Dari Gambar 4.16, dapat disimpulkan bahwa pada saat kondisi pasang tertinggi, distribusi kecepatan aliran terjadi dengan arah *vector* dari hulu sungai menuju hilir sungai.



Gambar 4.17 Distribusi Kecepatan Aliran Simulasi Delft3D Pada Saat Surut Terendah

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

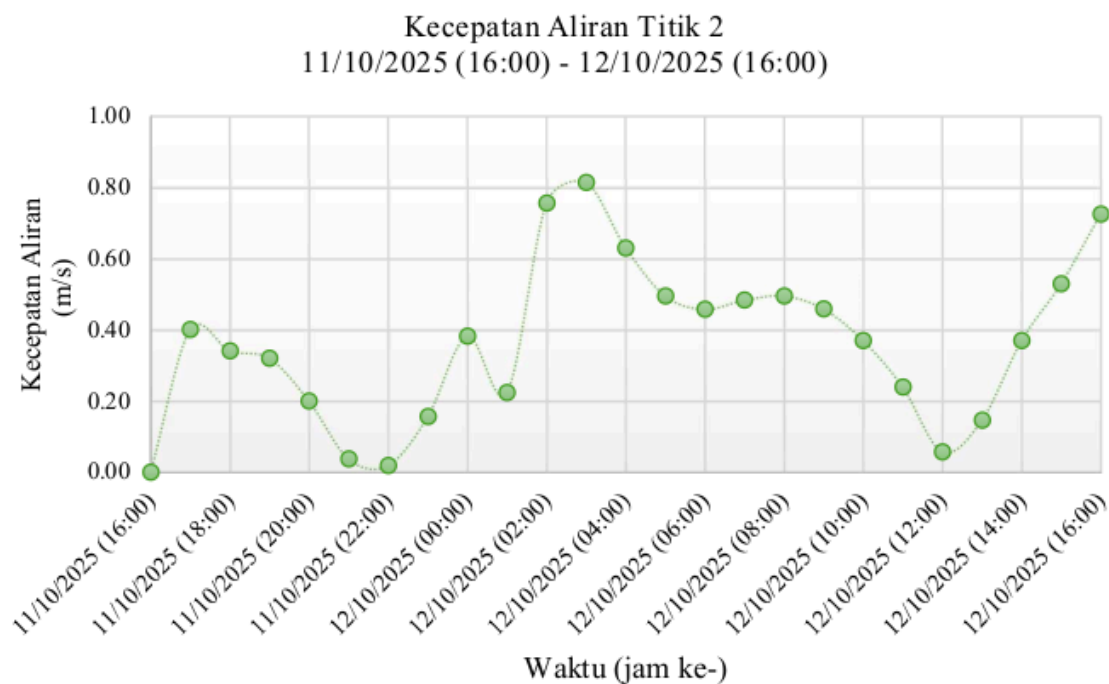
Berdasarkan visualisasi spasial ⁴ pada Gambar 4.16. dan Gambar 4.17. kemudian dapat diambil data grafik pasang surut air yang disesuaikan dengan lokasi titik pengambilan data kecepatan aliran observasi lapangan.



Gambar 4.18 Kecepatan Aliran Titik 1 Simulasi Delft3D
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan Gambar 4.18. dapat disimpulkan bahwa:

1. Kondisi kecepatan aliran puncak di titik koordinat *reference point* terjadi pada saat jam ke-11 (12/10/2025 03,00 WIB) sebesar 1,103 m/s.
2. Kondisi kecepatan aliran terendah di titik koordinat *reference point* terjadi pada saat jam ke-6 (11/10/2025 22,00 WIB) sebesar 0,039 m/s.
3. Pola kecepatan aliran secara visual sejalan dengan perubahan debit eksisting, pada saat debit puncak (Q_{peak}) kecepatan aliran juga tinggi.



Gambar 4.19 Kecepatan Aliran Titik 2 Simulasi Delft3D
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

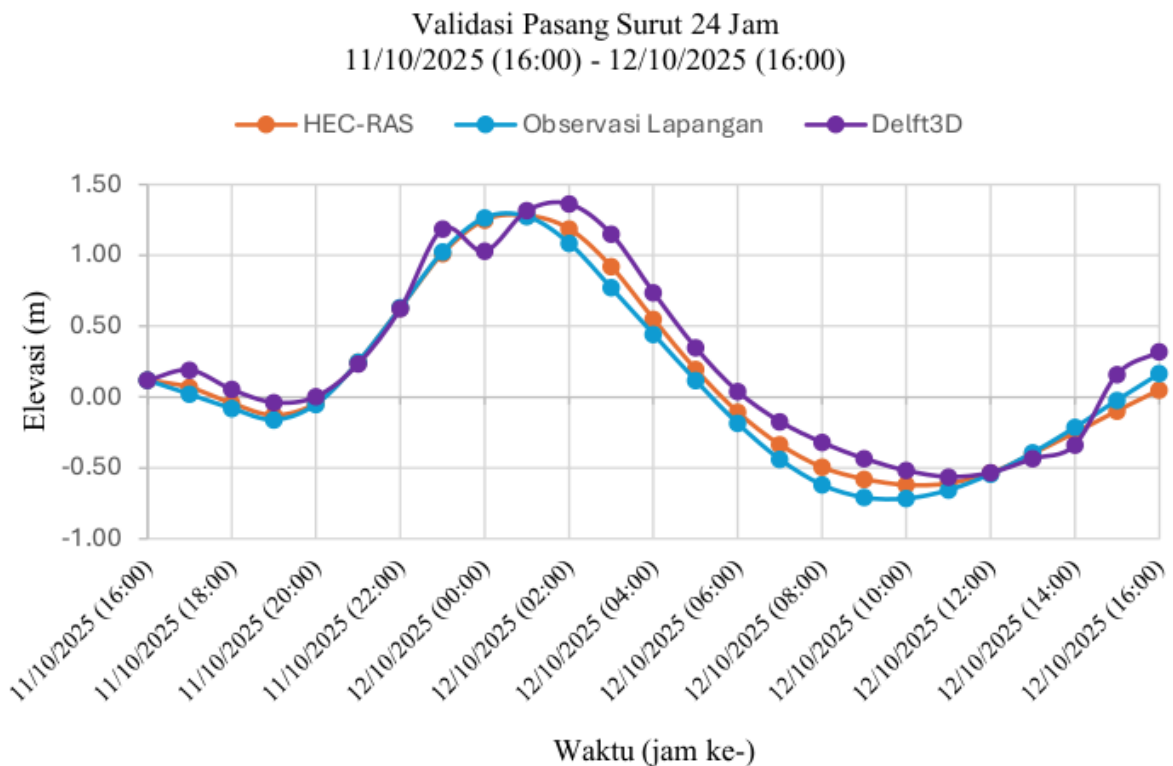
Berdasarkan Gambar 4.19. dapat disimpulkan bahwa:

1. Kondisi kecepatan aliran puncak di titik koordinat *reference point* terjadi pada saat jam ke-11 (12/10/2025 03,00 WIB) sebesar 0,788 m/s.
2. Kondisi kecepatan aliran terendah di titik koordinat *reference point* terjadi pada saat jam ke-5 (11/10/2025 22,00 WIB) sebesar 0,019 m/s.
3. Pola kecepatan aliran secara visual sejalan dengan perubahan debit eksisting, pada saat debit puncak (Q_{peak}) kecepatan aliran juga tinggi.

4.2. Validasi Data Pasang Surut dan Kecepatan Aliran

Validasi data dilakukan untuk meninjau atau mengetahui kualitas data yang dihasilkan oleh simulasi aplikasi HEC-RAS maupun Delft3D dapat merepresentasikan fenomena alam di lokasi penelitian secara akurat.

4.2.1. Validasi Data Pasut

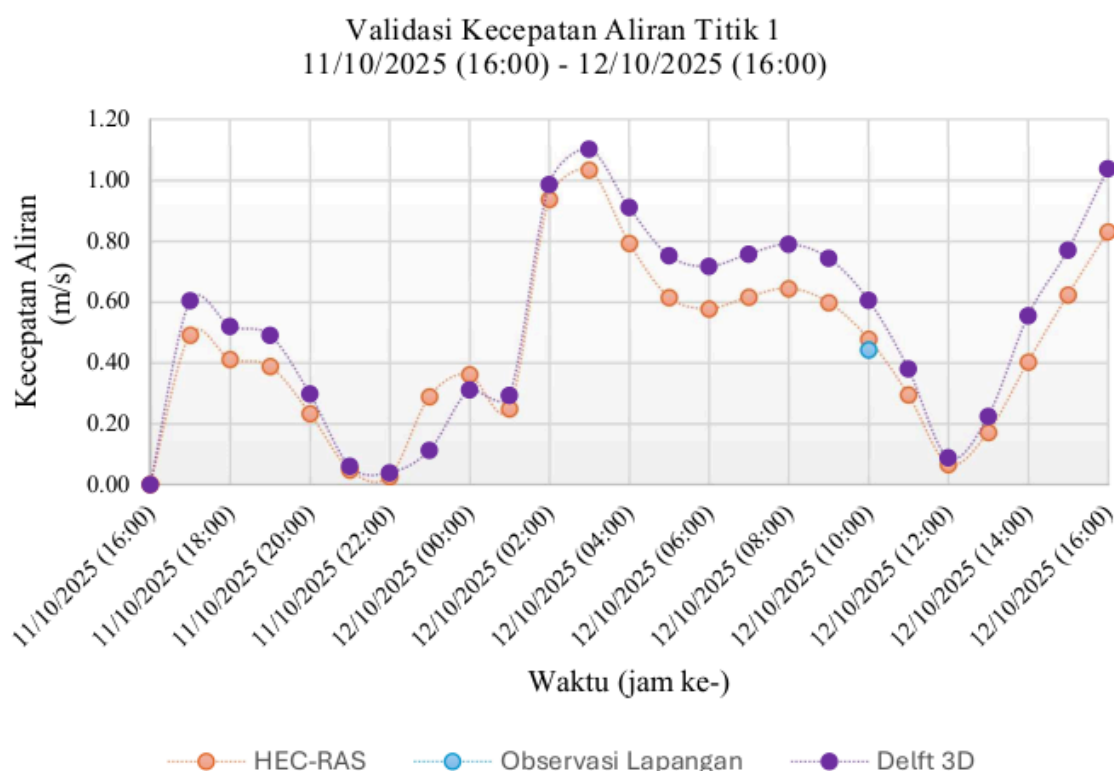


Gambar 4.20 Validasi Tinggi Muka Air
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Grafik validasi menunjukkan fluktuasi elevasi muka air selama rentang waktu 24 jam untuk membandingkan performa model HEC-RAS dan Delft3D terhadap data observasi lapangan. Secara keseluruhan, kedua model mampu mengikuti tren pasang surut lapangan dengan baik, di mana puncak pasang tertinggi terjadi pada jam ke-9 dengan elevasi sekitar 1,3 hingga 1,4 meter, dan titik surut terendah tercapai di sekitar jam ke-17 hingga ke-18. Data Delft3D cenderung memberikan nilai elevasi yang sedikit lebih tinggi pada saat puncak pasang dan sedikit lebih rendah pada saat surut dibandingkan dengan data observasi. Sementara itu, grafik HEC-RAS menunjukkan hasil yang sangat mendekati data lapangan pada fase pasang, namun terlihat sedikit lebih landai atau memiliki elevasi yang lebih tinggi dibandingkan data observasi saat mencapai fase surut terdalam.

Kemiripan tren antara ketiga garis tersebut mengindikasikan bahwa parameter input yang digunakan dalam pemodelan, baik di Delft3D maupun HEC-RAS, sudah cukup valid untuk merepresentasikan kondisi hidrodinamika di lokasi studi. Perbedaan kecil yang muncul antara hasil simulasi dan observasi lapangan merupakan hal yang wajar dalam pemodelan numerik, yang dapat dipengaruhi oleh penentuan koefisien kekasaran Manning atau geometri penampang sungai yang digunakan.

4.2.2. Validasi Data Kecepatan Aliran



Gambar 4.21 Validasi Kecepatan Aliran 1
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

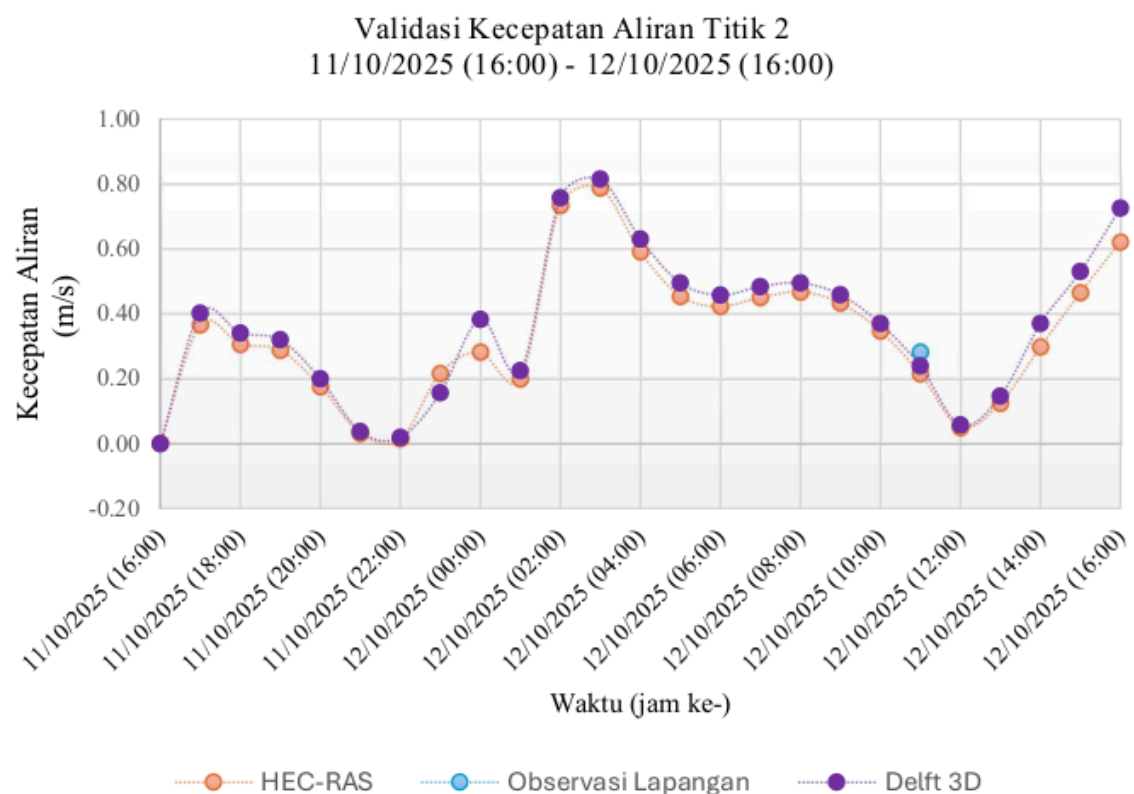
Grafik menunjukkan perbandingan kecepatan aliran hasil simulasi HEC-RAS, Delft3D, dan observasi lapangan pada Titik 1 selama periode 11 Oktober 2025 pukul 16,00 hingga 12 Oktober 2025 pukul 16,00. Secara umum, kedua model mampu mengikuti pola perubahan kecepatan aliran yang terukur di lapangan, ditunjukkan oleh tren kenaikan dan penurunan yang relatif serupa sepanjang waktu pengamatan.

Pada awal pengamatan (jam ke-0 hingga jam ke-8), kecepatan aliran cenderung menurun dari sekitar 0,6 m/s hingga mencapai nilai minimum

mendekati 0 m/s. Setelah itu, terjadi peningkatan yang cukup signifikan hingga mencapai puncak kecepatan pada jam ke-11 hingga jam ke-12, Nilai kecepatan maksimum hasil observasi lapangan tercatat sekitar 1,0 m/s, sedangkan model Delft3D memberikan prediksi sedikit lebih tinggi, yaitu sekitar 1,1 m/s, dan model HEC-RAS menunjukkan hasil yang paling mendekati nilai observasi.

Setelah mencapai puncak, kecepatan aliran mengalami penurunan secara bertahap hingga jam ke-20, kemudian meningkat kembali sampai akhir periode pengamatan. Pola fluktuasi tersebut menunjukkan pengaruh pasang surut yang mengendalikan dinamika aliran di lokasi penelitian.

Berdasarkan perbandingan visual, model HEC-RAS menunjukkan kecenderungan hasil yang lebih dekat dengan data observasi lapangan pada sebagian besar waktu pengamatan. Sementara itu, model Delft3D mampu mengikuti pola perubahan yang sama, namun cenderung menghasilkan nilai kecepatan yang sedikit lebih tinggi (*overestimate*), terutama pada saat terjadi kecepatan maksimum. Secara keseluruhan, kedua model dapat merepresentasikan karakteristik aliran di lokasi penelitian dengan cukup baik karena mampu mengikuti tren data observasi lapangan.



Gambar 4.22 Validasi Kecepatan Aliran 2
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Grafik menunjukkan perbandingan kecepatan aliran hasil simulasi HEC-RAS, Delft3D, dan observasi lapangan pada Titik 1 selama periode 11 Oktober 2025 pukul 16,00 hingga 12 Oktober 2025 pukul 16,00. Secara umum, kedua model mampu mengikuti pola perubahan kecepatan aliran yang terukur di lapangan, ditunjukkan oleh tren kenaikan dan penurunan yang relatif serupa sepanjang waktu pengamatan.

Pada awal pengamatan (jam ke-0 hingga jam ke-8), kecepatan aliran cenderung menurun dari sekitar 0,6 m/s hingga mencapai nilai minimum mendekati 0 m/s. Setelah itu, terjadi peningkatan yang cukup signifikan hingga mencapai puncak kecepatan pada jam ke-11 hingga jam ke-12. Nilai kecepatan maksimum hasil observasi lapangan tercatat sekitar 1,0 m/s, sedangkan model Delft3D memberikan prediksi sedikit lebih tinggi, yaitu sekitar 1,1 m/s, dan model HEC-RAS menunjukkan hasil yang paling mendekati nilai observasi.

Setelah mencapai puncak, kecepatan aliran mengalami penurunan secara bertahap hingga jam ke-20, kemudian meningkat kembali sampai akhir periode pengamatan. Pola fluktuasi tersebut menunjukkan pengaruh pasang surut yang mengendalikan dinamika aliran di lokasi penelitian.

Berdasarkan perbandingan visual, model HEC-RAS menunjukkan kecenderungan hasil yang lebih dekat dengan data observasi lapangan pada sebagian besar waktu pengamatan. Sementara itu, model Delft3D mampu mengikuti pola perubahan yang sama, namun cenderung menghasilkan nilai kecepatan yang sedikit lebih tinggi (*overestimate*), terutama pada saat terjadi kecepatan maksimum. Secara keseluruhan, kedua model dapat merepresentasikan karakteristik aliran di lokasi penelitian dengan cukup baik karena mampu mengikuti tren data observasi lapangan.

4.3. Uji Statistik Kesesuaian Model

Untuk membuktikan akurasi model secara matematis, dilakukan uji statistik menggunakan metode *Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)* dan *RMSE-observations Standard deviation Ratio (RSR)*. Perhitungan didasarkan pada jumlah kuadrat selisih (*sum of squared errors*) antara data ukur dan data hitung

4.3.1. Uji Statistik Kesesuaian Model Pasut

a. Validasi HEC-RAS vs Observasi

Tabel 4.1 Uji Statistik Pasut HEC-RAS vs Simulasi

Jam ke- (t)	Elevasi Observasi (Y.obs) (m)	Elevasi Simulasi (Y.sim) (m)	Selisih Error (Y.obs-Y.sim)	Kuadrat Error (Y.obs-Y.sim) ²	Selisih Deviasi	Kuadrat Deviasi
0	0,119	0,119	0,000	0,000	0,119	0,014
1	0,021	0,069	-0,048	0,002	0,021	0,000
2	-0,079	-0,043	-0,036	0,001	-0,079	0,006
3	-0,160	-0,127	-0,033	0,001	-0,160	0,025
4	-0,051	-0,040	-0,011	0,000	-0,051	0,003
5	0,248	0,247	0,001	0,000	0,248	0,062
6	0,632	0,631	0,001	0,000	0,632	0,400
7	1,026	1,013	0,013	0,000	1,026	1,053
8	1,265	1,249	0,016	0,000	1,265	1,601
9	1,274	1,280	-0,006	0,000	1,274	1,624
10	1,086	1,187	-0,101	0,010	1,086	1,178
11	0,772	0,922	-0,150	0,022	0,772	0,596
12	0,443	0,550	-0,107	0,011	0,443	0,197
13	0,118	0,196	-0,078	0,006	0,118	0,014
14	-0,185	-0,106	-0,079	0,006	-0,185	0,034
15	-0,439	-0,335	-0,104	0,011	-0,439	0,193
16	-0,618	-0,494	-0,124	0,015	-0,618	0,383
17	-0,707	-0,579	-0,128	0,016	-0,707	0,500
18	-0,715	-0,619	-0,096	0,009	-0,715	0,511
19	-0,656	-0,608	-0,048	0,002	-0,656	0,430
20	-0,543	-0,536	-0,007	0,000	-0,543	0,295
21	-0,391	-0,399	0,008	0,000	-0,391	0,153
22	-0,213	-0,250	0,037	0,001	-0,213	0,045
23	-0,023	-0,098	0,075	0,006	-0,023	0,001
24	0,166	0,051	0,115	0,013	0,166	0,028
Rerata	0,096		Total	0,136		9,345

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

$$\text{Rerata data Observasi} = Y_{\text{mean}} = 0,096$$

23

Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) =

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{mean})^2}$$

$$NSE = 1 - \frac{0,136 - 9,345}{0,136 - 9,345}$$

$$NSE = 0,985$$

RMSE- observations Standard deviation Ratio =

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}}{\sqrt{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}}$$

$$RSR = \frac{\sqrt{0,136}}{\sqrt{9,345}}$$

$$RSR = 0,121$$

b. Validasi Delft3D vs Observasi

Tabel 4.2 Uji Statistik Pasut Delft3D vs Observasi

Jam ke- (t)	Elevasi Observasi (Y.obs) (m)	Elevasi Simulasi (Y.sim) (m)	Selisih Error (Y.obs-Y.sim)	Kuadrat Error (Y.obs-Y.sim) ²	Selisih Deviasi	Kuadrat Deviasi
0	0,119	0,119	0,000	0,000	0,119	0,014
1	0,021	0,190	-0,170	0,029	0,021	0,000
2	-0,079	0,054	-0,133	0,018	-0,079	0,006
3	-0,160	-0,037	-0,122	0,015	-0,160	0,025
4	-0,051	0,004	-0,054	0,003	-0,051	0,003
5	0,248	0,233	0,015	0,000	0,248	0,062
6	0,632	0,625	0,008	0,000	0,632	0,400
7	1,026	1,186	-0,160	0,026	1,026	1,053
8	1,265	1,030	0,235	0,055	1,265	1,601
9	1,274	1,315	-0,041	0,002	1,274	1,624
10	1,086	1,363	-0,277	0,077	1,086	1,178
11	0,772	1,151	-0,379	0,144	0,772	0,596
12	0,443	0,738	-0,294	0,087	0,443	0,197

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

11

Tabel 4.2 Uji Statistik Pasut Delft3D vs Observasi (Lanjutan)

Jam ke- (t)	Elevasi Observasi (Y.obs) (m)	Elevasi Simulasi (Y.sim) (m)	Selisih Error (Y.obs-Y.sim)	Kuadrat Error (Y.obs-Y.sim) ²	Selisih Deviasi	Kuadrat Deviasi
13	0,118	0,350	-0,232	0,054	0,118	0,014
14	-0,185	0,041	-0,225	0,051	-0,185	0,034
15	-0,439	-0,173	-0,266	0,071	-0,439	0,193
16	-0,618	-0,320	-0,298	0,089	-0,618	0,383
17	-0,707	-0,433	-0,274	0,075	-0,707	0,500
18	-0,715	-0,518	-0,197	0,039	-0,715	0,511
19	-0,656	-0,563	-0,093	0,009	-0,656	0,430
20	-0,543	-0,533	-0,010	0,000	-0,543	0,295
21	-0,391	-0,434	0,044	0,002	-0,391	0,153
22	-0,213	-0,337	0,124	0,015	-0,213	0,045
23	-0,023	0,160	-0,182	0,033	-0,023	0,001
24	0,166	0,320	-0,154	0,024	0,166	0,028
Rerata	0,096		Total	0,916		9,345

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Rerata data Observasi $= Y_{mean} = 0,096$

$$Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) =$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{mean})^2}$$

$$NSE = 1 - \frac{0,916 - 9,345}{0,916 - 9,345}$$

$$NSE = 0,902$$

RMSE- observations Standard deviation Ratio =

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}}{\sqrt{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}}$$

$$RSR = \frac{\sqrt{0,916}}{\sqrt{9,345}}$$

$$RSR = 0,313$$

4.3.2. Uji Statistik Kesesuaian Model Kecepatan Aliran 1

- a. Validasi Kecepatan Aliran 1 HEC-RAS vs Observasi

Tabel 4.3 Statistik Kecepatan Aliran 1 HEC-RAS vs Observasi

Jam ke- (t)	Elevasi Observasi (Y.obs) (m)	Elevasi Simulasi (Y.sim) (m)	Selisih Error (Y.obs-Y.sim)	Kuadrat Error (Y.obs-Y.sim) ²	Selisih Deviasi	Kuadrat Deviasi
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,000	0,492	-0,492	0,242	0,000	0,000
2	0,000	0,412	-0,412	0,170	0,000	0,000
3	0,000	0,389	-0,389	0,151	0,000	0,000
4	0,000	0,234	-0,234	0,055	0,000	0,000
5	0,000	0,048	-0,048	0,002	0,000	0,000
6	0,000	0,027	-0,027	0,001	0,000	0,000
7	0,000	0,289	-0,289	0,084	0,000	0,000
8	0,000	0,362	-0,362	0,131	0,000	0,000
9	0,000	0,250	-0,250	0,063	0,000	0,000
10	0,000	0,938	-0,938	0,880	0,000	0,000
11	0,000	1,035	-1,035	1,071	0,000	0,000
12	0,000	0,794	-0,794	0,630	0,000	0,000
13	0,000	0,616	-0,616	0,379	0,000	0,000
14	0,000	0,578	-0,578	0,334	0,000	0,000
15	0,000	0,617	-0,617	0,381	0,000	0,000
16	0,000	0,645	-0,645	0,416	0,000	0,000
17	0,000	0,598	-0,598	0,358	0,000	0,000
18	0,443	0,479	-0,036	0,001	0,443	0,196
19	0,000	0,295	-0,295	0,087	0,000	0,000
20	0,000	0,067	-0,067	0,004	0,000	0,000
21	0,000	0,172	-0,172	0,030	0,000	0,000
22	0,000	0,404	-0,404	0,163	0,000	0,000
23	0,000	0,624	-0,624	0,389	0,000	0,000
24	0,000	0,831	-0,831	0,691	0,000	0,000
Rerata	0,443		Total	0,001		0,196

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

$$\text{Rerata data Observasi} = Y_{\text{mean}} = 0,443$$

23

Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) =

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{mean})^2}$$

$$NSE = 1 - \frac{0,001 - 0,196}{0,001 - 0,196}$$

$$NSE = 0,993$$

RMSE- observations Standard deviation Ratio =

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}}{\sqrt{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}}$$

$$RSR = \frac{\sqrt{0,001}}{\sqrt{0,196}}$$

$$RSR = 0,081$$

b. Validasi Kecepatan Aliran 1 Delft3D vs Observasi

Tabel 4.4 Uji Statistik Kecepatan Aliran 1 Delft3D vs Observasi

Jam ke- (t)	Elevasi Observasi (Y.obs) (m)	Elevasi Simulasi (Y.sim) (m)	Selisih Error (Y.obs-Y.sim)	Kuadrat Error (Y.obs-Y.sim) ²	Selisih Deviasi	Kuadrat Deviasi
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,000	0,604	-0,604	0,365	0,000	0,000
2	0,000	0,519	-0,519	0,270	0,000	0,000
3	0,000	0,491	-0,491	0,241	0,000	0,000
4	0,000	0,298	-0,298	0,089	0,000	0,000
5	0,000	0,060	-0,060	0,004	0,000	0,000
6	0,000	0,039	-0,039	0,002	0,000	0,000
7	0,000	0,112	-0,112	0,013	0,000	0,000
8	0,000	0,311	-0,311	0,097	0,000	0,000
9	0,000	0,293	-0,293	0,086	0,000	0,000
10	0,000	0,987	-0,987	0,973	0,000	0,000
11	0,000	1,103	-1,103	1,217	0,000	0,000
12	0,000	0,911	-0,911	0,830	0,000	0,000

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.4 Uji Statistik Kecepatan Aliran 1 Delft3D vs Observasi (Lanjutan)

Jam ke- (t)	Elevasi Observasi (Y.obs) (m)	Elevasi Simulasi (Y.sim) (m)	Selisih Error (Y.obs-Y.sim)	Kuadrat Error (Y.obs-Y.sim) ²	Selisih Deviasi	Kuadrat Deviasi
13	0,000	0,752	-0,752	0,566	0,000	0,000
14	0,000	0,717	-0,717	0,514	0,000	0,000
15	0,000	0,758	-0,758	0,574	0,000	0,000
16	0,000	0,790	-0,790	0,624	0,000	0,000
17	0,000	0,744	-0,744	0,553	0,000	0,000
18	0,443	0,606	-0,163	0,027	0,443	0,196
19	0,000	0,380	-0,380	0,144	0,000	0,000
20	0,000	0,088	-0,088	0,008	0,000	0,000
21	0,000	0,224	-0,224	0,050	0,000	0,000
22	0,000	0,555	-0,555	0,308	0,000	0,000
23	0,000	0,770	-0,770	0,594	0,000	0,000
24	0,000	1,038	-1,038	1,078	0,000	0,000
Rerata	0,443		Total	0,027		0,196

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Rerata data Observasi $= Y_{mean} = 0,443$

²³ Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) =

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{mean})^2}$$

$$NSE = 1 - \frac{0,027 - 0,196}{0,027 - 0,196}$$

$$NSE = 0,865$$

RMSE- observations Standard deviation Ratio =

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}}{\sqrt{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}}$$

$$RSR = \frac{\sqrt{0,027}}{\sqrt{0,196}}$$

$$RSR = 0,368$$

4.3.3. Uji Statistik Kesesuaian Model Kecepatan Aliran 2

- a. Validasi Kecepatan Aliran 2 HEC-RAS vs Observasi

Tabel 4.5 Uji Statistik Kecepatan Aliran 2 HEC-RAS vs Observasi

Jam ke- (t)	Elevasi Observasi (Y.obs) (m)	Elevasi Simulasi (Y.sim) (m)	Selisih Error (Y.obs-Y.sim)	Kuadrat Error (Y.obs-Y.sim) ²	Selisih Deviasi	Kuadrat Deviasi
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,000	0,366	-0,366	0,134	0,000	0,000
2	0,000	0,306	-0,306	0,094	0,000	0,000
3	0,000	0,288	-0,288	0,083	0,000	0,000
4	0,000	0,176	-0,176	0,031	0,000	0,000
5	0,000	0,032	-0,032	0,001	0,000	0,000
6	0,000	0,014	-0,014	0,000	0,000	0,000
7	0,000	0,217	-0,217	0,047	0,000	0,000
8	0,000	0,282	-0,282	0,080	0,000	0,000
9	0,000	0,199	-0,199	0,040	0,000	0,000
10	0,000	0,734	-0,734	0,539	0,000	0,000
11	0,000	0,788	-0,788	0,621	0,000	0,000
12	0,000	0,591	-0,591	0,349	0,000	0,000
13	0,000	0,454	-0,454	0,206	0,000	0,000
14	0,000	0,423	-0,423	0,179	0,000	0,000
15	0,000	0,450	-0,450	0,203	0,000	0,000
16	0,000	0,468	-0,468	0,219	0,000	0,000
17	0,000	0,433	-0,433	0,187	0,000	0,000
18	0,000	0,347	-0,347	0,120	0,000	0,000
19	0,283	0,215	0,068	0,005	0,283	0,080
20	0,000	0,050	-0,050	0,003	0,000	0,000
21	0,000	0,125	-0,125	0,016	0,000	0,000
22	0,000	0,298	-0,298	0,089	0,000	0,000
23	0,000	0,465	-0,465	0,216	0,000	0,000
24	0,000	0,621	-0,621	0,386	0,000	0,000
Rerata	0,283		Total	0,005		0,080

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

$$\text{Rerata data Observasi} = Y_{\text{mean}} = 0,283$$

23

Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) =

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{mean})^2}$$

$$NSE = 1 - \frac{0,005 - 0,080}{0,005 - 0,080}$$

$$NSE = 0,942$$

RMSE- observations Standard deviation Ratio =

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}}{\sqrt{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}}$$

$$RSR = \frac{\sqrt{0,005}}{\sqrt{0,080}}$$

$$RSR = 0,240$$

b. Validasi Kecepatan Aliran 2 Delft3D vs Observasi

Tabel 4.6 Validasi Kecepatan Aliran 2 Delft3D vs Simulasi

Jam ke- (t)	Elevasi Observasi (Y.obs) (m)	Elevasi Simulasi (Y.sim) (m)	Selisih Error (Y.obs-Y.sim)	Kuadrat Error (Y.obs-Y.sim) ²	Selisih Deviasi	Kuadrat Deviasi
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,000	0,401	-0,401	0,161	0,000	0,000
2	0,000	0,340	-0,340	0,116	0,000	0,000
3	0,000	0,320	-0,320	0,102	0,000	0,000
4	0,000	0,200	-0,200	0,040	0,000	0,000
5	0,000	0,037	-0,037	0,001	0,000	0,000
6	0,000	0,019	-0,019	0,000	0,000	0,000
7	0,000	0,156	-0,156	0,024	0,000	0,000
8	0,000	0,382	-0,382	0,146	0,000	0,000
9	0,000	0,224	-0,224	0,050	0,000	0,000
10	0,000	0,757	-0,757	0,573	0,000	0,000
11	0,000	0,815	-0,815	0,664	0,000	0,000
12	0,000	0,630	-0,630	0,397	0,000	0,000

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.6 Validasi Kecepatan Aliran 2 Delft3D vs Simulasi (Lanjutan)

Jam ke- (t)	Elevasi Observasi (Y.obs) (m)	Elevasi Simulasi (Y.sim) (m)	Selisih Error (Y.obs-Y.sim)	Kuadrat Error (Y.obs-Y.sim) ²	Selisih Deviasi	Kuadrat Deviasi
13	0,000	0,495	-0,495	0,245	0,000	0,000
14	0,000	0,458	-0,458	0,209	0,000	0,000
15	0,000	0,484	-0,484	0,234	0,000	0,000
16	0,000	0,495	-0,495	0,245	0,000	0,000
17	0,000	0,459	-0,459	0,210	0,000	0,000
18	0,000	0,369	-0,369	0,136	0,000	0,000
19	0,283	0,239	0,044	0,002	0,283	0,080
20	0,000	0,057	-0,057	0,003	0,000	0,000
21	0,000	0,146	-0,146	0,021	0,000	0,000
22	0,000	0,370	-0,370	0,137	0,000	0,000
23	0,000	0,530	-0,530	0,281	0,000	0,000
24	0,000	0,726	-0,726	0,527	0,000	0,000
Rerata	0,283		Total	0,002		0,080

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Rerata data Observasi $= Y_{mean} = 0,283$

$$Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) =$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{mean})^2}$$

$$NSE = 1 - \frac{0,002 - 0,080}{0,002 - 0,080}$$

$$NSE = 0,976$$

RMSE- observations Standard deviation Ratio =

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}}{\sqrt{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}}$$

$$RSR = \frac{\sqrt{0,002}}{\sqrt{0,080}}$$

$$RSR = 0,156$$

6 4.4. Rekapitulasi Hasil Uji Statistik

Tabel 4.7 Rekapitulasi Hasil Uji Statistik Simulasi vs Observasi

Rekapitulasi Hasil Uji Statistik Kesesuaian Model						
No.	Jenis Model	HEC-RAS		Delft3D		Keterangan
		NSE	RSR	NSE	RSR	
1	Pasang Surut	0,985	0,121	0,902	0,313	<i>Very Good</i>
2	Kecepatan Aliran 1	0,993	0,081	0,865	0,368	<i>Very Good</i>
3	Kecepatan Aliran 2	0,942	0,240	0,976	0,156	<i>Very Good</i>

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan kriteria validasi model yang dikemukakan oleh Moriasi et al. (1983), seluruh hasil simulasi menunjukkan kategori Sangat Baik (*Very Good*). Hal ini ditunjukkan oleh nilai NSE yang berada pada rentang 0,865–0,993 ($> 0,75$) dan nilai RSR sebesar 0,081–0,368 ($< 0,50$). Dengan demikian, model HEC-RAS dan Delft3D mampu merepresentasikan data observasi dengan tingkat akurasi yang sangat baik serta memiliki tingkat kesalahan yang rendah, sehingga hasil simulasi dapat digunakan sebagai dasar analisis hidrodinamika pada penelitian ini.

4.5. Analisis Karakteristik Sedimen

4.5.1. Hasil Uji Gradasi Butiran (*Sieve Analysis*)

Tabel 4.8 Hasil Uji Gradasi Butiran Laboratorium

Diameter (mm)	# Ayakan	Berat yang tertahan		% Tertahan	% Lolos	Jenis Uji
		(gr)	(gr)			
25,40	1"				100,00	<i>Sieve Analysis</i>
19.05	3/4"				100,00	
9.50	3/8"				100,00	
4,76	4	0,00	0,0	0,00	100,00	
2,00	10	165,90	33,9	3,85	96,15	
0,85	20	345,80	213,8	24,27	71,88	
0,43	40	330,10	198.1	22,49	49.39	
0,30	60	254,50	122,5	13,91	35,49	
0,15	100	295,50	163,5	18.56	16,93	
0,08	200	166,30	34,3	3,89	13,03	

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.8. menunjukkan distribusi gradasi butiran sedimen yang didominasi oleh fraksi pasir. Berdasarkan data tersebut, seluruh sampel (100%) lolos pada saringan dengan diameter 25,40 mm hingga 4,76 mm, yang mengindikasikan tidak adanya kandungan kerikil kasar pada sampel ini. Penahanan material secara signifikan mulai terlihat pada saringan nomor 20 (0,85 mm) sebesar 24,27% dan saringan nomor 40 (0,43 mm) sebesar 22,49%. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar butiran memiliki ukuran pasir sedang hingga halus.

Ditinjau dari persentase lolos kumulatif (% *Passing*), nilai yang terus menurun hingga menyisakan 13,03% pada saringan nomor 200 (0,08 mm) menandakan adanya kandungan lanau atau lempung dalam jumlah yang cukup kecil. Distribusi ini memberikan gambaran bahwa sedimen tersebut memiliki variasi ukuran butir yang cukup beragam, namun tetap terkonsentrasi pada rentang pasir.

4.5.2. Hasil Uji Hidrometer (*Hydrometer Analysis*)

Tabel 4.9 Kandungan Sedimen Benda Uji

Lokasi :		Sungai Wonokromo, Wonorejo, Kota Surabaya			
Asal Material		Sungai Wonokromo		Sungai Wonokromo	Sungai Wonokromo
No. Tes		Titik A (0,2D)		Titik B (0,5D)	Titik C (0,8D)
Kandungan Sedimen	Berat Cawan + Air + Sedimen	(Gram)	724.00	735.50	722.00
	Berat Cawan	(Gram)	95.60	95.50	98.60
	Berat Cawan + Sedimen	(Gram)	95.66	95.60	98.69
	Berat Sedimen	(Gram)	0.06	0.10	0.09
	Kandungan Sedimen	(%)	0.000095	0.000156	0.000144

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.10 Hasil Uji Hidrometer

Diameter (mm)	# Ayakan	Berat yang tertahan		% Tertahan	% Lolos	Jenis Uji
		(gr)	(gr)			
0,013					2,33	<i>Hydrometer Analysis</i>
0,010					2,06	
0,007					1,92	
0,005					1,92	
0,003					1,92	
0,000					1,92	

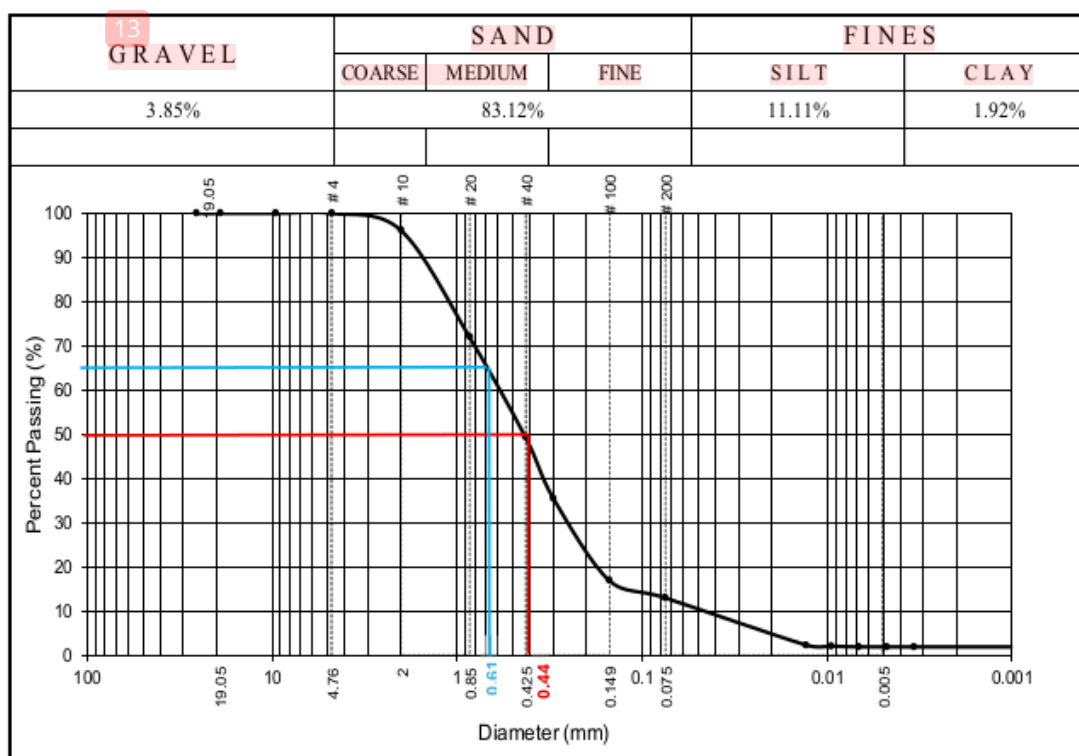
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.9. menunjukkan distribusi butiran sedimen yang sangat halus, yang biasanya tidak dapat terukur melalui metode penyaringan biasa (*sieve analysis*). Uji hidrometer ini dilakukan untuk mengetahui persentase kandungan lanau (*silt*) dan lempung (*clay*) pada sampel sedimen Anda.

Hasil uji hidrometer menunjukkan bahwa sampel sedimen mengandung fraksi butiran yang sangat kecil dengan diameter berkisar antara 0,013 mm hingga kurang dari 0,001 mm. Berdasarkan nilai persentase lolos (% Lolos), terlihat bahwa kandungan partikel halus dalam sampel ini relatif kecil, di mana hanya terdapat 2,33% partikel yang berdiameter 0,013 mm dan terus menurun hingga stabil di angka 1,92% untuk butiran berukuran 0,007 mm ke bawah. Konsistensi angka 1,92% pada diameter yang semakin mengecil menunjukkan bahwa fraksi lempung halus dalam sedimen tersebut memiliki jumlah yang konstan dan sangat sedikit.

4.5.3. Penentuan D50 dan D65 Sedimen

Karena sampel sedimen sering kali terdiri dari campuran pasir kasar hingga lempung halus, data dari uji saringan (untuk partikel kasar) dan uji hidrometer (untuk partikel halus) harus digabungkan menjadi satu kurva distribusi kumulatif.



Gambar 4.23 Data Gabungan Grafik Uji Gradasi Butir & Hidrometer
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.11 Hasil Diameter Butiran Sedimen

No.	Size	Sungai Wonokromo
		(mm)
1	D10	0,05 mm
2	D20	0,14 mm
3	D30	0,25 mm
4	D50	0,44 mm
5	D60	0,59 mm
6	D65	0,61 mm

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.12 Jenis Lapisan

No.	Jenis	Kategori	Presentase
1	Gravel	-	3,85%
2	Sand	Coarse	83,12%
		Medium	
		Fine	
3	Fines	Silt	11,11%
		Clay	1,92%

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan data distribusi ukuran butir yang disajikan, sedimen di Sungai Wonokromo didominasi oleh kategori pasir (*sand*) dengan persentase mencapai 83,12%. Komposisi ini terdiri dari berbagai gradasi, namun secara keseluruhan material tersebut memiliki nilai diameter median D50 sebesar 0,44 mm dan D65 sebesar 0,61 mm. Selain pasir, sampel juga mengandung material halus (*fines*) sebesar 13,03% yang terdiri dari lanau dan lempung, serta sebagian kecil kerikil (*gravel*) sebesar 3,85%.

Keberadaan ukuran butiran yang beragam, mulai dari kerikil hingga lempung, menunjukkan bahwa sedimen ini memiliki gradasi yang baik (*well-graded*). Dalam konteks hidroteknik, dominasi material pasir dengan karakteristik diameter tersebut menjadi acuan utama dalam memilih metode perhitungan transpor sedimen, seperti *Meyer-Peter Müller* (MPM) atau DuBoys, yang memang dikhususkan untuk material non-kohesif.

4.6. Perhitungan Angkutan Sedimen

4.6.1. Angkutan Sedimen Dasar (*Bed Load*)

Tabel 4.13 Data-Data Hidrolika

No.		Keterangan	Data	Satuan
1,	-	Debit Aliran (Q)	36,94	m ³ /s
2,	-	Lebar Sungai (B)	37,5	m
3,	-	Kedalaman (D)	4,95	m
4,	-	Kemiringan Dasar (S)	0,0011	m
5,	-	Ukuran Butiran sedimen (D50)	0,44	mm
6,	-	Berat Jenis Sedimen (γ_s atau ρ_s)	2,65	g/cm ³
7,	-	Berat Jenis Air (γ atau ρ)	1,0	g/cm ³
8.	-	Panjang Segmen Sungai	954	m
9	-	Gravitasi, g	9.81	m/s ²

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

a. Metode *Meyer-Peter* – 1948 (Soemarto, 1987).

$$q_s^{2/3} = 39,5 q^{2/3} S^{9,95} d$$

- Debit dengan satuan lebar sungai (q)

$$q = \frac{Q}{B}$$

$$q = \frac{36,94}{37,5}$$

$$q = 0,985 \text{ m}^2/\text{s}$$

- Mencari ($q^{2/3}$)

$$q^{2/3} = 0,985 \text{ m}^2/\text{s}^{2/3}$$

$$q^{2/3} = 0,990 \text{ m}^2/\text{s}$$

- Perhitungan

$$q_s^{2/3} = 39,5 q^{2/3} S^{9,95} d$$

$$q_s^{2/3} = 39,5 \times 0,990 \times 0,0011 \times 9,95 \times 0,00044$$

$$q_s^{2/3} = 0,0001883$$

$$q_s = 0,0001883^{3/2}$$

$$q_s = 0,000003 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

- Angkutan Sedimen

$$Q_s = q_s \times B$$

$$Q_s = 0,000003 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} \times 37,5 \text{ m}$$

$$Q_s = 0,000003 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} \times 37,5 \text{ m}$$

$$Q_s = 0,0001125 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Laju Angkutan Sedimen total
 $= 0,0001125 \text{ m}^3/\text{s} \times 2650$
 $= 0,2568 \text{ ton}/\text{s}$
 $= 2,219 \text{ ton}/\text{hari}$

b. Metode Duboys – Rouse 1950 (Soemarto, 1987).

$$q_s = \psi \frac{t_0}{\gamma} \left(\frac{t_0 - t_c}{\gamma} \right)$$

- Tegangan geser dasar (*bed shear stress*) (t_0)

$$t_0 = \gamma D S$$

$$t_0 = 9810 \times 4,95 \times 0,0011$$

$$t_0 = 53,42 \text{ N}/\text{m}^2$$

- Tegangan geser kritis (*shear stress*) (t_c)

$$t_c = \frac{t_0}{\gamma (\gamma_s - 1) D}$$

$$t_c = \frac{53,42}{9810 (2,65 - 1) 4,95}$$

$$t_c = \frac{53,42}{80123,175}$$

$$t_c = 0,000666$$

- Nilai Koefisien (ψ)

$$\psi = \frac{\gamma_s}{\gamma} \frac{D}{R_b S}$$

$$\psi = \frac{2,65}{9810} \frac{4,95}{0,00545}$$

$$\psi = 2,65 \times 909,09$$

$$\psi = 240909$$

➤ Perhitungan

$$q_s = \psi \frac{t_0}{\gamma} \left(\frac{t_0 - t_c}{\gamma} \right)$$

$$q_s = 240909 \frac{53,42}{9810} \left(\frac{53,42 - 0,000667}{9810} \right)$$

$$q_s = 6,130 \text{ ton/hari}$$

c. **Metode Shields – Rouse 1950** (Soemarto, 1987).

$$q_b = 10 q_s \left(\frac{t_0 - t_c}{(G_s - 1)^2 D} \right)$$

➤ Debit dengan satuan lebar sungai (q)

$$q = \frac{Q}{B}$$

$$q = \frac{36,94}{37,5}$$

$$q = 0,985 \text{ m}^2/\text{s}$$

➤ Perhitungan

$$q_b = 10 q_s \left(\frac{t_0 - t_c}{(G_s - 1)^2 D} \right)$$

$$q_b = 10 \times 0,985 \times 0,0011 \left(\frac{53,42 - 0,000667}{(2,65 - 1)^2 0,00044} \right)$$

$$q_b = 0,4831 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

➤ Laju Angkutan Sedimen total

$$q_b = 0,4831 \times 2,65 \times 86400$$

$$q_b = 4,147 \text{ ton/hari}$$

4.6.2. Angkutan Sedimen Layang (*Suspended Load*)

- a. Metode *Engelund dan Hansen – 1967* (Olihen Boangmanalu & Indrawan, 2008).

$$q_{sw} = 0,05 \gamma_s v^2 \left[\frac{D_{50}}{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)} \right]^{1/2} \left[\frac{t_0}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} \right]^{3/2}$$

$$q_{sw} = 0,05 \cdot 2,65 \cdot 0,810^2 \left[\frac{0,00044}{16,1865} \right]^{1/2} \left[\frac{0,005445}{0,000726} \right]^{3/2}$$

$$q_{sw} = 0,0870 \cdot 0,00521 \cdot 20,53$$

$$q_{sw} = 0,0870 \cdot 0,00521 \cdot 20,53$$

$$q_{sw} = 0,00932 \times 37,5$$

$$q_{sw} = 1,004 \text{ ton/hari}$$

- b. Metode *Einstein – 1950* (Soemarto, 1987).

$$q_{sw} = 11,6 U' * C_a \alpha \left[\left(2,303 \log \frac{30,2D}{\Delta} \right) I_1 + I_2 \right]$$

$$q_{sw} = 11,6 \cdot 0,2311 \cdot 53459,77 \left[\left(2,303 \log \frac{149,49}{0,0000625} \right) 1 + 1 \right]$$

$$q_{sw} = 1,154 \text{ ton/hari}$$

- c. Metode *Chang simons dan Richardson – 1965* (Diansari, 2014).

$$q_{sw} = \gamma D C_a \left(V \cdot I_1 \cdot \frac{2U_*}{k} I_2 \right)$$

$$q_{sw} = \gamma D C_a \left(V \cdot I_1 \cdot \frac{2U_*}{k} I_2 \right)$$

$$q_{sw} = 264625,3 \cdot 0,9366$$

$$q_{sw} = 1,478 \text{ ton/hari}$$

4.7. Konsentrasi Sedimen Berdasarkan Hasil Observasi, Hasil Simulasi HEC-RAS dan Delft3D

4.7.1. Konsentrasi Sedimen Hasil Observasi

Data lapangan konsentrasi sedimen diambil dari sampel pengambilan data sedimen layang sebelumnya. Data sedimen layang diambil pada koordinat pada Gambar 4.2, sample sedimen layang ada 3 buah yang masing-masing berbeda kedalaman yaitu 0,2D, 0,5D, dan 0,8D.

Tabel 4.14 Data Sample Sedimen Layang

Jenis Data	Data Sample Sedimen Layang		
	Data Sample A (0,2D)	Data Sample B (0,5D)	Data Sample C (0,8D)
Berat Kering Sedimen (gr)	0,06	0,1	0,09
Kapasitas Tabung (ml)	500	500	500
Berat Tabung (kg)	1,5	1,5	1,5
Kecepatan Aliran (m/s)	0,443	0,443	0,443
Luas Penampang (m ²)	168,75	168,75	168,75
Volume Air Botol (gr)	628,34	640,9	623,31

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Untuk mencari besaran konsentrasi sedimen dapat dihitung menggunakan rumus:

$$C = \frac{W_s}{V}$$

Dimana:

C = Konsentrasi sedimen, (mg/L atau g/m³)

W_s = Berat kering sedimen

V = Volume total air sample yang diambil

- Data Sample A (0,2D)

- Berat Sedimen : 0,06 gr : 60 mg
- Volume Air : 628,34 gr : 628,34 ml
- Volume ke Liter : $\frac{628,34}{1000}$: 0,628 L
- Konsentrasi Sedimen (C):

$$C = \frac{60}{0,628}$$

$$C = 95,489 \text{ mg/L}$$

- Data Sample B (0,5D)
 - Berat Sedimen : 0,1 gr : 100 mg
 - Volume Air : 640,9 gr : 640,9 ml
 - Volume ke Liter : $\frac{640,9}{1000}$: 0,640 L
 - Konsentrasi Sedimen (C):

$$C = \frac{100}{0,640}$$

$$C = 156,03 \text{ mg/L}$$

- Data Sample C (0,8D)
 - Berat Sedimen : 0,09 gr : 90 mg
 - Volume Air : 623,31 gr : 623,31 ml
 - Volume ke Liter : $\frac{623,31}{1000}$: 0,623 L
 - Konsentrasi Sedimen (C):

$$C = \frac{100}{0,623}$$

$$C = 144,390 \text{ mg/L}$$

4.7.2. Konsentrasi Sedimen Simulasi HEC-RAS

Data konsentrasi sedimen simulasi HEC-RAS diambil dari titik *reference point* sesuai dengan koordinat pengambilan sedimen layang. Data lapangan sendiri diambil pada pukul 12/10/2025 10,00 WIB pagi, maka dari itu yang dipakai untuk validasi konsentrasi sedimen pada waktu yang sama.

Tabel 4.15 Data Konsentrasi Sedimen Hasil Simulasi HEC-RAS

Jam ke-	Time	HEC-RAS (mg/L)	Jam ke-	Time	HEC-RAS (mg/L)
0	11Oct2025 16:00	0	13	12Oct2025 05:00	172,79
1	11Oct2025 17:00	116,53	14	12Oct2025 06:00	47,3
2	11Oct2025 18:00	38,97	15	12Oct2025 07:00	35,81
3	11Oct2025 19:00	23,17	16	12Oct2025 08:00	41,63
4	11Oct2025 20:00	19,99	17	12Oct2025 09:00	89,4
5	11Oct2025 21:00	6,92	18	12Oct2025 10:00	104,36

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.15 Data Konsentrasi Sedimen Hasil Simulasi HEC-RAS (Lanjutan)

Jam ke-	Time	HEC-RAS (mg/L)	Jam ke-	Time	HEC-RAS (mg/L)
6	11Oct2025 22:00	0	19	12Oct2025 11:00	60,96
7	11Oct2025 23:00	0	20	12Oct2025 12:00	11,62
8	11Oct2025 24:00	0	21	12Oct2025 13:00	0,28
9	12Oct2025 01:00	0	22	12Oct2025 14:00	0
10	12Oct2025 02:00	9.05	23	12Oct2025 15:00	0
11	12Oct2025 03:00	350,93	24	12Oct2025 16:00	0
12	12Oct2025 04:00	356,09			

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

4.7.3. Konsentrasi Sedimen Simulasi Delft3D

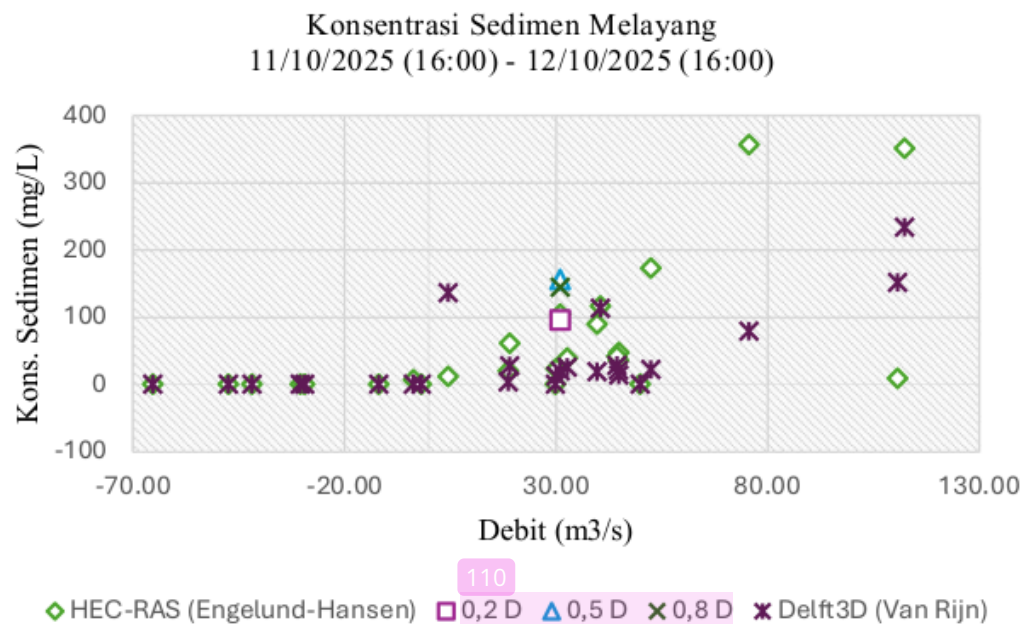
Data konsentrasi sedimen hasil simulasi Delft3D diperoleh dari titik *reference point* yang disesuaikan dengan koordinat lokasi pengambilan sampel sedimen layang. Sementara itu, data lapangan diambil pada tanggal 12/10/2025 pukul 10,00 WIB, sehingga data simulasi yang digunakan untuk proses validasi adalah data pada waktu yang sama.

Tabel 4.16 Data Konsentrasi Sedimen Hasil Simulasi Delft3D

Jam ke-	Time	Delft3D (mg/L)	Jam ke-	Time	Delft3D (mg/L)
0	11Oct2025 16:00	0	13	12Oct2025 05:00	7,91
1	11Oct2025 17:00	0	14	12Oct2025 06:00	0
2	11Oct2025 18:00	0	15	12Oct2025 07:00	15,63
3	11Oct2025 19:00	0	16	12Oct2025 08:00	62,19
4	11Oct2025 20:00	0	17	12Oct2025 09:00	58,61
5	11Oct2025 21:00	0	18	12Oct2025 10:00	54,13
6	11Oct2025 22:00	0	19	12Oct2025 11:00	0
7	11Oct2025 23:00	0	20	12Oct2025 12:00	0
8	11Oct2025 24:00	0	21	12Oct2025 13:00	0
9	12Oct2025 01:00	0	22	12Oct2025 14:00	0
10	12Oct2025 02:00	0	23	12Oct2025 15:00	0
11	12Oct2025 03:00	363,56	24	12Oct2025 16:00	10,27
12	12Oct2025 04:00	0			

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

4.7.4. Validasi Konsentrasi Sedimen



Gambar 4.24 Validasi Konsentrasi Sedimen

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan Gambar 4.24 hubungan debit terhadap konsentrasi sedimen melayang pada periode 11/10/2025 (16,00) – 12/10/2025 (16,00), terlihat bahwa nilai konsentrasi sedimen cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya debit aliran. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar debit sungai, maka kemampuan aliran dalam mengangkut sedimen juga semakin tinggi.

Hasil simulasi menggunakan HEC-RAS dengan metode *Engelund-Hansen* menunjukkan variasi konsentrasi sedimen yang cukup besar pada beberapa debit tertentu, terutama pada debit sekitar 80 m³/s dan 115 m³/s yang menghasilkan konsentrasi sedimen lebih dari 356,09 mg/L. Sementara itu, hasil simulasi Delft3D dengan metode *Van Rijn* umumnya menunjukkan nilai konsentrasi yang lebih rendah dan relatif stabil pada sebagian besar debit, meskipun pada debit tertinggi juga terjadi peningkatan konsentrasi sedimen yang signifikan.

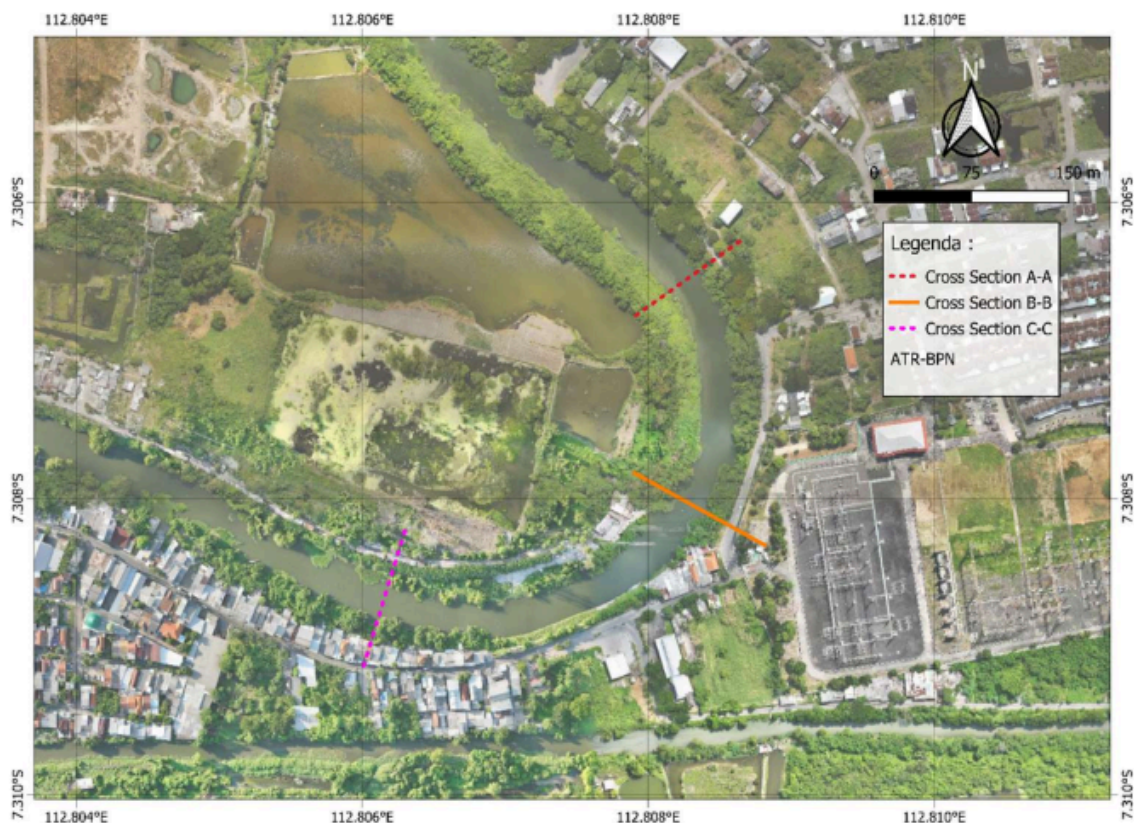
Data lapangan pada titik pengamatan 0,2D, 0,5D, dan 0,8D memperlihatkan pola yang cukup bervariasi. Pada beberapa kondisi debit menengah, nilai konsentrasi sedimen hasil pengukuran lapangan cenderung mendekati hasil simulasi HEC-RAS, terutama pada debit sekitar 30–40 m³/s. Namun demikian, terdapat pula beberapa perbedaan nilai antara hasil simulasi dan data lapangan yang dapat dipengaruhi oleh faktor kondisi aliran, turbulensi,

distribusi sedimen secara vertikal, serta ketidakseragaman karakteristik sedimen di lapangan.

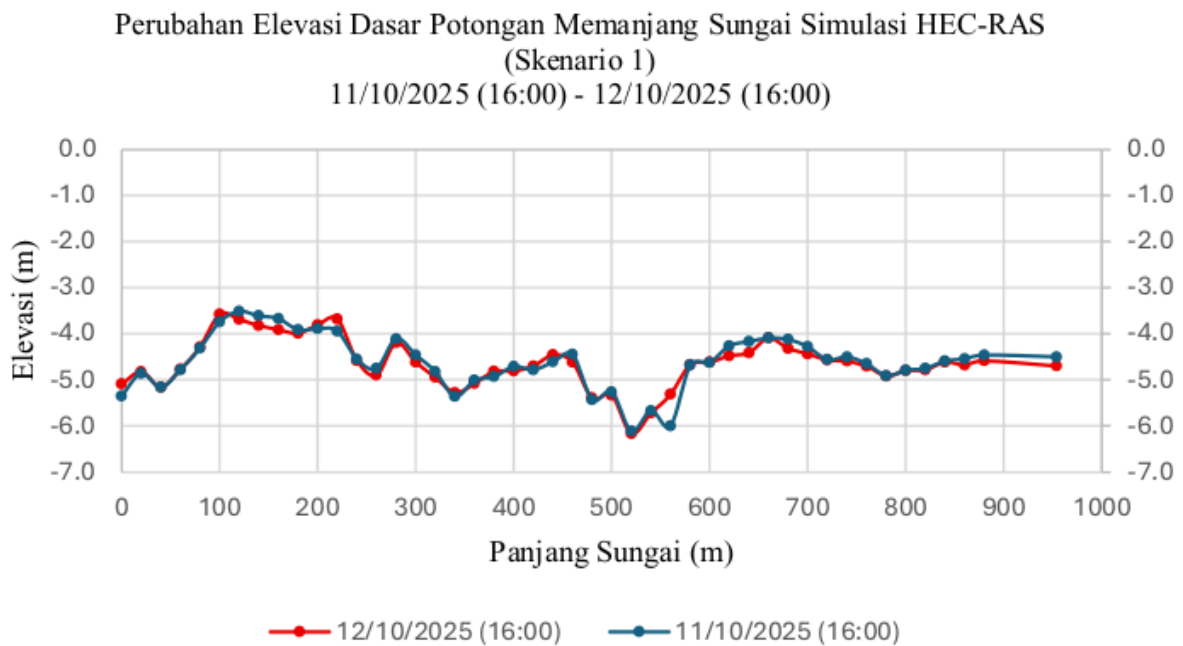
4.8. Pengaruh Transportasi Sedimen Terhadap Perubahan Morfologi yang Terbentuk Dengan Debit Banjir Eksisting (Skenario 1)

4.8.1. Perubahan Morfologi Simulasi HEC-RAS Dengan Debit Banjir Eksisting (Skenario 1)

Perubahan morfologi dasar (*bed level changes*) pada pemodelan simulasi HEC-RAS dilakukan dengan waktu simulasi 24 jam (11/10/2025 16:00 s/d 12/10/2025 16:00). Adapun penampilan *Cross Section A-A*, B-B, dan C-C yang mewakili perubahan morfologi di tikungan sungai wonokromo seperti Gambar 4.25,



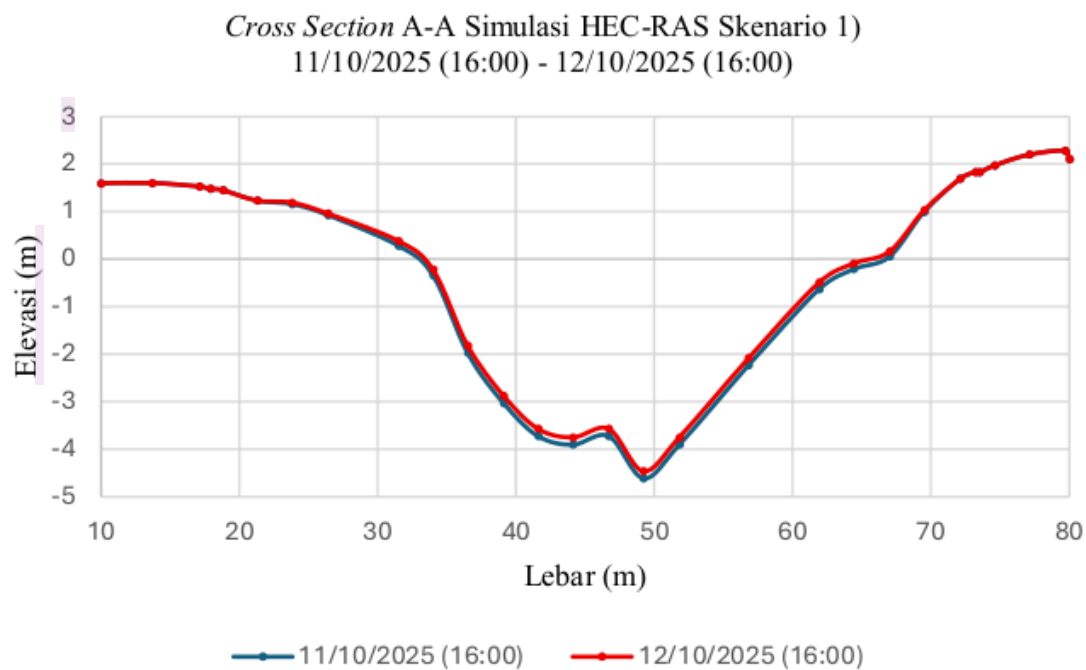
Gambar 4.25 Titik Lokasi *Cross Section*
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)



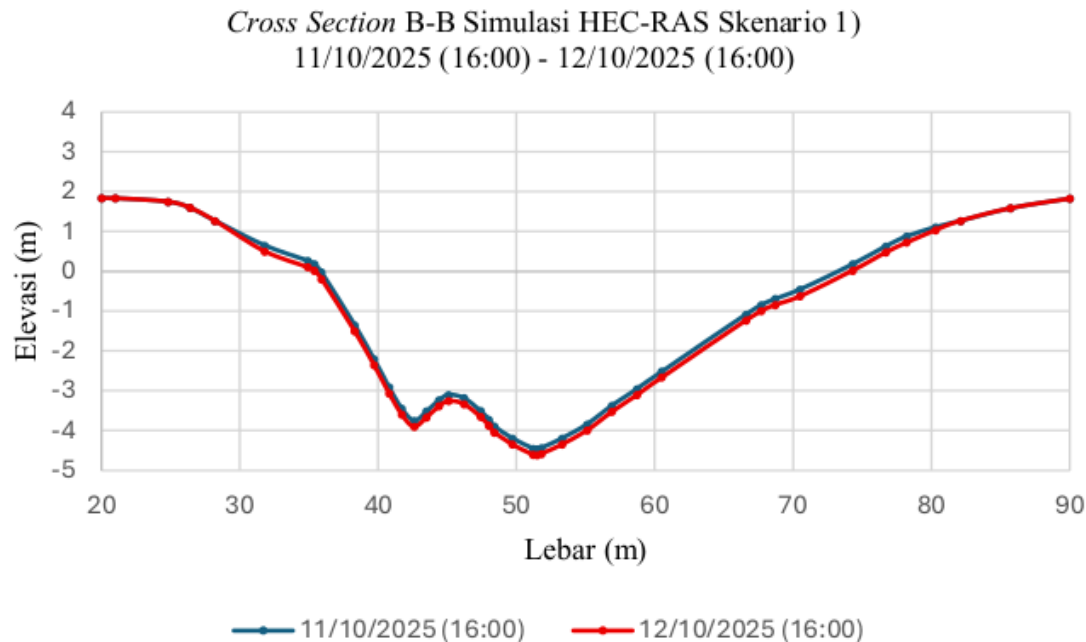
Gambar 4.26 Profil Memanjang Perubahan Elevasi Dasar (*Bed Level Changes*)
Simulasi HEC-RAS (Skenario 1)
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Gambar 4.26, menunjukkan perubahan elevasi dasar sungai (*bed level changes*) di sepanjang 954 m Aliran akibat proses sedimentasi selama periode simulasi 24 jam. Garis biru merepresentasikan elevasi awal (11/10/2025 16,00 WIB), sedangkan garis merah menunjukkan kondisi akhir (12/10/2025 16,00 WIB) setelah terkena dampak perubahan debit banjir. Secara umum, grafik ini memperlihatkan dominasi proses aggradasi atau deposisi, yang ditandai dengan posisi garis biru yang berada di atas garis oranye pada sebagian besar panjang sungai, terutama pada rentang jarak 100–200 meter dan 600–700 meter.

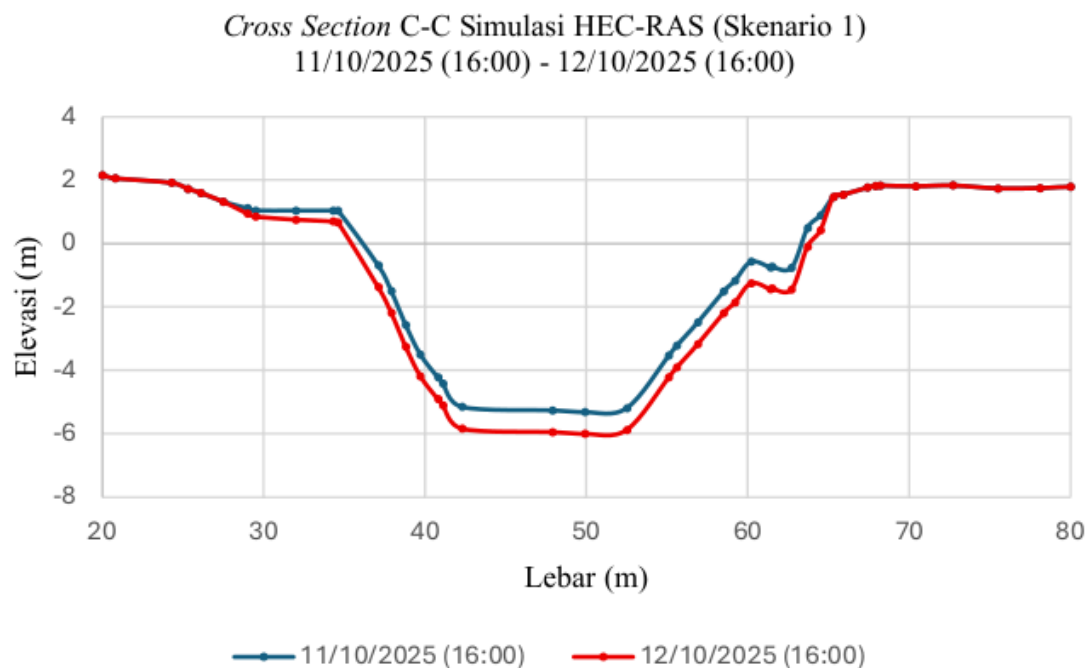
Fenomena pengendapan ini sejalan dengan karakteristik sedimen dasar yang didominasi oleh pasir sebesar 83,12%. Meskipun simulasi awal pada log HEC-RAS sempat menunjukkan indikasi erosi massa total yang besar, grafik profil memanjang ini secara spesifik memberikan gambaran visual bahwa di titik-titik tertentu terjadi kenaikan elevasi dasar sungai yang cukup merata.



Gambar 4.27 *Cross Section A-A Simulasi HEC-RAS (Skenario 1)*
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4.28 *Cross Section B-B Simulasi HEC-RAS (Skenario 1)*
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4.29 *Cross Section C-C Simulasi HEC-RAS (Skenario 1)*
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.17 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS *Cross Section A-A* (Skenario 1)

Ordinate	Jarak Memanjang (m)	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
1	0	1,36	1,36	0	Tetap
2	3,5	1,31	1,31	0	Tetap
3	6,1	1,3701	1,3701	0	Tetap
4	8.5999	1,51	1,51	0	Tetap
5	10	1,5901	1,5901	0	Tetap
6	13,7002	1,5999	1,5999	0	Tetap
7	17,0999	1,5301	1,5301	0	Tetap
8	17,9	1,4801	1,4801	0	Tetap
9	18.8001	1,4499	1,4499	0	Tetap
10	21,3	1,2299	1,2299	0	Tetap
12	23,8	1,1558	1,1899	0,0341	Deposisi
13	26,3999	0,926	0,9601	0,0341	Deposisi

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.17 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS *Cross Section A-A* (Skenario 1) (Lanjutan)

Ordinate	Jarak Memanjang (m)	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
14	31,4999	0,2814	0,3801	0,0987	Deposisi
20	34,0001	-0,3419	-0,2201	0,1218	Deposisi
23	36,5001	-1,9728	-1,82	0,1528	Deposisi
27	39,1	-3,0329	-2,8801	0,1528	Deposisi
30	41,6	-3,7229	-3,5701	0,1528	Deposisi
34	44,1	-3,9028	-3,75	0,1528	Deposisi
37	46,6999	-3,7229	-3,5701	0,1528	Deposisi
41	49,1999	-4,6129	-4,4601	0,1528	Deposisi
44	51,8002	-3,9028	-3,75	0,1528	Deposisi
50	56,8001	-2,2328	-2,08	0,1528	Deposisi
56	61,9	-0,6351	-0,4901	0,145	Deposisi
60	64,4	-0,2118	-0,0899	0,1219	Deposisi
63	66,9999	0,0521	0,16	0,1079	Deposisi
67	69,4999	0,9958	1,0299	0,0341	Deposisi
68	72,1001	1,6901	1,6901	0	Tetap
69	73,1999	1,83	1,83	0	Tetap
70	73,5001	1,83	1,83	0	Tetap
71	74,6001	1,9699	1,9699	0	Tetap
72	77,1001	2,2	2,2	0	Tetap
73	79,7	2,2799	2,2799	0	Tetap
74	80	2,1001	2,1001	0	Tetap
75	81,1999	1,99	1,99	0	Tetap
76	82,2	1,8099	1,8099	0	Tetap
77	87,2999	1,98	1,98	0	Tetap
78	89,7999	1,9401	1,9401	0	Tetap
79	92,4001	1,8599	1,8599	0	Tetap
80	97,4001	1,78	1,78	0	Tetap
81	100	1,7901	1,7901	0	Tetap

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.18 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-
RAS *Cross Section* B-B (Skenario 1)

Ordinate	Jarak Memanjang (m)	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Kerenagan (Erosi / Deposisi)
1	0	2,46	2,46	0	Tetap
2	1,2	2,56	2,56	0	Tetap
3	4,5001	2,76	2,76	0	Tetap
4	5,0999	2,77	2,77	0	Tetap
5	7,9001	2,71	2,71	0	Tetap
6	8.8999	2,6201	2,6201	0	Tetap
7	10,2001	2,4	2,4	0	Tetap
8	11,2999	2,2702	2,2702	0	Tetap
9	14,6999	2,0099	2,0099	0	Tetap
10	16,6	1,9099	1,9099	0	Tetap
11	18.0999	1,8599	1,8599	0	Tetap
12	20	1,8401	1,8401	0	Tetap
13	21,0001	1,8401	1,8401	0	Tetap
14	24,8001	1,7499	1,7499	0	Tetap
16	26,3999	1,5999	1,5999	0	Tetap
17	28.2001	1,2703	1,2701	-0,0002	Erosi
18	31,8001	0,6503	0,4999	-0,1504	Erosi
20	34,8999	0,2709	0,11	-0,1609	Erosi
23	35,4001	0,1852	0,0201	-0,1651	Erosi
24	35,9	-0,0215	-0,1899	-0,1684	Erosi
28	38.2999	-1,3478	-1,4999	-0,1521	Erosi
30	39.6999	-2,1979	-2,35	-0,1521	Erosi
32	40,7999	-2,9078	-3,0599	-0,1521	Erosi
34	41,7	-3,4378	-3,5899	-0,1521	Erosi
36	42,6001	-3,7478	-3,8999	-0,1521	Erosi
38	43,5001	-3,508	-3,66	-0,152	Erosi
40	44,3999	-3,2278	-3,3799	-0,1521	Erosi
42	45,1	-3,098	-3,2501	-0,1521	Erosi
44	46,2001	-3,1779	-3,3299	-0,152	Erosi
46	47,4001	-3,4979	-3,65	-0,1521	Erosi
47	47,9999	-3,718	-3,87	-0,152	Erosi

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.18 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS *Cross Section B-B* (Skenario 1) (Lanjutan)

Ordinate	Jarak Memanjang (m)	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Kerenagan (Erosi / Deposisi)
49	48.4001	-3,888	-4,0401	-0,1521	Erosi
51	49.7001	-4,188	-4,34	-0,152	Erosi
54	51,2	-4,448	-4,6	-0,152	Erosi
55	51,4999	-4,458	-4,6101	-0,1521	Erosi
56	51,8002	-4,4278	-4,5799	-0,1521	Erosi
59	53,3001	-4,188	-4,34	-0,152	Erosi
62	55,0999	-3,838	-3,9901	-0,1521	Erosi
64	56,9001	-3,368	-3,5201	-0,1521	Erosi
67	58.6999	-2,948	-3,1001	-0,1521	Erosi
70	60,5001	-2,5079	-2,66	-0,1521	Erosi
77	66,6	-1,0778	-1,2299	-0,1521	Erosi
79	67,7	-0,8379	-0,99	-0,1521	Erosi
81	68.7001	-0,6879	-0,84	-0,1521	Erosi
84	70,4999	-0,4516	-0,62	-0,1684	Erosi
89	74,2999	0,1852	0,0201	-0,1651	Erosi
92	76,6999	0,6305	0,4801	-0,1504	Erosi
93	78.2001	0,8805	0,73	-0,1505	Erosi
95	80,2999	1,1115	1,04	-0,0715	Erosi
96	82,1	1,2703	1,2701	-0,0002	Erosi
97	85,7	1,5901	1,5901	0	Tetap
98	90	1,83	1,83	0	Tetap
99	92,3001	1,9599	1,9599	0	Tetap
100	92,9	1,9699	1,9699	0	Tetap
101	96,5	1,9099	1,9099	0	Tetap
102	99.0999	1,7901	1,7901	0	Tetap
103	100	1,77	1,77	0	Tetap

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.19 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS
Cross Section C-C (Skenario 1)

Ordinate	Jarak Memanjang (m)	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Kerenagan (Erosi / Deposisi)
1	0	1,7401	1,7401	0	Tetap
2	1,3	1,73	1,73	0	Tetap
3	2,6999	1,7901	1,7901	0	Tetap
4	3,8999	1,8401	1,8401	0	Tetap
5	6,3999	2,0001	2,0001	0	Tetap
6	7,2	2,3399	2,3399	0	Tetap
7	8.4	2,8801	2,8801	0	Tetap
8	9.0001	3,1599	3,1599	0	Tetap
9	11,5001	2,9901	2,9901	0	Tetap
10	13	2,7801	2,7801	0	Tetap
11	14,0001	2,6399	2,6399	0	Tetap
12	16,7	2,0601	2,0601	0	Tetap
13	17,1999	2,08	2,08	0	Tetap
14	18.5001	2,1101	2,1101	0	Tetap
15	20	2,1501	2,1501	0	Tetap
16	20,7999	2,0601	2,0601	0	Tetap
17	24,2999	1,9199	1,9199	0	Tetap
18	25,2999	1,73	1,73	0	Tetap
19	26,1	1,5999	1,5999	0	Tetap
21	27,5	1,3201	1,3201	0	Tetap
22	28.9999	1,1185	0,94	-0,1785	Erosi
23	29.5001	1,0433	0,8501	-0,1932	Erosi
24	32	1,0433	0,7501	-0,2932	Erosi
25	34,3001	1,0433	0,7001	-0,3432	Erosi
26	34,6	1,0433	0,67	-0,3733	Erosi
31	37,1	-0,6839	-1,3701	-0,6862	Erosi
32	37,9001	-1,4938	-2,1799	-0,6861	Erosi
34	38.8001	-2,5639	-3,2501	-0,6862	Erosi
36	39.6999	-3,4939	-4,18	-0,6861	Erosi
38	40,7999	-4,2239	-4,91	-0,6861	Erosi
40	41,1001	-4,4138	-5,0999	-0,6861	Erosi

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

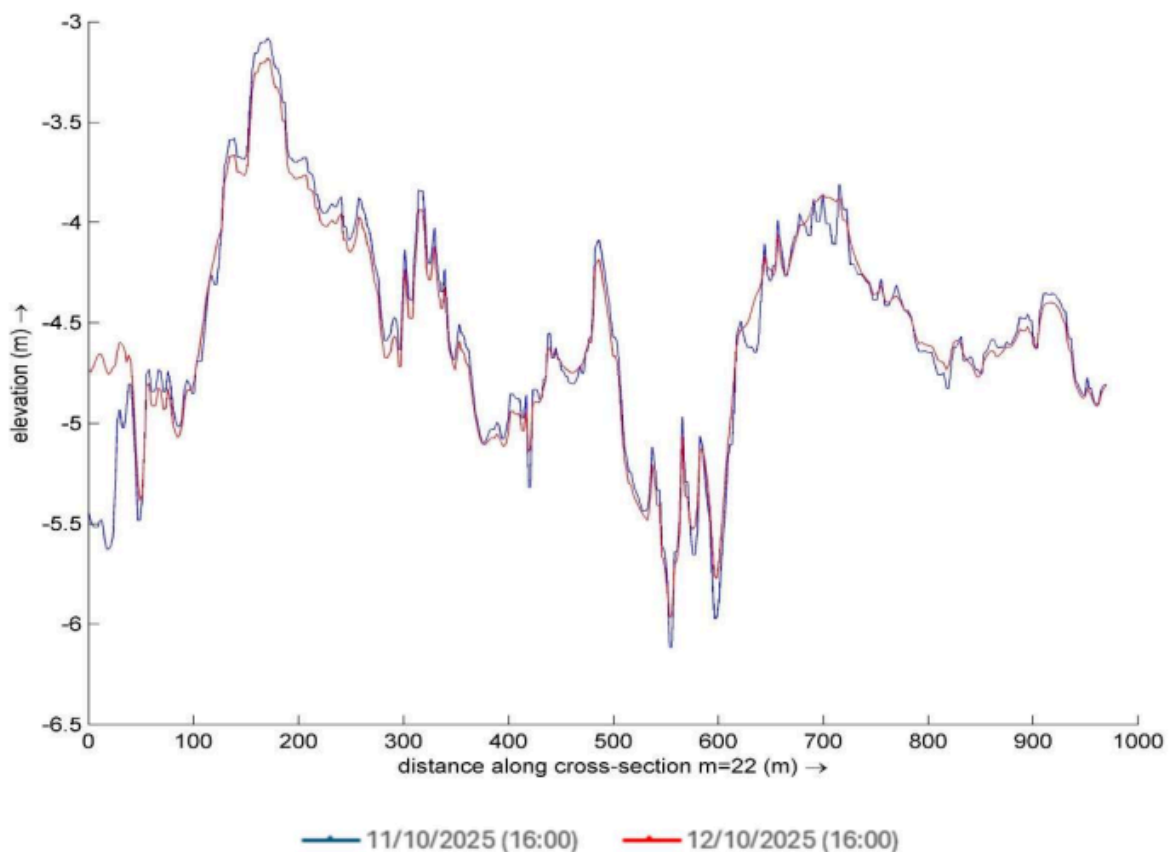
Tabel 4.19 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS
Cross Section C-C (Skenario 1) (Lanjutan)

Ordinate	Jarak Memanjang (m)	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Kerenagan (Erosi / Deposisi)
42	42,3001	-5,1538	-5,84	-0,6862	Erosi
48	47,8999	-5,2639	-5,95	-0,6861	Erosi
51	49,9	-5,3138	-6	-0,6862	Erosi
55	52,5	-5,1938	-5,8799	-0,6861	Erosi
59	55,0999	-3,5338	-4,22	-0,6862	Erosi
60	55,6001	-3,2138	-3,8999	-0,6861	Erosi
62	56,9001	-2,4838	-3,1699	-0,6861	Erosi
65	58,5	-1,5038	-2,19	-0,6862	Erosi
67	59,2001	-1,1737	-1,8599	-0,6862	Erosi
69	60,2001	-0,5693	-1,25	-0,6807	Erosi
71	61,4001	-0,7537	-1,4399	-0,6862	Erosi
72	61,5001	-0,7339	-1,4201	-0,6862	Erosi
74	62,7001	-0,7638	-1,4499	-0,6861	Erosi
77	63,7002	0,4868	-0,1	-0,5868	Erosi
79	64,4999	0,89	0,42	-0,47	Erosi
81	65,3	1,4701	1,4701	0	Tetap
82	65,8999	1,5398	1,5398	0	Tetap
83	67,4001	1,77	1,77	0	Tetap
84	67,9	1,82	1,82	0	Tetap
85	68,1999	1,83	1,83	0	Tetap
86	70,4	1,8099	1,8099	0	Tetap
87	72,7	1,8401	1,8401	0	Tetap
88	75,4999	1,7401	1,7401	0	Tetap
89	78,1001	1,7499	1,7499	0	Tetap
90	80	1,7901	1,7901	0	Tetap
91	86,3002	1,77	1,77	0	Tetap
92	90,8999	1,72	1,72	0	Tetap
93	100	1,57	1,57	0	Tetap

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

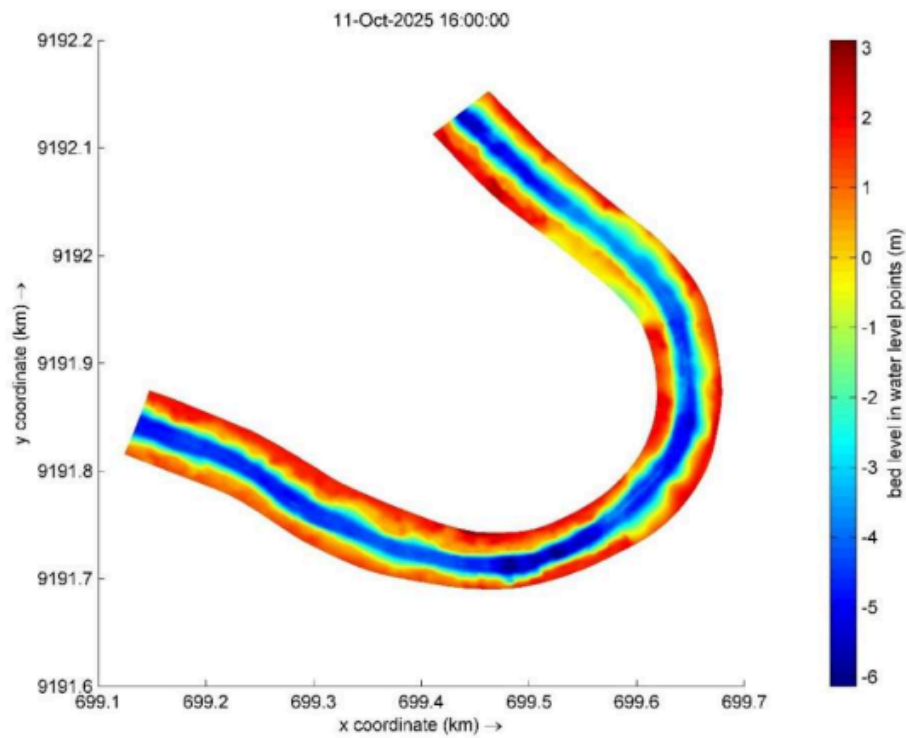
4.8.2. Perubahan Morfologi Simulasi Delft3D Dengan Debit Banjir Eksisting (Skenario 1)

Perubahan morfologi dasar (*bed level changes*) pada pemodelan simulasi Delft3D dilakukan dengan waktu simulasi 24 jam (11/10/2025 16:00 s/d 12/10/2025 16:00). Adapun penampilan *Cross Section A-A, B-B, dan C-C* yang mewakili perubahan morfologi di tikungan sungai wonokromo seperti Gambar 4.22,

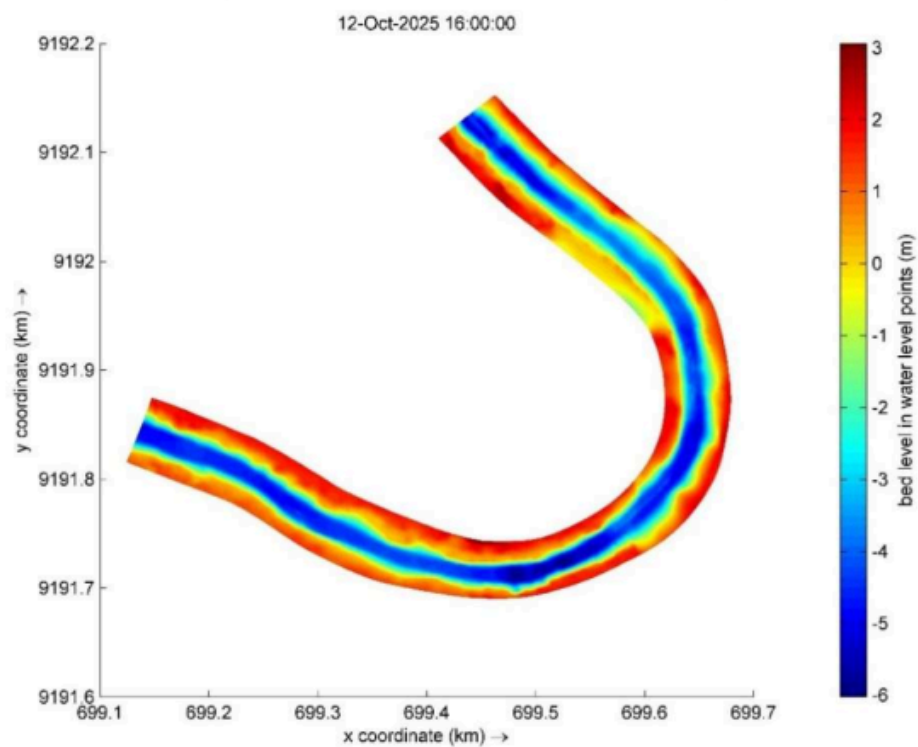


Gambar 4.30 Profil Memanjang Perubahan Elevasi Dasar (*Bed Level Changes*) Simulasi Delft3D (Skenario 1)
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

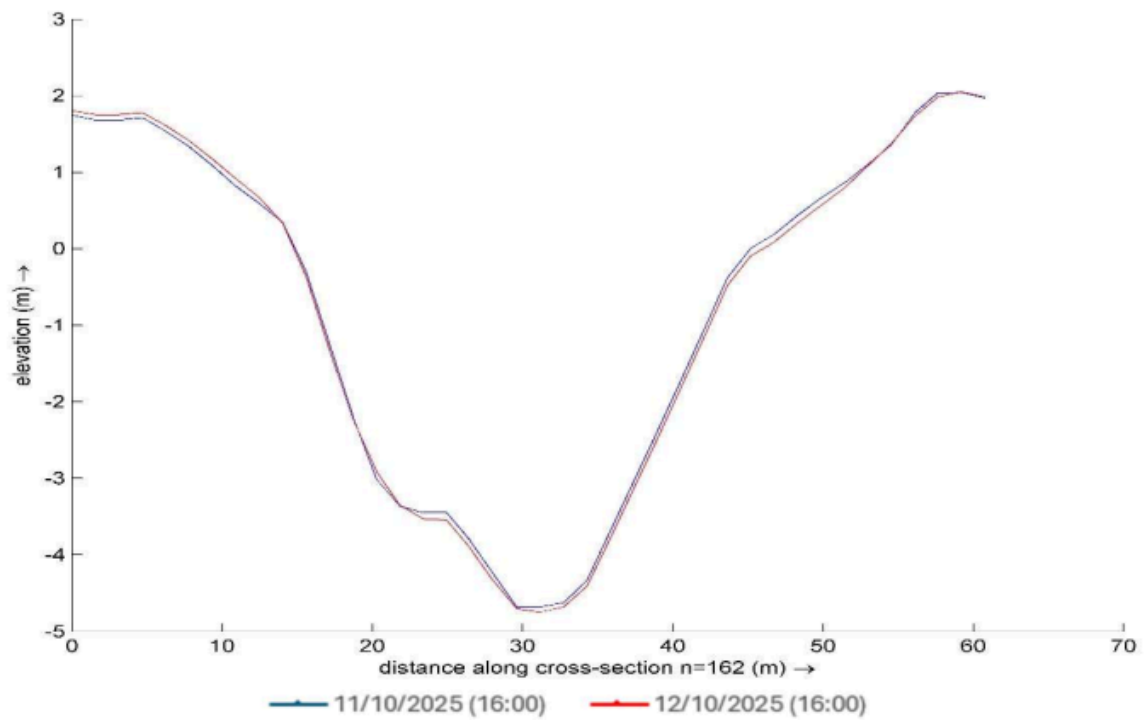
Selain menampilkan penampang profil memanjang, Delft3D juga mampu memvisualkan perubahan pada kondisi awal (11/10/2025 16:00 WIB) dan kondisi akhir (12/10/2025 16:00).



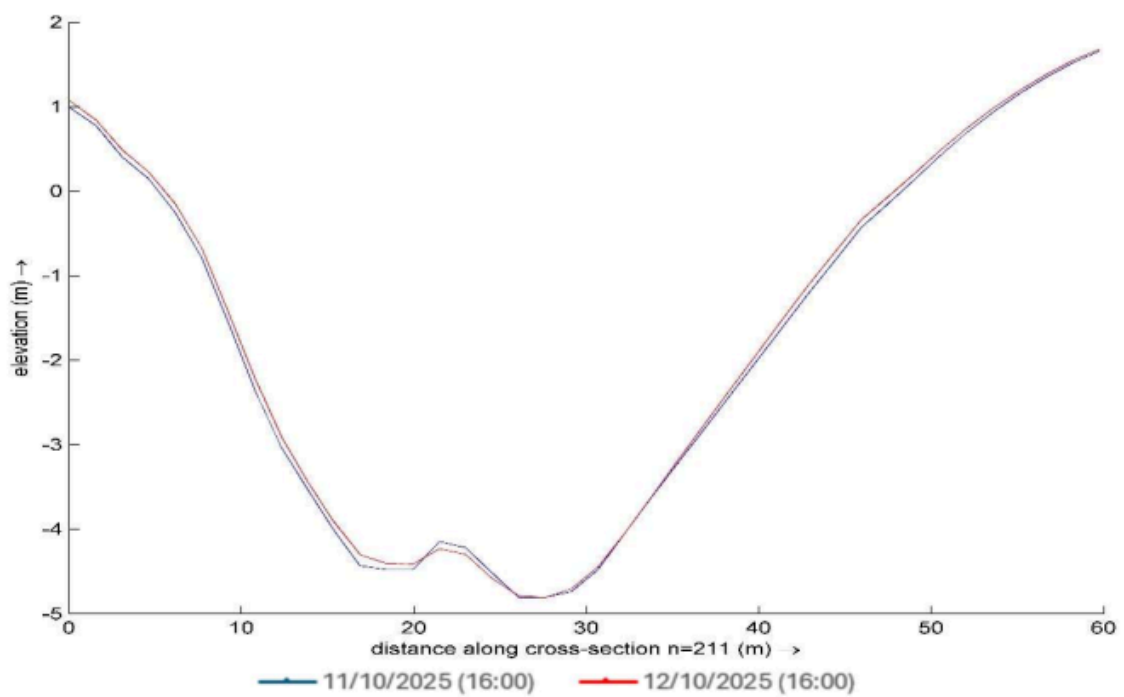
Gambar 4.31 Visualisasi Kondisi Awal Simulasi Delft3D (Skenario 1)
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)



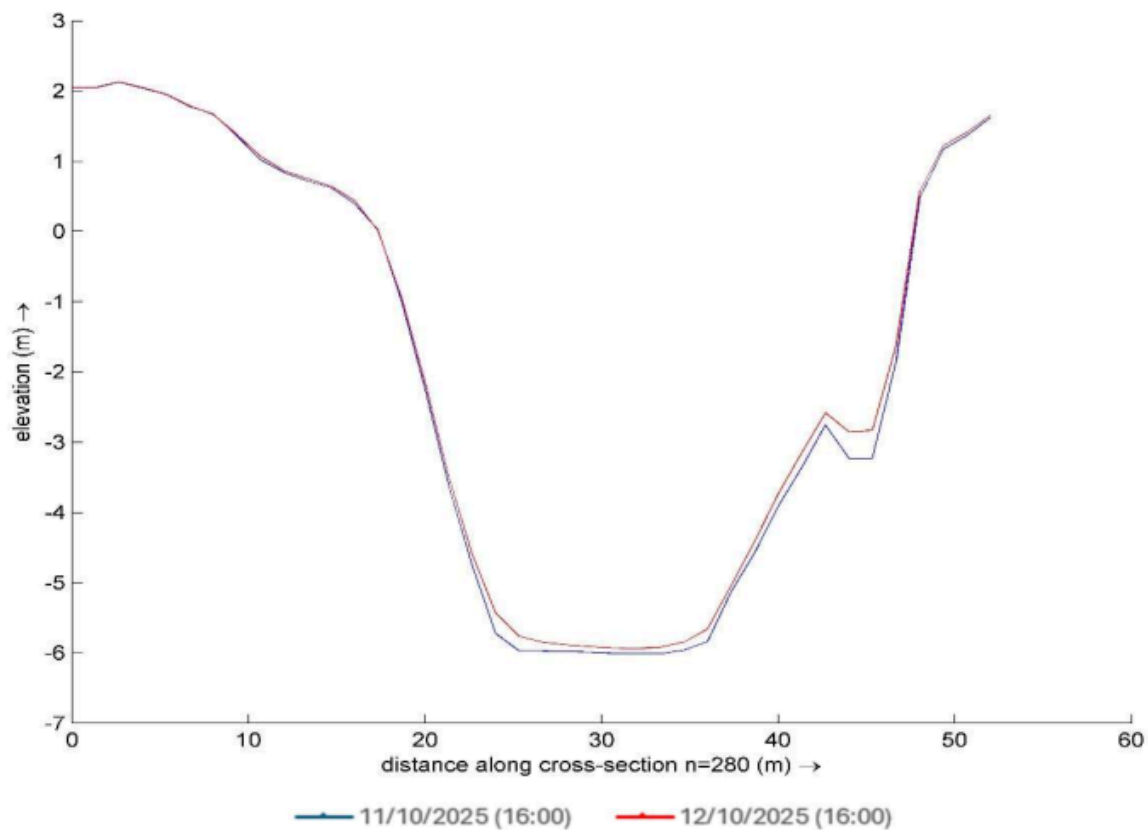
Gambar 4.32 Visualisasi Kondisi Akhir Simulasi Delft3D (Skenario 1)
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4.33 Cross Section A-A Simulasi Delft3D (Skenario 1)
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4.34 Cross Section B-B Simulasi Delft3D (Skenario 1)
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4.35 *Cross Section C-C Simulasi Delft3D (Skenario 1)*
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.20 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi Delft3D
Cross Section A-A (Skenario 1)

x coordinate	y coordinate	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
699679.2631	9191878.064	2,151	2,107	-0,043	Erosi
699677,6756	9191878.027	2,184	2,128	-0,055	Erosi
699676,1189	9191877,995	2,147	2,076	-0,071	Erosi
699674,5612	9191877,963	1,780	1,746	-0,033	Erosi
699673,0027	9191877,931	1,243	1,292	0,049	Deposisi
699671,4439	9191877,9	0,976	0,996	0,020	Deposisi
699669.8849	9191877,868	0,640	0,665	0,025	Deposisi
699668.3258	9191877,837	0,334	0,341	0,008	Deposisi
699666,7667	9191877,806	0,291	0,195	-0,096	Erosi

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.20 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi Delft3D
Cross Section A-A (Skenario 1) (Lanjutan)

x coordinate	y coordinate	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
699665,2077	9191877,775	0,082	-0,016	-0,098	Erosi
699663,6488	9191877,745	-0,145	-0,243	-0,098	Erosi
699662,09	9191877,715	-0,501	-0,599	-0,098	Erosi
699660,5314	9191877,687	-1,010	-1,108	-0,098	Erosi
699658,973	9191877,658	-1,566	-1,665	-0,099	Erosi
699657,4147	9191877,63	-2,153	-2,252	-0,099	Erosi
699655,8569	9191877,603	-2,761	-2,860	-0,099	Erosi
699654,2994	9191877,577	-3,379	-3,478	-0,099	Erosi
699652,7424	9191877,551	-4,019	-4,113	-0,094	Erosi
699651,1857	9191877,526	-4,513	-4,579	-0,066	Erosi
699649,6292	9191877,501	-4,585	-4,655	-0,070	Erosi
699648,073	9191877,477	-4,585	-4,630	-0,045	Erosi
699646,5166	9191877,453	-4,090	-4,188	-0,097	Erosi
699644,96	9191877,43	-3,695	-3,793	-0,098	Erosi
699643,403	9191877,406	-3,459	-3,553	-0,094	Erosi
699641,8455	9191877,384	-3,459	-3,532	-0,073	Erosi
699640,2876	9191877,361	-3,278	-3,333	-0,055	Erosi
699638,7292	9191877,34	-2,836	-2,886	-0,051	Erosi
699637,1707	9191877,318	-2,179	-2,218	-0,039	Erosi
699635,6122	9191877,298	-1,446	-1,451	-0,005	Erosi
699634,0537	9191877,277	-0,546	-0,515	0,030	Deposisi
699632,4953	9191877,258	0,052	0,155	0,104	Deposisi
699630,937	9191877,239	0,406	0,504	0,098	Deposisi
699629,3788	9191877,22	0,614	0,722	0,108	Deposisi
699627,8209	9191877,202	0,808	0,916	0,108	Deposisi
699626,2632	9191877,185	1,011	1,108	0,098	Deposisi
699624,7061	9191877,167	1,170	1,264	0,094	Deposisi
699623,1499	9191877,15	1,310	1,395	0,085	Deposisi
699621,5948	9191877,133	1,369	1,445	0,076	Deposisi
699620,0404	9191877,116	1,424	1,493	0,069	Deposisi
699618,4904	9191877,105	1,503	1,568	0,065	Deposisi

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.21 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi Delft3D
Cross Section B-B (Skenario 1)

x coordinate	y coordinate	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
699679.2631	9191878.064	1,660	1,680	0,020	Deposisi
699677,6756	9191878.027	1,519	1,547	0,028	Deposisi
699676,1189	9191877,995	1,352	1,383	0,032	Deposisi
699674,5612	9191877,963	1,159	1,195	0,036	Deposisi
699673,0027	9191877,931	0,942	0,987	0,045	Deposisi
699671,4439	9191877,9	0,702	0,750	0,049	Deposisi
699669.8849	9191877,868	0,429	0,488	0,060	Deposisi
699668.3258	9191877,837	0,137	0,207	0,070	Deposisi
699666,7667	9191877,806	-0,148	-0,064	0,084	Deposisi
699665,2077	9191877,775	-0,427	-0,336	0,090	Deposisi
699663,6488	9191877,745	-0,821	-0,720	0,101	Deposisi
699662,09	9191877,715	-1,213	-1,112	0,101	Deposisi
699660,5314	9191877,687	-1,618	-1,525	0,093	Deposisi
699658.973	9191877,658	-2,027	-1,944	0,082	Deposisi
699657,4147	9191877,63	-2,430	-2,363	0,067	Deposisi
699655,8569	9191877,603	-2,836	-2,784	0,052	Deposisi
699654,2994	9191877,577	-3,238	-3,209	0,029	Deposisi
699652,7424	9191877,551	-3,642	-3,635	0,007	Deposisi
699651,1857	9191877,526	-4,058	-4,059	-0,001	Erosi
699649.6292	9191877,501	-4,482	-4,449	0,033	Deposisi
699648.073	9191877,477	-4,737	-4,704	0,033	Deposisi
699646,5166	9191877,453	-4,807	-4,809	-0,002	Erosi
699644,96	9191877,43	-4,807	-4,787	0,020	Deposisi
699643,403	9191877,406	-4,520	-4,583	-0,063	Erosi
699641,8455	9191877,384	-4,219	-4,299	-0,080	Erosi
699640,2876	9191877,361	-4,146	-4,232	-0,086	Erosi
699638.7292	9191877,34	-4,479	-4,413	0,066	Deposisi
699637,1707	9191877,318	-4,479	-4,404	0,075	Deposisi
699635,6122	9191877,298	-4,433	-4,301	0,132	Deposisi
699634,0537	9191877,277	-4,005	-3,909	0,096	Deposisi
699632,4953	9191877,258	-3,519	-3,427	0,091	Deposisi

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.21 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi Delft3D
Cross Section B-B (Skenario 1) (Lanjutan)

x coordinate	y coordinate	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
699630,937	9191877,239	-3,020	-2,893	0,127	Deposisi
699629,3788	9191877,22	-2,349	-2,211	0,138	Deposisi
699627,8209	9191877,202	-1,549	-1,421	0,127	Deposisi
699626,2632	9191877,185	-0,786	-0,672	0,114	Deposisi
699624,7061	9191877,167	-0,250	-0,145	0,105	Deposisi
699623,1499	9191877,15	0,148	0,225	0,077	Deposisi
699621,5948	9191877,133	0,403	0,487	0,084	Deposisi
699620,0404	9191877,116	0,777	0,843	0,066	Deposisi
699618,4904	9191877,105	0,996	1,075	0,080	Deposisi

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.22 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi Delft3D
Cross Section C-C (Skenario 1)

x coordinate	y coordinate	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
699679,2631	9191878,064	1,622	1,652	0,031	Deposisi
699677,6756	9191878,027	1,366	1,410	0,044	Deposisi
699676,1189	9191877,995	1,169	1,221	0,052	Deposisi
699674,5612	9191877,963	0,476	0,563	0,087	Deposisi
699673,0027	9191877,931	-1,861	-1,629	0,232	Deposisi
699671,4439	9191877,9	-3,226	-2,832	0,394	Deposisi
699669,8849	9191877,868	-3,226	-2,849	0,377	Deposisi
699668,3258	9191877,837	-2,751	-2,577	0,174	Deposisi
699666,7667	9191877,806	-3,357	-3,141	0,215	Deposisi
699665,2077	9191877,775	-3,906	-3,733	0,173	Deposisi
699663,6488	9191877,745	-4,569	-4,407	0,162	Deposisi
699662,09	9191877,715	-5,126	-5,039	0,087	Deposisi
699660,5314	9191877,687	-5,834	-5,656	0,179	Deposisi
699658,973	9191877,658	-5,958	-5,846	0,112	Deposisi

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

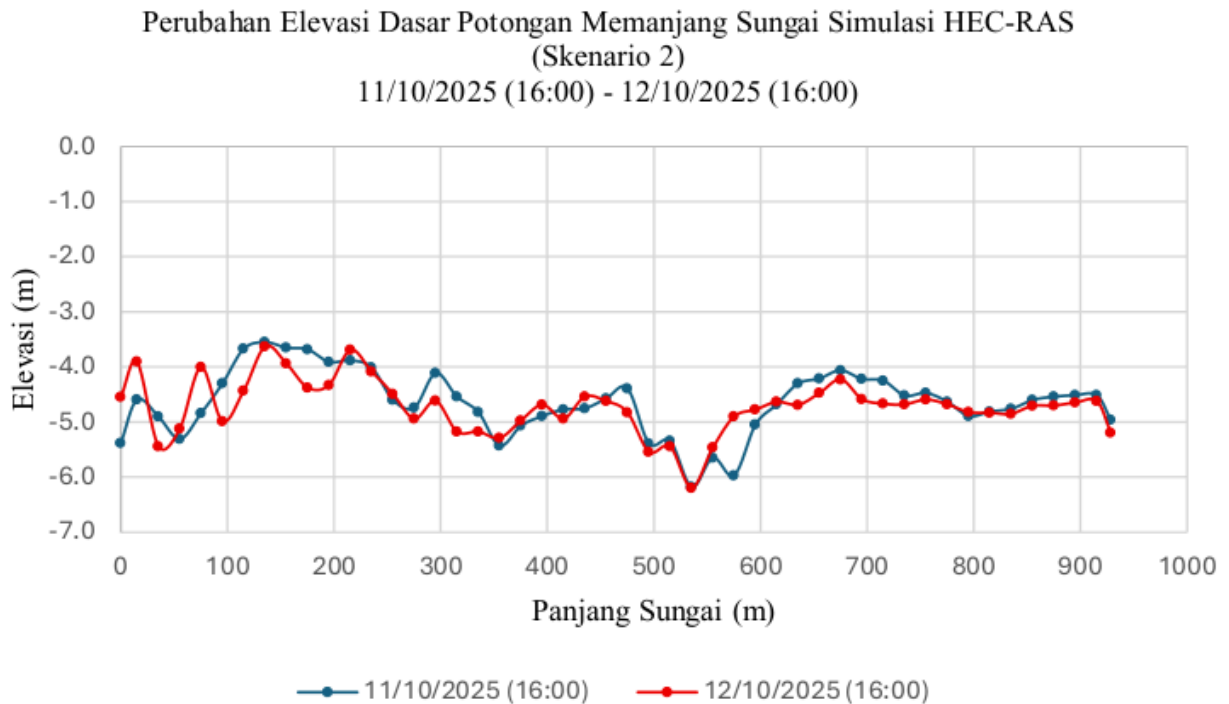
Tabel 4.22 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi Delft3D
Cross Section C-C (Skenario 1) (Lanjutan)

x coordinate	y coordinate	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
699657,4147	9191877,63	-6,010	-5,920	0,090	Deposisi
699655,8569	9191877,603	-6,010	-5,936	0,074	Deposisi
699654,2994	9191877,577	-6,005	-5,929	0,075	Deposisi
699652,7424	9191877,551	-5,987	-5,909	0,078	Deposisi
699651,1857	9191877,526	-5,981	-5,885	0,096	Deposisi
699649,6292	9191877,501	-5,972	-5,847	0,125	Deposisi
699648,073	9191877,477	-5,972	-5,761	0,211	Deposisi
699646,5166	9191877,453	-5,720	-5,428	0,293	Deposisi
699644,96	9191877,43	-4,743	-4,584	0,159	Deposisi
699643,403	9191877,406	-3,612	-3,485	0,127	Deposisi
699641,8455	9191877,384	-2,247	-2,153	0,094	Deposisi
699640,2876	9191877,361	-0,992	-0,941	0,051	Deposisi
699638,7292	9191877,34	0,026	0,010	-0,016	Erosi
699637,1707	9191877,318	0,401	0,444	0,043	Deposisi
699635,6122	9191877,298	0,625	0,645	0,020	Deposisi
699634,0537	9191877,277	0,719	0,756	0,037	Deposisi
699632,4953	9191877,258	0,841	0,867	0,025	Deposisi
699630,937	9191877,239	1,021	1,073	0,051	Deposisi
699629,3788	9191877,22	1,367	1,386	0,019	Deposisi
699627,8209	9191877,202	1,676	1,665	-0,011	Erosi
699626,2632	9191877,185	1,780	1,790	0,010	Deposisi
699624,7061	9191877,167	1,951	1,956	0,004	Deposisi
699623,1499	9191877,15	2,041	2,048	0,007	Deposisi
699621,5948	9191877,133	2,126	2,130	0,004	Deposisi
699620,0404	9191877,116	2,044	2,054	0,011	Deposisi
699618,4904	9191877,105	2,044	2,054	0,011	Deposisi

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

4.9. Pengaruh Transportasi Sedimen Terhadap Perubahan Morfologi yang Terbentuk Dengan Debit Banjir Rencana (Skenario 2)

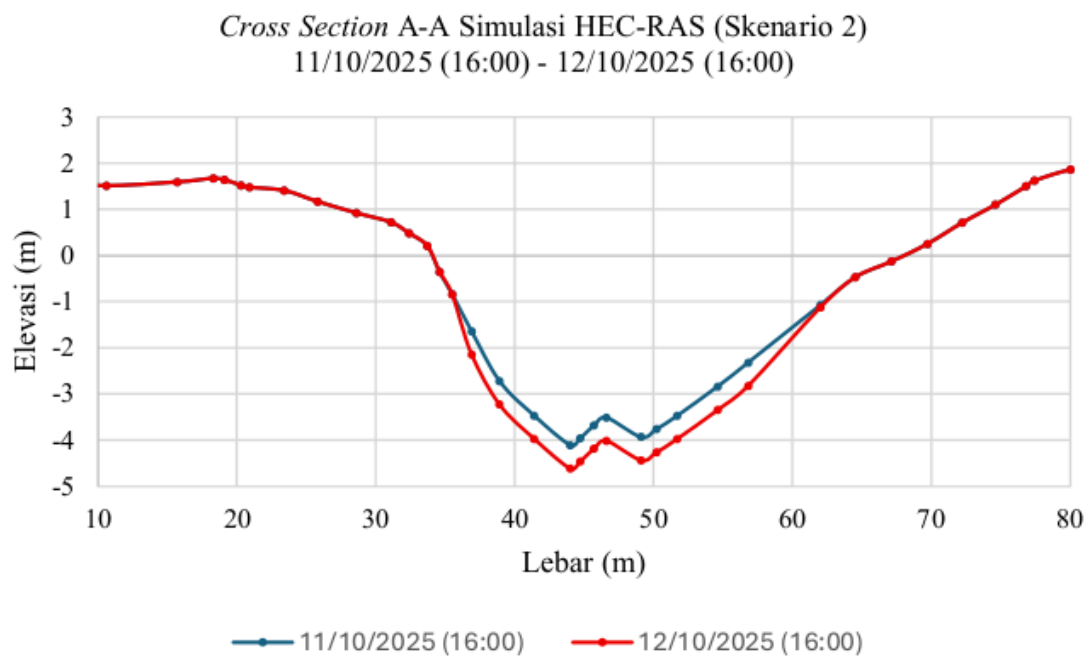
4.9.1. Perubahan Morfologi Simulasi HEC-RAS Dengan Debit Banjir Rencana (Skenario 2)



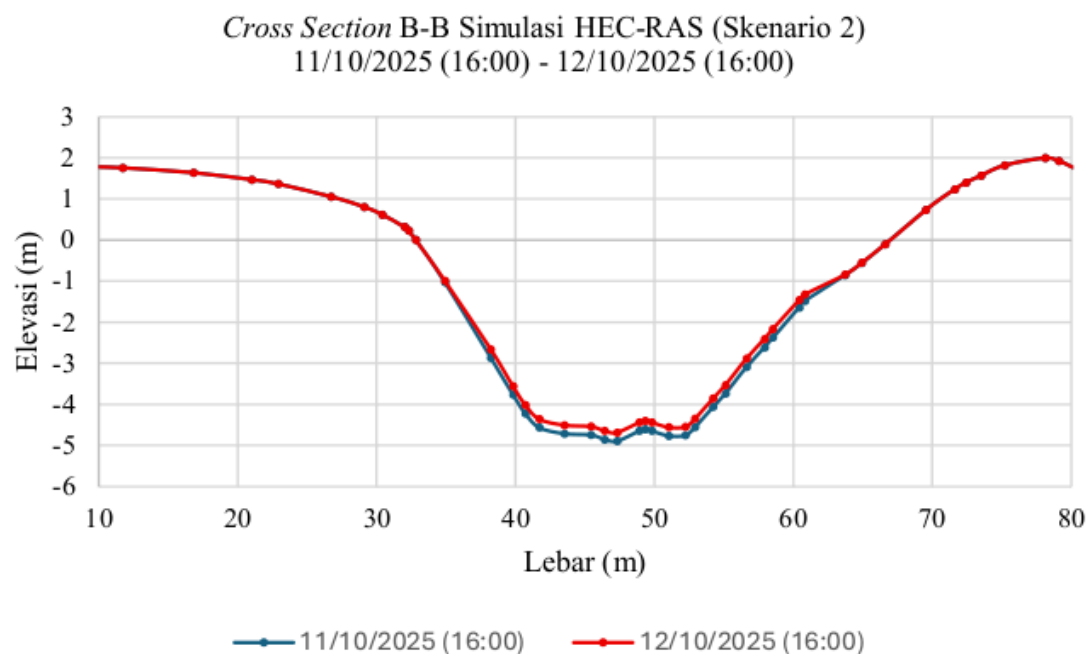
Gambar 4.36 Profil Memanjang Perubahan Elevasi Dasar (*Bed Level Changes*)
Simulasi HEC-RAS (Skenario 1)
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Gambar 4.26, menunjukkan perubahan elevasi dasar sungai (*bed level changes*) di sepanjang 954 m Aliran akibat proses sedimentasi selama periode simulasi 24 jam. Garis biru merepresentasikan elevasi awal (11/10/2025 16,00 WIB), sedangkan garis merah menunjukkan kondisi akhir (12/10/2025 16,00 WIB)

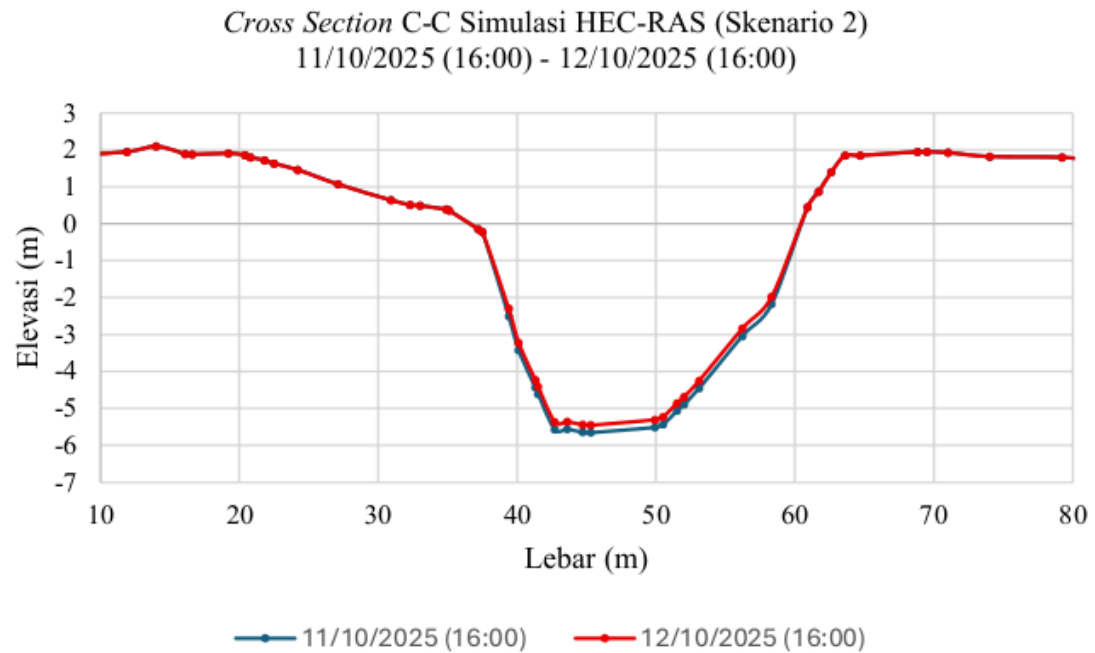
Dari segi perbandingan dengan skenario 1, skenario 2 ini lebih didominasi dengan erosi atau degradasi, Dimana ditandai dengan garis merah (Akhir Simulasi) lebih banyak berada dibawah dibanding dengan garis biru (Awal Simulasi).



Gambar 4.37 *Cross Section A-A Simulasi HEC-RAS (Skenario 2)*
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4.38 *Cross Section B-B Simulasi HEC-RAS (Skenario 2)*
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4.39 *Cross Section C-C Simulasi HEC-RAS (Skenario 2)*
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.23 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS
Cross Section A-A (Skenario 2)

Ordinate	Jarak Memanjang (m)	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
1	0	1,3801	1,3801	0	Tetap
2	0,2999	1,3801	1,3801	0	Tetap
3	1,3	1,2799	1,2799	0	Tetap
4	2,0001	1,2799	1,2799	0	Tetap
5	2,8999	1,2101	1,2101	0	Tetap
6	3,6	1,2899	1,2899	0	Tetap
7	4,9999	1,3701	1,3701	0	Tetap
8	5,5001	1,4201	1,4201	0	Tetap
9	8,0001	1,5499	1,5499	0	Tetap
10	10,6	1,51	1,51	0	Tetap
11	15,6999	1,5901	1,5901	0	Tetap
12	18,2999	1,67	1,67	0	Tetap

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.23 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS
Cross Section A-A (Skenario 2) (Lanjutan)

Ordinate	Jarak Memanjang (m)	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
13	19,1	1,6401	1,6401	0	Tetap
14	20,3	1,52	1,52	0	Tetap
15	20,9001	1,4801	1,4801	0	Tetap
17	23,4001	1,41	1,41	0	Tetap
18	25,8001	1,1701	1,1701	0	Tetap
19	28,6	0,9199	0,9199	0	Tetap
20	31,1	0,7199	0,7199	0	Tetap
21	32,3999	0,4801	0,4801	0	Tetap
22	33,6999	0,21	0,21	0	Tetap
23	34,6	-0,36	-0,36	0	Tetap
24	35,5001	-0,84	-0,8481	-0,0081	Erosi
27	36,9	-1,6401	-2,1441	-0,504	Erosi
30	38,9001	-2,72	-3,224	-0,504	Erosi
34	41,4001	-3,4701	-3,9741	-0,504	Erosi
38	44	-4,1099	-4,6139	-0,504	Erosi
39	44,7001	-3,96	-4,4639	-0,5039	Erosi
41	45,6999	-3,6799	-4,1838	-0,5039	Erosi
43	46,6	-3,5101	-4,014	-0,5039	Erosi
47	49,0999	-3,9301	-4,434	-0,5039	Erosi
49	50,2	-3,76	-4,2639	-0,5039	Erosi
51	51,6999	-3,4701	-3,9741	-0,504	Erosi
55	54,6	-2,8401	-3,3441	-0,504	Erosi
58	56,8001	-2,3201	-2,8241	-0,504	Erosi
65	62	-1,0698	-1,1221	-0,0523	Erosi
66	64,4999	-0,47	-0,47	0	Tetap
67	67,0999	-0,1301	-0,1301	0	Tetap
68	69,7001	0,2499	0,2499	0	Tetap
69	72,2001	0,7099	0,7099	0	Tetap
71	74,6001	1,1	1,1	0	Tetap
72	76,8001	1,4999	1,4999	0	Tetap
73	77,4	1,62	1,62	0	Tetap

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.23 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS
Cross Section A-A (Skenario 2) (Lanjutan)

Ordinate	Jarak Memanjang (m)	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
74	79,9999	1,8599	1,8599	0	Tetap
75	81,1999	1,83	1,83	0	Tetap
76	82,4999	1,78	1,78	0	Tetap
77	90,2001	1,98	1,98	0	Tetap
78	92,8	1,9699	1,9699	0	Tetap
79	95,4	2,08	2,08	0	Tetap
80	97,8999	2,2601	2,2601	0	Tetap
81	100	2,2	2,2	0	Tetap

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.24 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS
Cross Section B-B (Skenario 2)

Ordinate	Jarak Memanjang (m)	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00)	Selisih	Keterangan (Erosi / Deposisi)
1	0	1,7099	1,7099	0	Tetap
2	0,2999	1,73	1,73	0	Tetap
3	0,7001	1,7099	1,7099	0	Tetap
4	2,3	1,72	1,72	0	Tetap
5	3,2001	1,7401	1,7401	0	Tetap
6	4,2001	1,7901	1,7901	0	Tetap
7	7,9001	1,7901	1,7901	0	Tetap
8	11,7001	1,7599	1,7599	0	Tetap
9	16,8	1,6401	1,6401	0	Tetap
10	21,0001	1,4701	1,4701	0	Tetap
12	22,8999	1,3701	1,3701	0	Tetap
13	26,6999	1,0601	1,0601	0	Tetap
14	29,0999	0,8099	0,8099	0	Tetap
15	30,4001	0,62	0,62	0	Tetap
16	32	0,32	0,32	0	Tetap

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.24 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS
Cross Section B-B (Skenario 2) (Lanjutan)

Ordinate	Jarak Memanjang (m)	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00)	Selisih	Keterangan (Erosi / Deposisi)
17	32,3	0,2301	0,2301	0	Tetap
18	32,8001	0,0101	0,0101	0	Tetap
19	34,8999	-1,0199	-0,9865	0,0334	Deposisi
25	38,2	-2,8599	-2,653	0,2069	Deposisi
27	39,7999	-3,76	-3,553	0,207	Deposisi
29	40,6999	-4,22	-4,013	0,207	Deposisi
31	41,7	-4,5601	-4,3531	0,207	Deposisi
34	43,5001	-4,7101	-4,5031	0,207	Deposisi
37	45,4	-4,7399	-4,533	0,2069	Deposisi
39	46,4	-4,85	-4,643	0,207	Deposisi
41	47,3001	-4,8899	-4,6829	0,207	Deposisi
43	48,9	-4,64	-4,433	0,207	Deposisi
45	49,2999	-4,6	-4,3931	0,2069	Deposisi
46	49,8001	-4,64	-4,433	0,207	Deposisi
49	51	-4,7601	-4,5531	0,207	Deposisi
51	52,2	-4,75	-4,543	0,207	Deposisi
52	52,8999	-4,5501	-4,3431	0,207	Deposisi
55	54,2001	-4,0599	-3,853	0,2069	Deposisi
57	55,0999	-3,7301	-3,5232	0,2069	Deposisi
59	56,6001	-3,0901	-2,8831	0,207	Deposisi
61	57,9001	-2,61	-2,403	0,207	Deposisi
63	58,5	-2,3701	-2,1632	0,2069	Deposisi
66	60,4001	-1,6401	-1,4563	0,1838	Deposisi
68	60,8	-1,4801	-1,3239	0,1562	Deposisi
70	63,7002	-0,8501	-0,8372	0,0129	Deposisi
71	64,9001	-0,5599	-0,5517	0,0082	Deposisi
72	66,6	-0,1	-0,1	0	Tetap
73	69,4999	0,73	0,73	0	Tetap
74	71,6	1,2399	1,2399	0	Tetap
76	72,4001	1,3999	1,3999	0	Tetap
77	73,5001	1,57	1,57	0	Tetap

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.24 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS
Cross Section B-B (Skenario 2) (Lanjutan)

Ordinate	Jarak Memanjang (m)	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00)	Selisih	Keterangan (Erosi / Deposisi)
78	75,2	1,82	1,82	0	Tetap
79	78.1001	2,0001	2,0001	0	Tetap
80	79.0999	1,93	1,93	0	Tetap
81	81	1,6599	1,6599	0	Tetap
82	82,9001	1,6801	1,6801	0	Tetap
83	84,7	1,7499	1,7499	0	Tetap
84	86,6001	1,78	1,78	0	Tetap
85	87,2999	1,9099	1,9099	0	Tetap
86	88.4999	2,1799	2,1799	0	Tetap
87	89.5999	2,2799	2,2799	0	Tetap
88	95,4	2,3201	2,3201	0	Tetap
89	100	2,25	2,25	0	Tetap

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.25 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS
Cross Section C-C (Skenario 2)

Ordinate	Jarak Memanjang (m)	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
1	0	1,9501	1,9501	0	Tetap
2	1	1,8901	1,8901	0	Tetap
3	3,5	1,8001	1,8001	0	Tetap
4	5,6001	1,8099	1,8099	0	Tetap
5	11,9	1,9501	1,9501	0	Tetap
6	14,0001	2,1001	2,1001	0	Tetap
7	16,1001	1,8901	1,8901	0	Tetap
8	16,6	1,88	1,88	0	Tetap
9	19,2	1,9099	1,9099	0	Tetap
10	20,4	1,8599	1,8599	0	Tetap
11	20,7999	1,8001	1,8001	0	Tetap

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.25 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS
Cross Section C-C (Skenario 2) (Lanjutan)

Ordinate	Jarak Memanjang (m)	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
12	21,7999	1,72	1,72	0	Tetap
13	22,5	1,6301	1,6301	0	Tetap
14	24,1999	1,46	1,46	0	Tetap
16	27,1001	1,0698	1,0698	0	Tetap
17	30,9	0,6401	0,6401	0	Tetap
18	32,3	0,5099	0,5099	0	Tetap
19	33,0001	0,4901	0,4901	0	Tetap
20	34,8999	0,3901	0,3901	0	Tetap
21	35,0999	0,36	0,36	0	Tetap
22	37,1999	-0,15	-0,15	0	Tetap
23	37,4998	-0,2201	-0,2201	0	Tetap
27	39,4	-2,5	-2,2984	0,2016	Deposisi
29	40,1001	-3,4199	-3,2183	0,2016	Deposisi
31	41,3001	-4,43	-4,2284	0,2016	Deposisi
32	41,5	-4,6101	-4,4085	0,2016	Deposisi
34	42,7	-5,5699	-5,3684	0,2015	Deposisi
36	43,6001	-5,5599	-5,3583	0,2016	Deposisi
38	44,7001	-5,64	-5,4385	0,2015	Deposisi
40	45,3	-5,6501	-5,4485	0,2016	Deposisi
45	49,9	-5,5099	-5,3083	0,2016	Deposisi
47	50,4999	-5,43	-5,2285	0,2015	Deposisi
49	51,4999	-5,06	-4,8584	0,2016	Deposisi
51	52,0001	-4,8899	-4,6884	0,2015	Deposisi
53	53,1001	-4,4501	-4,2485	0,2016	Deposisi
57	56,1999	-3,0401	-2,8385	0,2016	Deposisi
60	58,3	-2,1799	-1,9784	0,2015	Deposisi
64	60,9	0,4499	0,4499	0	Tetap
66	61,7001	0,8699	0,8699	0	Tetap
67	62,6001	1,3999	1,3999	0	Tetap
68	63,5999	1,8501	1,8501	0	Tetap
69	64,6999	1,8501	1,8501	0	Tetap

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

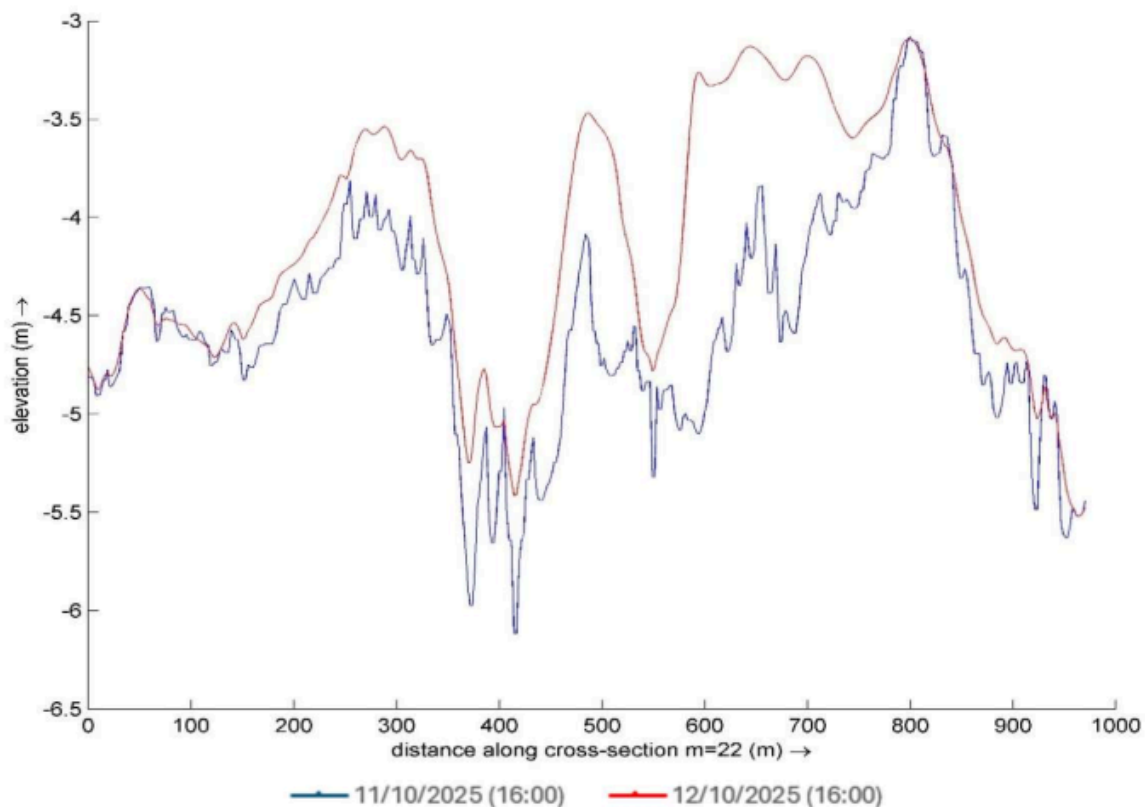
Tabel 4.25 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi HEC-RAS
Cross Section C-C (Skenario 2) (Lanjutan)

Ordinate	Jarak Memanjang (m)	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
70	68.8001	1,9501	1,9501	0	Tetap
71	69.4999	1,9501	1,9501	0	Tetap
72	71,0001	1,93	1,93	0	Tetap
73	74	1,82	1,82	0	Tetap
74	79.1998	1,8001	1,8001	0	Tetap
75	81,8001	1,72	1,72	0	Tetap
76	89.5999	1,6901	1,6901	0	Tetap
77	92,1999	1,5499	1,5499	0	Tetap
78	94,2	1,5499	1,5499	0	Tetap
79	94,8001	1,5398	1,5398	0	Tetap
80	96,3	1,5301	1,5301	0	Tetap
81	97,4001	1,5301	1,5301	0	Tetap
82	98.4001	1,5901	1,5901	0	Tetap
83	100	1,7099	1,7099	0	Tetap

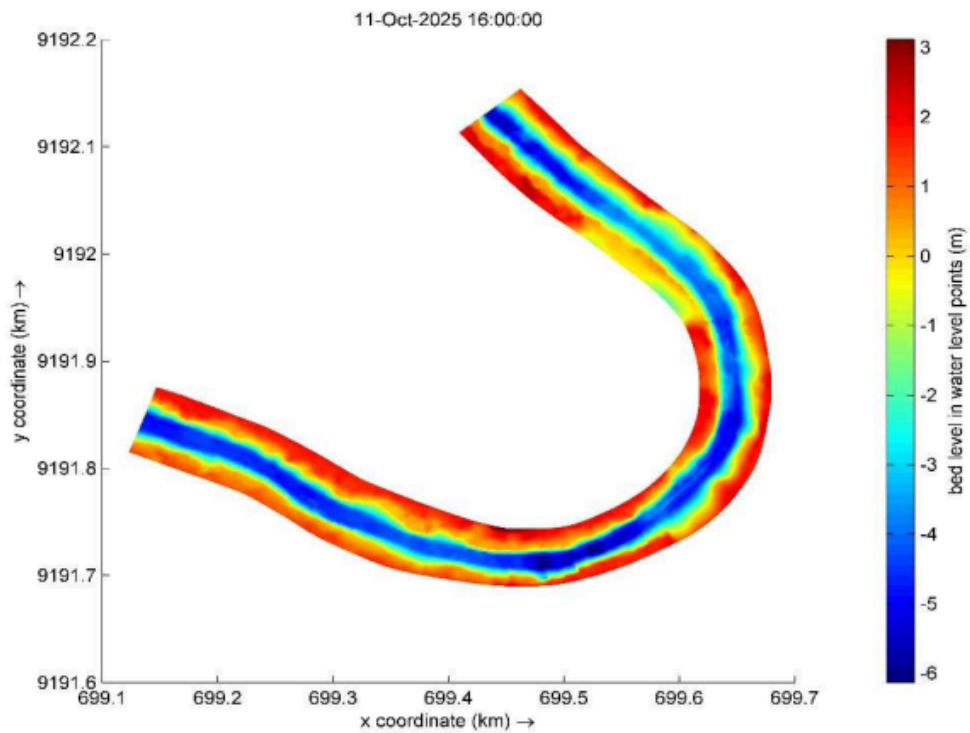
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

4.9.2. Perubahan Morfologi Simulasi Delft3D Dengan Debit Banjir Rencana (Skenario 2)

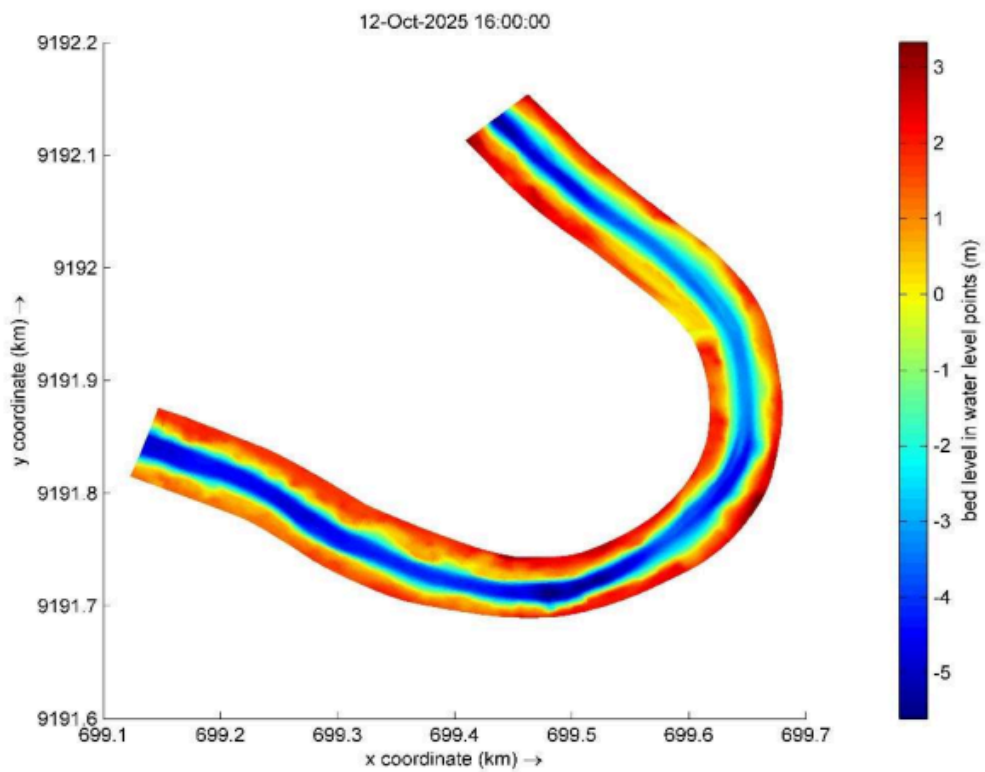
Perubahan morfologi dasar (*bed level changes*) pada pemodelan simulasi Delft3D dilakukan dengan waktu simulasi 24 jam (11/10/2025 16:00 s/d 12/10/2025 16:00). Adapun penampilan *Cross Section A-A*, *B-B*, dan *C-C* yang mewakili perubahan morfologi di tikungan sungai wonokromo seperti Gambar 4.22.



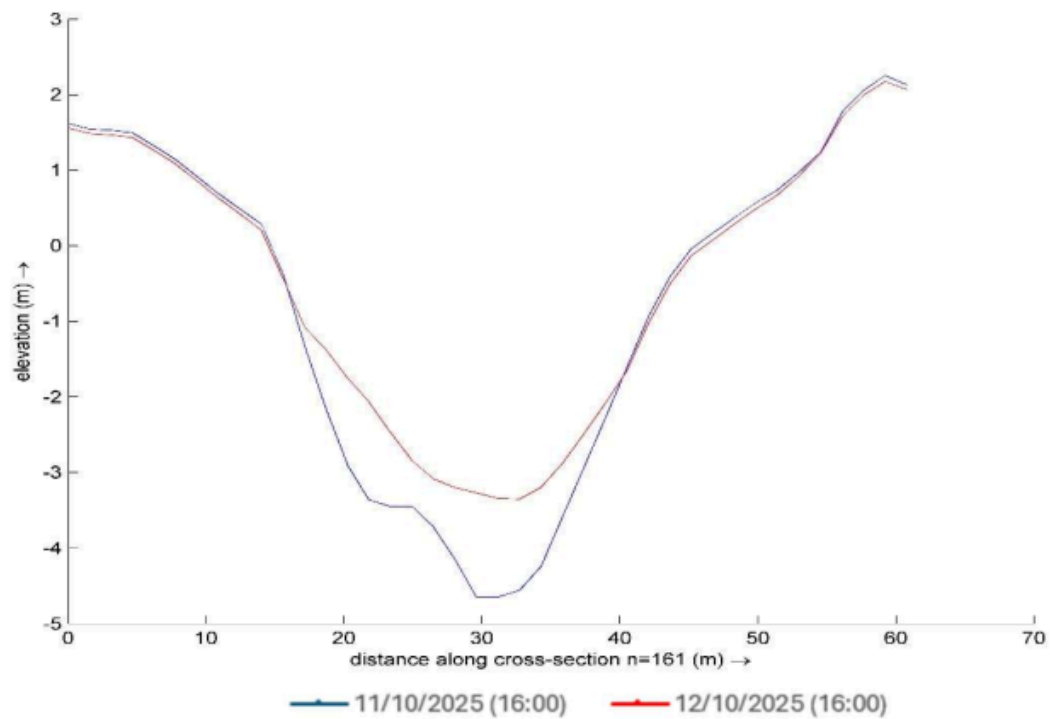
Gambar 4.40 Profil Memanjang Perubahan Elevasi Dasar (*Bed Level Changes*)
Simulasi Delft3D (Skenario 2)
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)



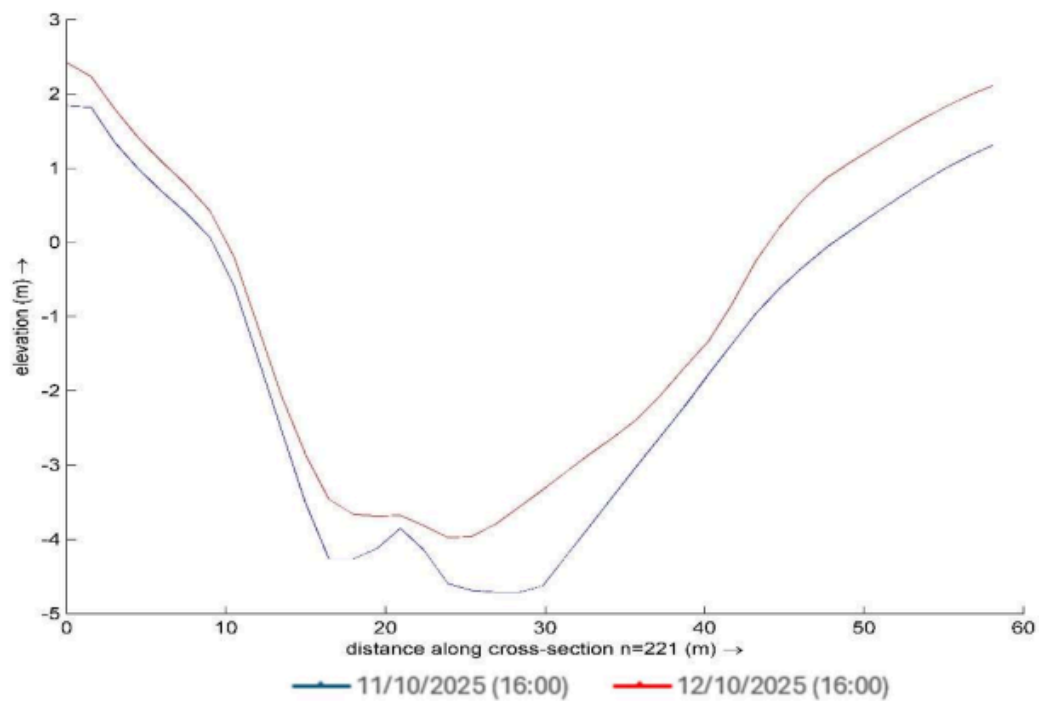
Gambar 4.41 Visualisasi Kondisi Awal Simulasi Delft3D (Skenario 1)
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)



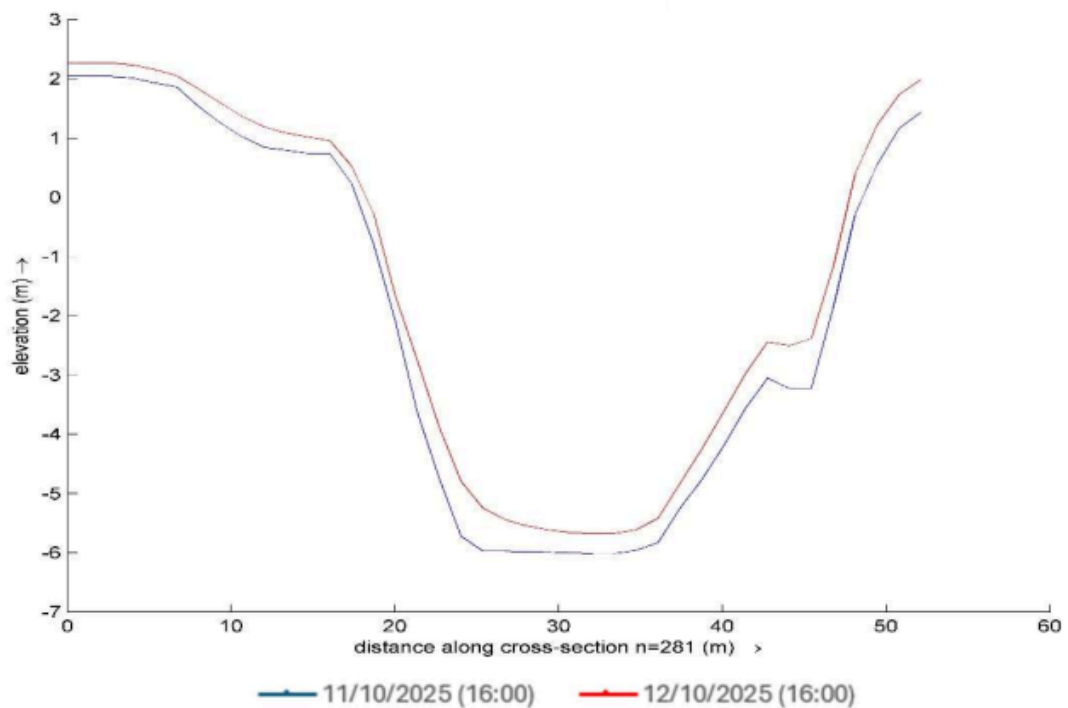
Gambar 4.42 Visualisasi Kondisi Akhir Simulasi Delft3D (Skenario 2)
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4.43 Cross Section A-A Simulasi Delft3D (Skenario 2)
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4.44 Cross Section B-B Simulasi Delft3D (Skenario 2)
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4.45 Cross Section C-C Simulasi Delft3D (Skenario 2)
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.26 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi
Delft3D Cross Section A-A (Skenario 2)

x coordinate	y coordinate	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
699679,3	9191878	2,071	2,134	0,063	Deposisi
699677,7	9191878	2,174	2,254	0,081	Deposisi
699676,1	9191878	1,999	2,059	0,060	Deposisi
699674,6	9191878	1,715	1,776	0,060	Deposisi
699673	9191878	1,231	1,243	0,012	Deposisi
699671,4	9191878	0,926	0,976	0,051	Deposisi
699669,9	9191878	0,676	0,742	0,065	Deposisi
699668,3	9191878	0,493	0,572	0,079	Deposisi
699666,8	9191878	0,292	0,376	0,084	Deposisi
699665,2	9191878	0,080	0,171	0,091	Deposisi
699663,6	9191878	-0,126	-0,033	0,092	Deposisi

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.26 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi
Delft3D Cross Section A-A (Skenario 2) (Lanjutan)

x coordinate	y coordinate	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
699662,1	9191878	-0,502	-0,406	0,096	Deposisi
699660,5	9191878	-1,020	-0,932	0,087	Deposisi
699659	9191878	-1,649	-1,603	0,046	Deposisi
699657,4	9191878	-2,080	-2,270	-0,190	Erosi
699655,9	9191878	-2,484	-2,927	-0,443	Erosi
699654,3	9191878	-2,876	-3,583	-0,707	Erosi
699652,7	9191878	-3,194	-4,239	-1,045	Erosi
699651,2	9191878	-3,352	-4,559	-1,207	Erosi
699649,6	9191878	-3,342	-4,648	-1,306	Erosi
699648,1	9191877	-3,270	-4,648	-1,378	Erosi
699646,5	9191877	-3,200	-4,147	-0,947	Erosi
699645	9191877	-3,082	-3,720	-0,637	Erosi
699643,4	9191877	-2,843	-3,449	-0,606	Erosi
699641,8	9191877	-2,470	-3,449	-0,978	Erosi
699640,3	9191877	-2,063	-3,361	-1,297	Erosi
699638,7	9191877	-1,749	-2,898	-1,150	Erosi
699637,2	9191877	-1,376	-2,162	-0,787	Erosi
699635,6	9191877	-1,072	-1,324	-0,252	Erosi
699634,1	9191877	-0,427	-0,373	0,053	Deposisi
699632,5	9191877	0,207	0,288	0,081	Deposisi
699630,9	9191877	0,424	0,490	0,066	Deposisi
699629,4	9191877	0,633	0,691	0,058	Deposisi
699627,8	9191877	0,860	0,918	0,057	Deposisi
699626,3	9191877	1,085	1,144	0,059	Deposisi
699624,7	9191877	1,264	1,324	0,060	Deposisi
699623,1	9191877	1,435	1,498	0,063	Deposisi
699621,6	9191877	1,469	1,531	0,062	Deposisi
699620	9191877	1,487	1,547	0,060	Deposisi
699618,5	9191877	1,560	1,621	0,061	Deposisi

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.27 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi
Delft3D *Cross Section* B-B (Skenario 2)

x coordinate	y coordinate	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
699679,3	9191878	1,310	2,114	0,804	Deposisi
699677,7	9191878	1,163	1,982	0,819	Deposisi
699676,1	9191878	0,998	1,829	0,831	Deposisi
699674,6	9191878	0,808	1,661	0,853	Deposisi
699673	9191878	0,601	1,478	0,877	Deposisi
699671,4	9191878	0,387	1,280	0,893	Deposisi
699669,9	9191878	0,165	1,085	0,921	Deposisi
699668,3	9191878	-0,058	0,876	0,934	Deposisi
699666,8	9191878	-0,325	0,583	0,908	Deposisi
699665,2	9191878	-0,620	0,205	0,825	Deposisi
699663,6	9191878	-0,961	-0,252	0,709	Deposisi
699662,1	9191878	-1,373	-0,832	0,541	Deposisi
699660,5	9191878	-1,785	-1,338	0,447	Deposisi
699659	9191878	-2,214	-1,691	0,523	Deposisi
699657,4	9191878	-2,612	-2,058	0,554	Deposisi
699655,9	9191878	-3,010	-2,380	0,630	Deposisi
699654,3	9191878	-3,413	-2,625	0,788	Deposisi
699652,7	9191878	-3,817	-2,849	0,968	Deposisi
699651,2	9191878	-4,221	-3,089	1,133	Deposisi
699649,6	9191878	-4,627	-3,334	1,293	Deposisi
699648,1	9191877	-4,712	-3,566	1,147	Deposisi
699646,5	9191877	-4,712	-3,796	0,917	Deposisi
699645	9191877	-4,686	-3,962	0,724	Deposisi
699643,4	9191877	-4,594	-3,974	0,621	Deposisi
699641,8	9191877	-4,146	-3,817	0,330	Deposisi
699640,3	9191877	-3,850	-3,676	0,175	Deposisi
699638,7	9191877	-4,125	-3,690	0,435	Deposisi
699637,2	9191877	-4,266	-3,658	0,608	Deposisi
699635,6	9191877	-4,266	-3,458	0,808	Deposisi
699634,1	9191877	-3,504	-2,847	0,658	Deposisi
699632,5	9191877	-2,530	-2,070	0,461	Deposisi

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.27 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi
Delft3D *Cross Section B-B* (Skenario 2) (Lanjutan)

x coordinate	y coordinate	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
699630,9	9191877	-1,553	-1,127	0,425	Deposisi
699629,4	9191877	-0,584	-0,194	0,390	Deposisi
699627,8	9191877	0,065	0,418	0,353	Deposisi
699626,3	9191877	0,398	0,778	0,380	Deposisi
699624,7	9191877	0,680	1,078	0,398	Deposisi
699623,1	9191877	0,991	1,409	0,419	Deposisi
699621,6	9191877	1,349	1,799	0,450	Deposisi
699620	9191877	1,819	2,233	0,414	Deposisi
699618,5	9191877	1,844	2,423	0,579	Deposisi

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.28 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi
Delft3D *Cross Section C-C* (Skenario 2)

x coordinate	y coordinate	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
699679,3	9191878	1,433	1,989	0,556	Deposisi
699677,7	9191878	1,162	1,730	0,569	Deposisi
699676,1	9191878	0,552	1,222	0,669	Deposisi
699674,6	9191878	-0,286	0,398	0,685	Deposisi
699673	9191878	-1,861	-1,172	0,689	Deposisi
699671,4	9191878	-3,226	-2,385	0,841	Deposisi
699669,9	9191878	-3,226	-2,502	0,724	Deposisi
699668,3	9191878	-3,052	-2,441	0,610	Deposisi
699666,8	9191878	-3,555	-2,971	0,584	Deposisi
699665,2	9191878	-4,191	-3,615	0,577	Deposisi
699663,6	9191878	-4,763	-4,248	0,515	Deposisi
699662,1	9191878	-5,246	-4,828	0,418	Deposisi
699660,5	9191878	-5,826	-5,415	0,411	Deposisi

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.28 Perubahan Morfologi Kondisi Awal Sampai Akhir Simulasi
Delft3D *Cross Section* C-C (Skenario 2) (Lanjutan)

x coordinate	y coordinate	Kondisi Awal (11/10/2025 16:00) (m)	Kondisi Akhir (12/10/2025 16:00) (m)	Selisih (m)	Keterangan (Erosi / Deposisi)
699659	9191878	-5,958	-5,611	0,347	Deposisi
699657,4	9191878	-6,010	-5,674	0,336	Deposisi
699655,9	9191878	-6,010	-5,678	0,333	Deposisi
699654,3	9191878	-6,005	-5,657	0,348	Deposisi
699652,7	9191878	-5,987	-5,614	0,373	Deposisi
699651,2	9191878	-5,981	-5,546	0,435	Deposisi
699649,6	9191878	-5,972	-5,437	0,535	Deposisi
699648,1	9191877	-5,972	-5,247	0,725	Deposisi
699646,5	9191877	-5,720	-4,794	0,926	Deposisi
699645	9191877	-4,745	-3,879	0,866	Deposisi
699643,4	9191877	-3,633	-2,754	0,878	Deposisi
699641,8	9191877	-2,103	-1,667	0,435	Deposisi
699640,3	9191877	-0,791	-0,269	0,522	Deposisi
699638,7	9191877	0,231	0,524	0,293	Deposisi
699637,2	9191877	0,742	0,955	0,212	Deposisi
699635,6	9191877	0,742	1,017	0,275	Deposisi
699634,1	9191877	0,794	1,086	0,292	Deposisi
699632,5	9191877	0,841	1,190	0,349	Deposisi
699630,9	9191877	1,021	1,365	0,343	Deposisi
699629,4	9191877	1,254	1,594	0,340	Deposisi
699627,8	9191877	1,534	1,830	0,295	Deposisi
699626,3	9191877	1,863	2,053	0,190	Deposisi
699624,7	9191877	1,932	2,157	0,225	Deposisi
699623,1	9191877	2,014	2,232	0,218	Deposisi
699621,6	9191877	2,040	2,268	0,228	Deposisi
699620	9191877	2,044	2,266	0,223	Deposisi
699618,5	9191877	2,044	2,272	0,229	Deposisi

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

4.10. Rekapitulasi Perubahan Morfologi dengan Hasil Pemodelan Skenario 1 dan Skenario 2

Tabel 4.29 Rekapitulasi Hasil Perubahan Morfologi Tertinggi Skenario 1

Skenario 1 (Debit Eksisting)					
No.	Cross Section	HEC-RAS (m)		Delft3D (m)	
		Erosi	Deposisi	Erosi	Deposisi
1	Cross Section A-A	-	0,153	-0,099	0,108
2	Cross Section B-B	-0,168	-	-0,086	0,138
3	Cross Section C-C	-0,068	-	-0,016	0,394

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.30 Rekapitulasi Hasil Perubahan Morfologi Tertinggi Skenario 2

Skenario 2 (Debit Rencana data Perum Jasa Tirta)					
No.	Cross Section	HEC-RAS (m)		Delft3D (m)	
		Erosi	Deposisi	Erosi	Deposisi
1	Cross Section A-A	-0,504	-	-1,378	0,096
2	Cross Section B-B	-	0,207	-	1,293
3	Cross Section C-C	-	0,202	-	0,926

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan Tabel 4.29 dan Tabel 4.30, hasil pemodelan morfologi HEC-RAS dan Delft3D menunjukkan perbedaan pola perubahan dasar sungai pada kedua skenario. Pada Skenario 1 (debit eksisting), perubahan terbesar terjadi di *Cross Section C-C*, dengan erosi maksimum sebesar 0,686 m menurut HEC-RAS dan deposisi maksimum sebesar 0,394 m menurut Delft3D. Pada Skenario 2 (debit rencana Perum Jasa Tirta), perubahan morfologi meningkat, dimana HEC-RAS memprediksi erosi maksimum sebesar 0,504 m dan Delft3D sebesar 1,378 m pada *Cross Section A-A*, serta deposisi tertinggi sebesar 1,293 m pada *Cross Section B-B*. Secara umum, Skenario 2 menghasilkan erosi dan sedimentasi yang lebih besar dibandingkan Skenario 1, menunjukkan bahwa peningkatan debit aliran meningkatkan intensitas perubahan morfologi sungai.

4.11. Hasil Pemodelan Angkutan Sedimen (Skenario 1)

4.11.1. Hasil Pemodelan Angkutan Sedimen Simulasi HEC-RAS

(Skenario 1)

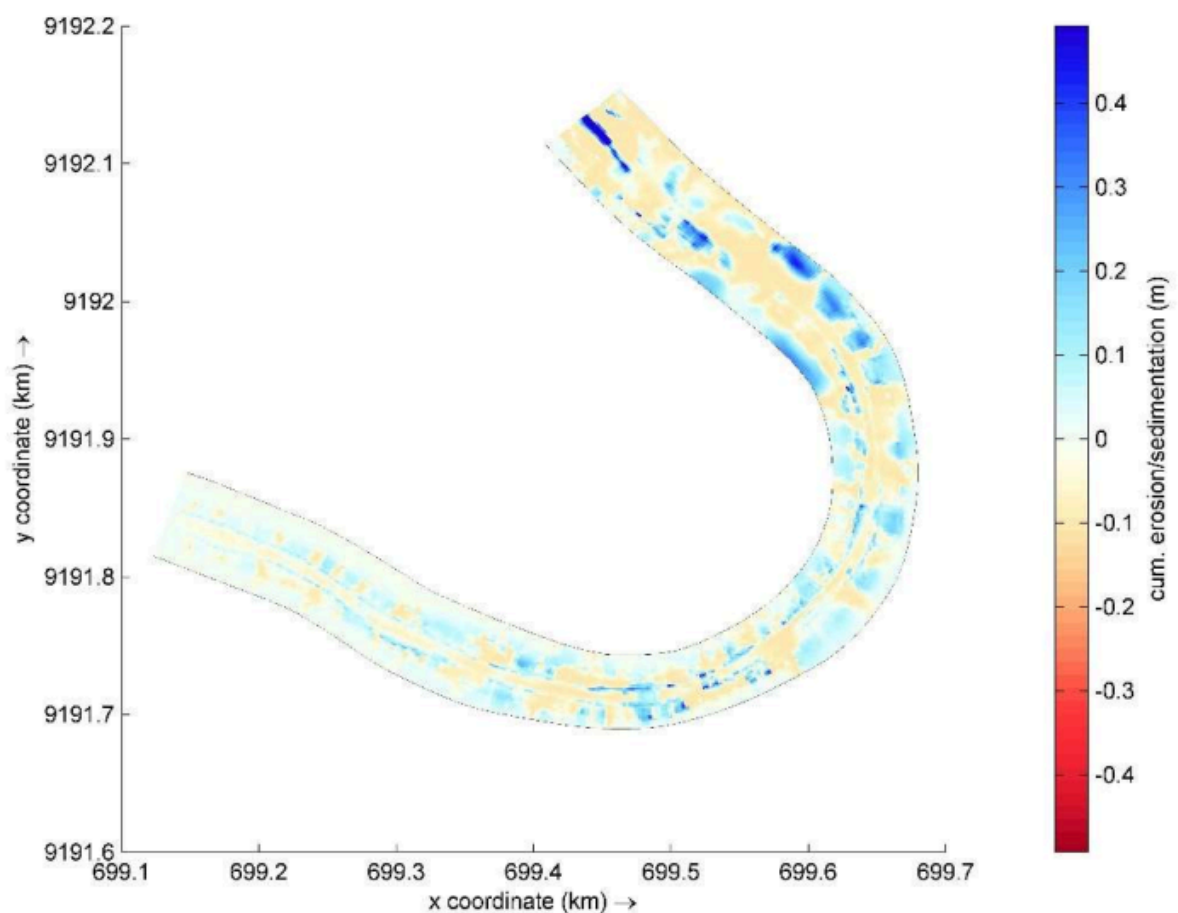
Hasil dari simulasi angkutan sedimen HEC-RAS adalah berupa data *mass out cumm* atau data sedimen yang keluar dari hasil akhir simulasi. Data tersebut diuraikan dalam tabel berikut

Tabel 4.31 Hasil Angkutan Sedimen Simulasi HEC-RAS (Skenario 1)

No.	<i>Sediment Mass</i>	Besaran	Satuan
1	<i>Mass Out Cum.</i>	1.052	ton/hari
2	<i>Vol. Out Cum.</i>	907,100	m3

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

4.11.2. Hasil Pemodelan Angkutan Sedimen Simulasi Delft3D Dengan Debit Banjir Eksisting (Skenario 1)



Gambar 4.46 Visualisasi Hasil Angkutan Sedimen (Erosi-Deposisi) Simulasi Delft3D (Skenario 1)

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Gambar 4.46 tersebut menunjukkan hasil simulasi perubahan morfologi dasar sungai (*cumulative erosion/sedimentation*) pada area tikungan sungai.

Nilai perubahan elevasi dasar sungai ditampilkan dengan skala warna yang menggambarkan proses erosi dan sedimentasi yang terjadi selama periode simulasi.

1. Warna biru menunjukkan sedimentasi (deposisi) atau penambahan material sedimen pada dasar sungai dengan nilai hingga sekitar +0,5 m.
2. Warna merah menunjukkan erosi atau penggerusan dasar sungai dengan nilai hingga sekitar -0,5 m.
3. Warna putih hingga kuning muda menunjukkan perubahan morfologi yang relatif kecil atau mendekati nol.

Berdasarkan hasil simulasi, perubahan morfologi didominasi oleh sedimentasi ringan hingga sedang yang ditunjukkan oleh sebaran warna biru muda hingga biru pada sebagian besar penampang sungai. Akumulasi sedimentasi yang lebih besar terlihat pada beberapa bagian Alir, terutama di sekitar area tikungan sungai dengan nilai mencapai sekitar 0,4–0,5 m. Sementara itu, area yang mengalami erosi relatif terbatas dan ditunjukkan oleh warna kuning-oranye hingga merah dengan sebaran yang tidak terlalu dominan.

Pola tersebut menunjukkan bahwa aliran pada tikungan sungai menyebabkan distribusi kecepatan yang tidak merata sehingga terjadi proses pengangkutan dan pengendapan sedimen di beberapa lokasi. Secara umum, hasil simulasi mengindikasikan bahwa proses sedimentasi lebih dominan dibandingkan erosi, sehingga berpotensi menyebabkan pendangkalan pada beberapa bagian Alir sungai apabila kondisi hidrodinamika yang sama berlangsung dalam jangka waktu yang panjang.

Dari Gambar 4.46, diatas didapatkan hasil simulasi angkutan sedimen total simulasi Delft3D sebagai berikut:

Tabel 4.32 Hasil Angkutan Sedimen Simulasi Delft3D (Skenario 1)

No.	<i>Sediment Mass</i>	Besaran	Satuan
1	<i>Mass Out Cum.</i>	1.592	ton/hari
2	<i>Vol. Out Cum.</i>	1.061	m3/hari

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

4.12. Hasil Pemodelan Angkutan Sedimen (Skenario 2)

Pemodelan Angkutan sedimen simulasi Delft3D Skenario 2 menggunakan data debit konstan dari Perum Jasa Tirta Wilayah Sungai Brantas. Adapun data debit yang digunakan dalam pemodelan skenario 2 ini adalah data debit bulan oktober 2025 yang dimana data tersebut diambil dalam waktu yang sama dengan data ekisting yang ada pada skenario 1.

Tabel 4.33 Data Debit Sungai Wonokromo

Bulan	Debit
	(m ³ /detik)
Januari	62,79
Februari	55,77
Maret	60,64
April	36,89
Mei	54,78
Juni	49,13
Juli	35,3
Agustus	33,89
September	31,3
Oktober	36,94
November	66,13
Desember	51,41

(Sumber : Perum Jasa Tirta BBWS Brantas, 2025)

4.12.1. Hasil Pemodelan Angkutan Sedimen Simulasi HEC-RAS (Skenario 2)

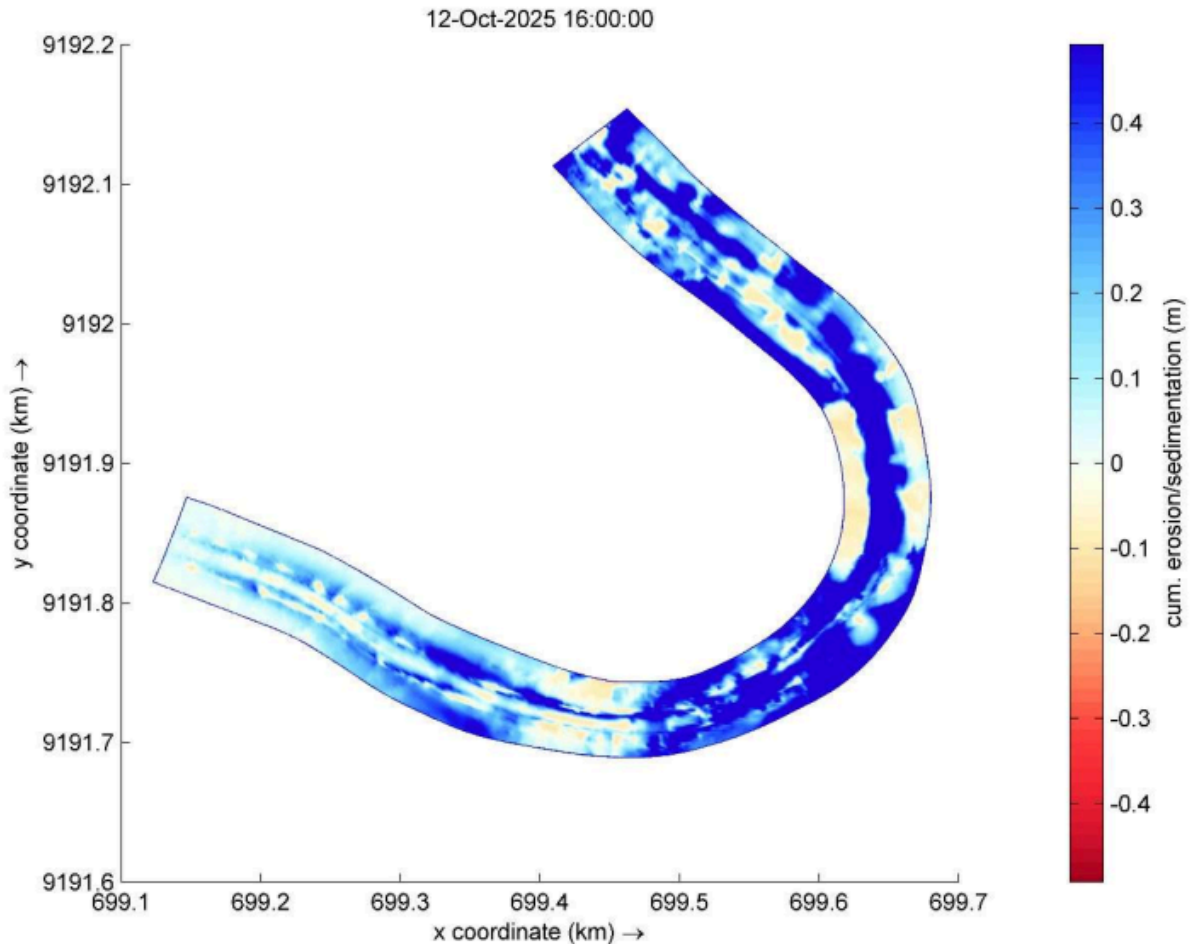
Hasil dari simulasi angkutan sedimen HEC-RAS skenario 2 dengan menggunakan data debit dari Perum Jasa Tirta adalah berupa data *mass out cumm* atau data sedimen yang keluar dari hasil akhir simulasi. Data tersebut diuraikan dalam tabel berikut

Tabel 4.34 Hasil Angkutan Sedimen Simulasi HEC-RAS (Skenario 2)

No.	<i>Sediment Mass</i>	Besaran	Satuan
1	<i>Mass Out Cum.</i>	16.557	ton/hari
2	<i>Vol. Out Cum.</i>	12.465	m3/hari

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

4.12.2. Hasil Pemodelan Angkutan Sedimen Simulasi Delft3D (Skenario 2)



Gambar 4. 47 Visualisasi Hasil Angkutan Sedimen (Erosi-Deposisi) Simulasi Delft3D (Skenario 1)

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Gambar 4.47 menunjukkan hasil simulasi perubahan morfologi dasar sungai pada Skenario 2 (debit rencana Perum Jasa Tirta) pada tanggal 12 Oktober 2025 pukul 16:00 WIB. Nilai perubahan elevasi dasar sungai ditampilkan dalam satuan meter dengan rentang sekitar -0,5 m hingga +0,5 m. Warna biru menunjukkan sedimentasi (deposisi), sedangkan warna merah hingga oranye menunjukkan erosi.

Berdasarkan hasil simulasi, sebagian besar area sungai didominasi oleh warna biru, yang menunjukkan bahwa proses sedimentasi terjadi secara

dominan pada hampir seluruh ruas sungai yang ditinjau. Sedimentasi terbesar terlihat pada bagian tikungan sungai dan sepanjang tepi Alir dengan ketebalan mencapai sekitar 0,4–0,5 m. Sebaran deposisi yang luas ini mengindikasikan bahwa debit rencana membawa material sedimen dalam jumlah yang cukup besar sehingga terjadi akumulasi sedimen di sepanjang Alir sungai.

Pada beberapa lokasi terlihat area berwarna putih hingga kuning muda yang menunjukkan perubahan morfologi relatif kecil atau mendekati kondisi awal. Sementara itu, area yang mengalami erosi terlihat sangat terbatas dan tidak menunjukkan nilai yang signifikan dibandingkan sedimentasi yang terjadi.

Pola perubahan tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi debit rencana, kapasitas angkut sedimen aliran mengalami perubahan sehingga sebagian besar material sedimen cenderung terendapkan di dalam Alir sungai, terutama pada area tikungan yang memiliki distribusi kecepatan aliran tidak merata. Kondisi ini berpotensi menyebabkan pendangkalan sungai apabila berlangsung secara terus-menerus dalam jangka panjang.

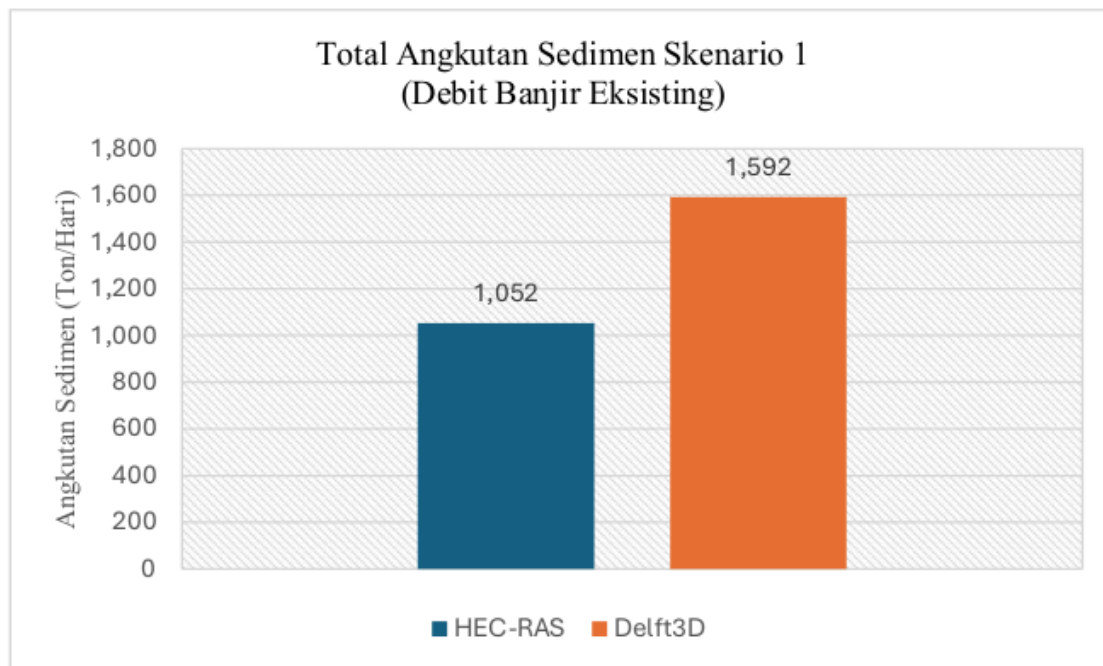
Dari Gambar 4.46, diatas didapatkan hasil simulasi angkutan sedimen total simulasi Delft3D sebagai berikut:

Tabel 4.35 Hasil Angkutan Sedimen Simulasi Delft3D (Skenario 2)

No.	<i>Sediment Mass</i>	Besaran	Satuan
1	<i>Mass Out Cum.</i>	93.970	ton/hari
2	<i>Vol. Out Cum.</i>	35.460	m3/hari

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

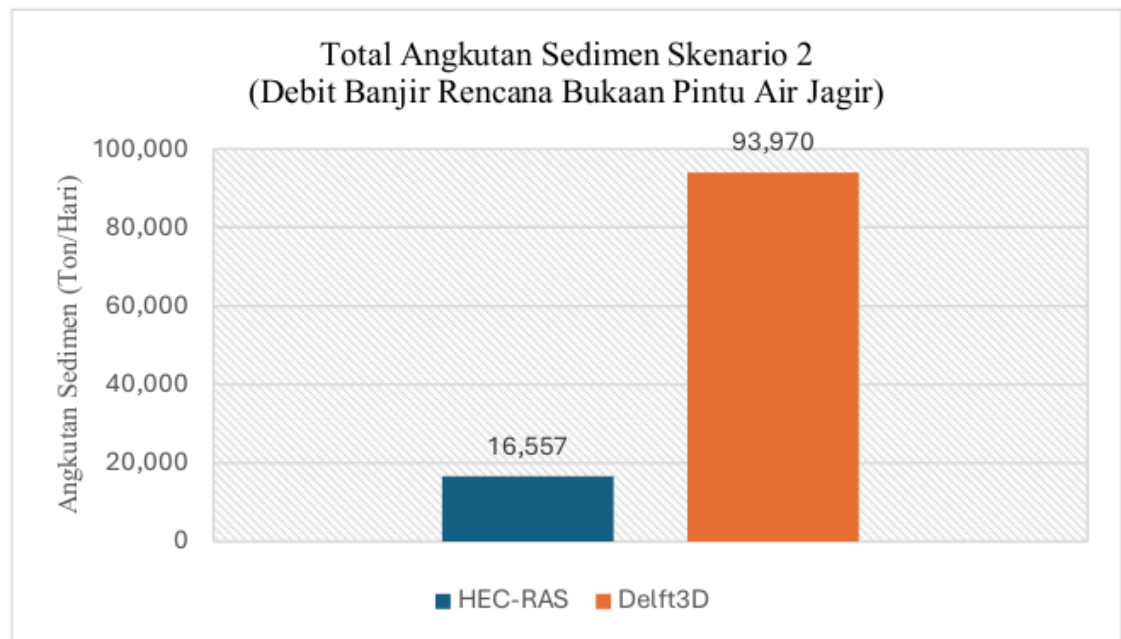
4.13. Rekapitulasi Pemodelan Angkutan Sedimen dengan Hasil Pemodelan Skenario 1 dan Skenario 2



Gambar 4.48 Hasil Angkutan Sedimen Skenario 1
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Gambar 4.48 menunjukkan pada kondisi debit eksisting, model HEC-RAS menghasilkan total angkutan sedimen sebesar 1.052 ton/hari, sedangkan model Delft3D menghasilkan 1.592 ton/hari. Nilai yang diprediksi Delft3D lebih besar sekitar 51,3% dibandingkan HEC-RAS.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa Delft3D memprediksi kapasitas transport sedimen yang lebih tinggi dibandingkan HEC-RAS pada kondisi debit eksisting. Meskipun demikian, kedua model masih menunjukkan besaran angkutan sedimen yang relatif sebanding, sehingga pola transport sedimen yang terjadi masih berada dalam rentang yang sama.



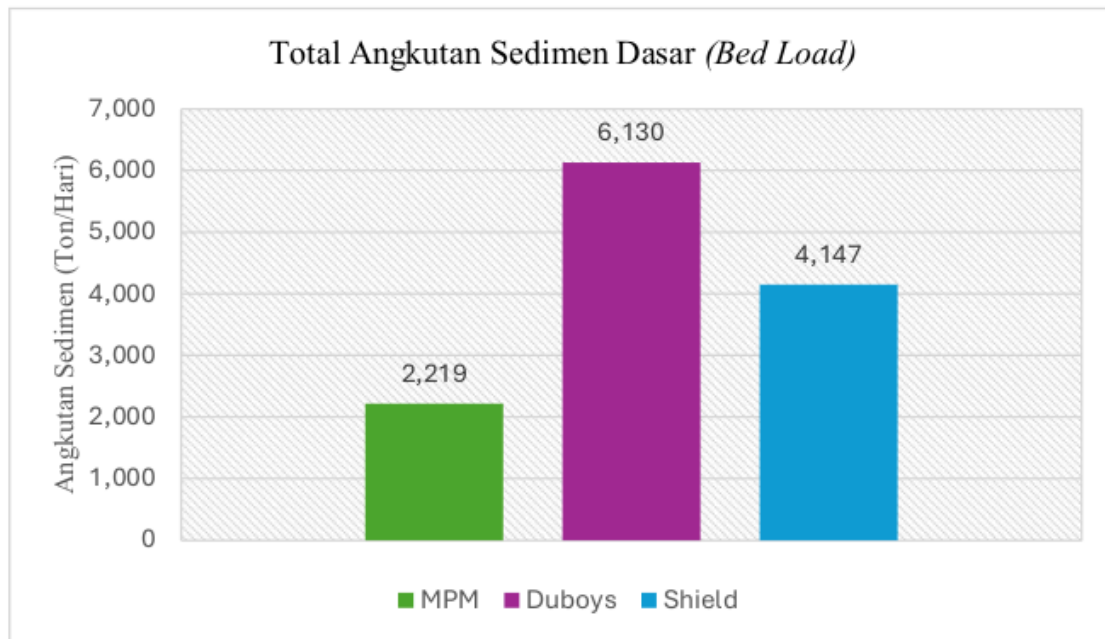
Gambar 4.49 Hasil Akgkutan Sedimen Skenario 2
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Gambar 4.49 menunjukkan pada kondisi debit rencana, terjadi peningkatan angkutan sedimen yang sangat signifikan. HEC-RAS menghasilkan total angkutan sedimen sebesar 16.557 ton/hari, sedangkan Delft3D menghasilkan 93.970 ton/hari.

Dibandingkan dengan Skenario 1, nilai angkutan sedimen meningkat sekitar:

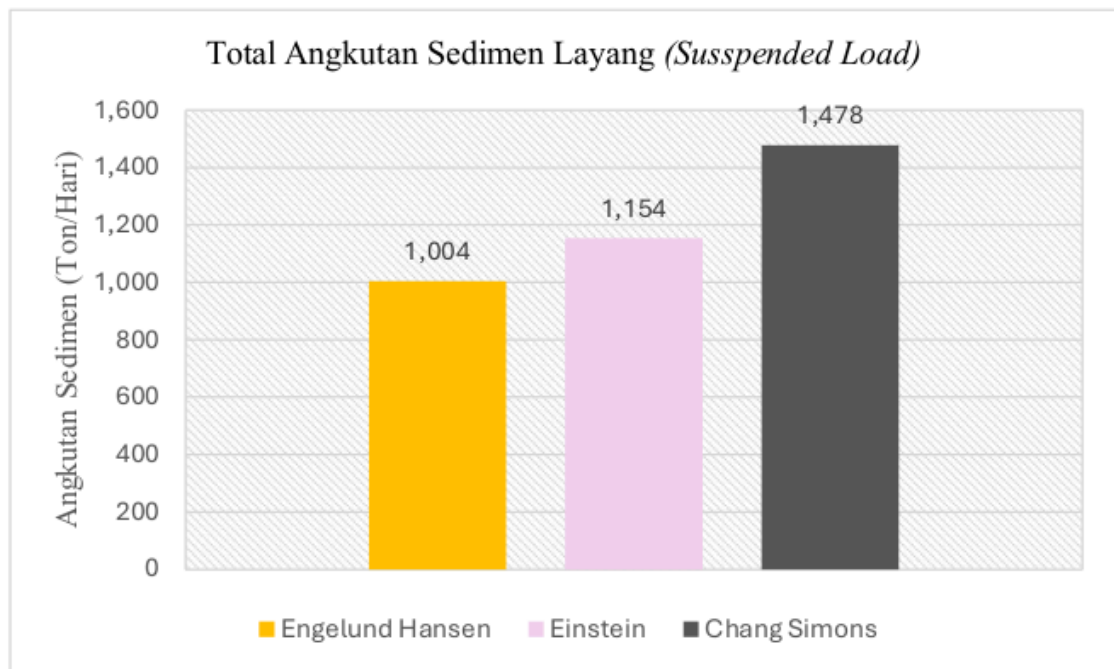
1. 15,7 kali pada model HEC-RAS (dari 1.052 menjadi 16.557 ton/hari).
2. 59,0 kali pada model Delft3D (dari 1.592 menjadi 93.970 ton/hari).

Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan debit akibat bukaan pintu air memberikan pengaruh yang sangat besar terhadap kemampuan aliran dalam mengangkut sedimen. Selain itu, Delft3D menunjukkan respons yang jauh lebih sensitif terhadap perubahan debit dibandingkan HEC-RAS.



Gambar 4.50 Hasil Angkutan Sedimen Dasar (*Bedload*)
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Gambar 4.50 menunjukkan hasil perhitungan angkutan sedimen dasar (*bed load*), diperoleh bahwa metode Dubois menghasilkan nilai angkutan sedimen terbesar yaitu sebesar 6.130 ton/hari, diikuti oleh metode Shields sebesar 4.147 ton/hari, dan metode Meyer-Peter Müller (MPM) sebesar 2.219 ton/hari. Perbedaan nilai tersebut menunjukkan bahwa setiap metode memiliki sensitivitas yang berbeda terhadap parameter hidraulik dan karakteristik sedimen. Metode Dubois cenderung memberikan estimasi yang lebih tinggi karena mempertimbangkan pengaruh tegangan geser dasar yang lebih besar terhadap pergerakan butiran sedimen. Sementara itu, metode MPM menghasilkan nilai yang lebih rendah karena pendekatannya lebih konservatif dalam memperkirakan transport sedimen dasar. Hasil ini menunjukkan bahwa sedimen pada lokasi penelitian memiliki potensi yang cukup besar untuk bergerak di sepanjang dasar sungai akibat pengaruh gaya aliran.



Gambar 4.51 Hasil Angkutan Sedimen Layang (*Suspended Load*)
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan hasil perhitungan angkutan sedimen layang (*suspended load*), diperoleh nilai sebesar 1.004 ton/hari menggunakan metode Engelund-Hansen, 1.154 ton/hari menggunakan metode Einstein, dan 1.478 ton/hari menggunakan metode Chang-Simons. Dari ketiga metode tersebut, metode Chang-Simons menghasilkan estimasi angkutan sedimen layang terbesar. Perbedaan hasil ini menunjukkan adanya variasi pendekatan dalam memperhitungkan proses pengangkatan dan pengangkutan partikel sedimen oleh aliran. Meskipun nilainya lebih kecil dibandingkan angkutan sedimen dasar, sedimen layang tetap berperan dalam proses sedimentasi, terutama pada daerah dengan kecepatan aliran yang cukup tinggi dan kondisi turbulensi yang mendukung terjadinya suspensi partikel.

Jika dibandingkan secara keseluruhan, nilai angkutan sedimen dasar jauh lebih besar daripada angkutan sedimen layang. Angkutan sedimen dasar berkisar antara 2.219–6.130 ton/hari, sedangkan angkutan sedimen layang hanya berkisar antara 1.004–1.478 ton/hari. Kondisi ini menunjukkan bahwa mekanisme transport sedimen pada lokasi penelitian lebih didominasi oleh pergerakan sedimen di dasar sungai melalui proses menggelinding (*rolling*), meluncur (*sliding*), dan meloncat (*saltation*). Dominasi angkutan sedimen

dasar tersebut mengindikasikan bahwa perubahan morfologi sungai yang terjadi lebih banyak dipengaruhi oleh proses erosi dan deposisi pada dasar sungai dibandingkan oleh pengendapan sedimen layang.

Hasil analisis menunjukkan bahwa metode Duboys memberikan estimasi angkutan sedimen dasar tertinggi, sedangkan metode Chang-Simons menghasilkan estimasi angkutan sedimen layang tertinggi. Dominasi angkutan sedimen dasar dibandingkan sedimen layang mengindikasikan bahwa dinamika morfologi sungai pada lokasi penelitian sangat dipengaruhi oleh pergerakan material sedimen di dasar Alir. Oleh karena itu, dalam pengelolaan sungai dan evaluasi perubahan morfologi, aspek transport sedimen dasar perlu menjadi perhatian utama karena berkontribusi paling besar terhadap proses pendangkalan maupun perubahan bentuk penampang sungai.

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai analisis pola erosi-deposisi terhadap dampak perubahan debit banjir pada belokan Sungai Wonokromo menggunakan software Delft3D dan HEC-RAS, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Kondisi hidrodinamika eksisting Sungai Wonokromo menunjukkan debit maksimum $114,744 \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit balik (*backwater*) maksimum $-43,94 \text{ m}^3/\text{s}$. Pasang tertinggi observasi mencapai $+1,274 \text{ m}$ dan surut terendah $-0,714 \text{ m}$. Hasil simulasi HEC-RAS dan Delft3D mampu merepresentasikan pola pasang surut dengan baik, dengan elevasi pasang tertinggi masing-masing $+1,280 \text{ m}$ dan $+1,363 \text{ m}$. Kecepatan aliran maksimum hasil simulasi mencapai $1,035 \text{ m/s}$ (HEC-RAS) dan $1,103 \text{ m/s}$ (Delft3D). Validasi model menunjukkan kinerja sangat baik (NSE $0,865-0,993$; RSR $0,081-0,368$), sehingga kedua model layak digunakan untuk analisis hidrodinamika dan morfologi Sungai Wonokromo.
2. Karakteristik sedimen Sungai Wonokromo didominasi pasir ($83,12\%$) dengan nilai D50 sebesar $0,44 \text{ mm}$ dan D65 sebesar $0,61 \text{ mm}$, sehingga tergolong sedimen non-kohefif yang mudah terangkut oleh aliran. Konsentrasi sedimen meningkat seiring kenaikan debit, menunjukkan kapasitas angkutan sedimen yang lebih besar pada kondisi aliran tinggi dan kecenderungan pengendapan pada aliran rendah. Hasil simulasi menunjukkan konsentrasi sedimen maksimum sebesar $356,09 \text{ mg/L}$ (HEC-RAS) dan $365,56 \text{ mg/L}$ (Delft3D). Analisis morfologi memperlihatkan terjadinya proses erosi dan deposisi pada kedua skenario, dengan perubahan terbesar pada Skenario 2 hasil Delft3D, yaitu erosi hingga $-1,378 \text{ cm}$ dan deposisi hingga $1,293 \text{ cm}$.
3. Hasil Angkutan Sedimen Skenario 1 simulasi HEC-RAS sebesar $1,052 \text{ ton/hari}$ sedangkan simulasi Delft3D sebesar 1.592 ton/hari . Pada Skenario 2 simulasi HEC-RAS Angkutan sedimen sebesar 16.557 ton/hari dan simulasi Delft3D sebesar 93.970 ton/hari . Hasil perhitungan dengan berbagai metode sedimen dasar seperti MPM sebesar 2.219 ton/hari , Duboys sebesar 6.130 ton/hari , dan Shield sebesar 4.147 ton/hari . Sedangkan untuk sedimen laying metode Engelund Hansen sebesar 1.004

10
ton/hari, Einstein sebesar 1.154 ton/hari, dan Chang Simons sebesar 1.478 ton/hari.

10 5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan monitoring batimetri dan sedimentasi secara berkala pada segmen belokan Sungai Wonokromo untuk mengetahui perkembangan perubahan morfologi sungai secara aktual.
2. Instansi pengelola sungai disarankan melakukan pengendalian sedimentasi melalui kegiatan normalisasi atau pengerukan pada area yang mengalami deposisi dominan guna menjaga kapasitas tampung sungai terhadap debit banjir.
3. Diperlukan penataan dan pengawasan kawasan sempadan sungai secara lebih ketat untuk mengurangi aktivitas yang dapat mempercepat sedimentasi dan penyempitan penampang sungai.
4. Untuk penelitian selanjutnya disarankan menggunakan periode simulasi yang lebih panjang, beberapa skenario debit banjir dengan kala ulang berbeda, serta pemodelan morfologi jangka panjang agar perubahan sungai dapat dianalisis secara lebih komprehensif.
5. Penelitian lanjutan juga dapat mengintegrasikan pengaruh perubahan tata guna lahan, aktivitas masyarakat di sempadan sungai, dan pengaruh pasang surut jangka panjang terhadap dinamika erosi-deposisi Sungai Wonokromo.

DAFTAR PUSTAKA

- Anjung Kasianop, & Ade Irawan. (2025). Analisis Distribusi Kecepatan Aliran Sungai Petapahan. (Jurnal Planologi Dan Sipil)
- DELFT 3D. (2025). *Delft3D 3D/2D modelling suite for integral water solutions Functional Description*.
- Diah Ratna Setianingrum, Andri Suprayogi, & Hani'ah. (2014). Analisis Kesesuaian Lahan Tambak Menggunakan Sistem Informasi Geografis. (Jurnal Geodesi Undip).
- Diansari, R. (2014). Analisis Perhitungan Muatan Sedimen (*Suspended Load*) Pada Muara Sungai Lilin Kabupaten Musi-Banyuasin. (Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan) (Vol. 2, Number 2).
- Djunarsjah, E., Muldiyatno, F., Adrianto, D., & Pranowo, W. S. (2005). Perubahan Muka Air Sungai Untuk Penentuan Datum Peta (Studi Kasus Sungai Musi Palembang).
- Ezrahyu, P. (2024). Penggunaan Aplikasi QGIS *Processing Modeler* dalam Menentukan Potensi Bencana Tanah Longsor di Kabupaten Bogor. *Geodika: Jurnal Kajian Ilmu Dan Pendidikan Geografi*, 8(1), 41–52, <https://doi.org/10.29408/geodika.v8i1.25729>
- Fahmi, M., & Hafli, T. M. (2019). Simulasi Numerik Perubahan Morfologi Pantai Akibat Konstruksi Jetty Pada Muara Lambada Lhok Aceh Besar Menggunakan Software Delft3d.
- Farindi, M., Puteri, D., Putra, S., & Adriat, R. (2019). Penentuan Debit Aliran di Muara Sungai Pawan Kabupaten Ketapang berdasarkan Parameter Kecepatan Arus dan Kedalaman Sungai. *Prisma Fisika*, 7(3), 326–330,
- Fathur Aditya, M., Triatmodjo, B., Agus Kironoto, B., & Fathur Aditya muhammadfathuraditya, M. (2024). Analisis aliran dan erosi tikungan Sungai Konaweha ruas Morosi.
- Fauziyah, R., Agus Kironoto, B., & Legono, D. (2018). Kajian Angkutan Sedimen Di Sungai Pabelan, Kabupaten Magelang, Jawa Tengah. *Semesta Teknika*, 21(1). <https://doi.org/10.18196/st.211210>
- FLOW. (2025). *DRAFT Delft3D 3D/2D modelling suite for integral water solutions Hydro-Morphodynamics*.
- Fransiskus Gatot Imam Santoso. (2011). Analisis Perbandingan Metode Numerik Dalam Menyelesaikan Persamaan-Persamaan Serentak. *Jurnal Widya Warta*.
- Giarto, R. B., Kiptiah, M., Zega, F., Zubran, A., & Yusuf, M. R. (2024). Karakteristik Kecepatan dan Debit Aliran pada Sungai Alami menggunakan *Six-Tenths*

- Method* (Studi Kasus Sungai Pondok Gong Km. 33, Kabupaten Samboja). *JRST* (Jurnal Riset Sains Dan Teknologi), 8(2), 173, <https://doi.org/10.30595/jrst.v8i2.21198>
- Kärkkäinen, M., & Lotsari, E. (2022). *Impacts of rising, peak and receding phases of discharge events on erosion potential of a boreal meandering river. Hydrological Processes*, 36(10). <https://doi.org/10.1002/hyp.14674>
- Khuntia, J. R., Devi, K., & Khatua, K. K. (2018). *Prediction of depth-averaged velocity in an open channel flow. Applied Water Science*, 8(6). <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0812-9>
- Knighton D. (1998). *Buku Fluvial Forms And Processes*.
- Komunikasi, M., Pengembangan, D., Lingkungan, T., Dhiya Thifalina, F., Zaman, B., & Sarminingsih, A. (2023). *Jurnal Presipitasi Pollution Load Analysis of Wonokromo River with Program System Dynamics (STELLA)*. 20(1), 1–10,
- Lucyta Nugraha, W., Andiek Maulana, M., Wardoyo, W., & Damar Negara, S. (2021). Analisis Sensitivitas Kecepatan Rata-rata Kedalaman dan Tinggi Muka Air terhadap Parameter Masukan Setting Model pada Aliran Berbelok 180° dengan Menggunakan Program Bantu Delft3D. In *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil* (Vol. 19, Number 1).
- Makmur Zainuddin, M. T., Irmanto, I., Nugroho, J., & Hatmoko, W. (2023). Pemodelan Sedimentasi Menggunakan Hec-Ras 6,1 Untuk Menganalisis Perubahan Elevasi Dasar Sungai Tondano, Sulawesi Utara. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 14(1), 41–54, <https://doi.org/10.32679/jth.v14i1.721>
- Maulana N.S., & Patriadi, A. (2025). Laporan Tugas Akhir.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (1983). *Model Evaluation Guidelines For Systematic Quantification Of Accuracy In Watershed Simulations. In Transactions of the ASABE* (Vol. 50, Number 3).
- Novelyne, F. G., Nurhayati, N., & Gunarto, D. (2024). Penerapan HEC-RAS Untuk Analisis Angkutan Sedimen Dasar Terhadap Debit Angkutan Sedimen Pada Aliran Parit Berkat. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 14(1), 251–264, <https://doi.org/10.29103/tj.v14i1.1070>
- Olihen Boangmanalu, A., & Indrawan, I. (2008). *Kajian Laju Angkutan Sedimen Pada Sungai Wampu*.
- Pamungkas, T., & Patriadi, A. (2025). *Validation of a 2D Hydrodynamic Model for Complex Bend Flow under Tidal Influence in the Wonokromo River, Indonesia*.
- Parsapour-Moghaddam, P., Rennie, C. D., Slaney, J., Platzek, F., Shirkhani, H., Jamieson, E., Mosselman, E., & Measures, R. (2023). *Implementation of a New*

- Bank Erosion Model in Delft3D. Journal of Hydraulic Engineering*, 149(10). <https://doi.org/10.1061/jhend8.hyeng-13206>
- Patriadi, A., Soemitro, R. A. A., Warnana, D. D., Wardoyo, W., Mukunoki, T., & Tsujimoto, G. (2021). *The Influence Of Sembayat Weir On Sediment Transport Rate In The Estuary Of Bengawan Solo River, Indonesia. International Journal of GEOMATE*, 20(81), 35–43, <https://doi.org/10.21660/2021,81,j2072>
- Prihantono, J., Fajrianto, I. A., & Kurniadi, Y. N. (2018). Pemodelan Hidrodinamika Dan Transpor Sedimen Di Sekitar Tanjung Pontang, Kabupaten Serang – Banten. *Jurnal Kelautan Nasional*, 1(2). <https://doi.org/10.15578/jkn.v1i2.6614>
- QUICKIN. (2025). *D R A F T Delft3D 3D/2D Modelling Suite For Integral Water Solutions User Manual QUICKIN*.
- Ramadhan, M., Pada, P., Penelitian, P., Sumber, P., Pesisir, D., Korespondensi, L.-K., Pasir, J., & Timur, A. (2011). Komparasi Hasil Pengamatan Pasang Surut Di Perairan Pulau Pramuka Dan Kabupaten Pati Dengan Prediksi Pasang Surut *Tide Model Driver*.
- RGFGRID. (2025). *D R A F T Delft3D 3D/2D modelling suite for integral water solutions User Manual RGFGRID*.
- Sasmito, G. W., Informatika, J. T., Bersama, H., Mataram, J., 09, N., & Lor, P. (2017). Penerapan Metode Waterfall Pada Desain Sistem Informasi Geografis Industri Kabupaten Tegal. 2(1). <http://www.tegalkab.go.id>,
- Savitri, F. A., Bagus Adityawan, M., & Widyaningtiyas, W. (2023). *Study of Sedimentation Control on Bangga River, Palu Watershed, Central Sulawesi. Jurnal Teknik Sipil*, 30(2). <https://doi.org/10.5614/jts.2023,30,2,3>
- Soemarto. (1987). *Buku Hidrologi Teknik. Buku Hidrologi Teknik*.
- Sosrodarsono, K. T. (2003). *HIDROLOGI editor*.
- Syakinah Maghfirah Ayu, Agus Anugroho Dwi Suryo P, Petrus Subardjo, Sugeng Widada, & Purwanto. (2020). Pengukuran Batimetri Untuk Perencanaan Pengukuran Kolam Pelabuhan Peti Kemas Belawan Sumatera Utara. *Indonesian Journal of Oceanography*.
- Tangguh Perdana Putra, Sidharta Adyatma, & Ellyn Normelani. (2016). Analisis Perilaku Masyarakat Bantaran Sungai Martapura Dalam Aktivitas Membuang Sampah Rumah Tangga. <http://ppjp.unlam.ac.id/journal/index.php/jpg>
- Teknologi, J., Andiek Maulana, M., Asih Aryani Soemitro, R., Mukunoki, T., & Anwar, N. (2018). *Suspended Sediment Concentration Assessment As A Precursor To River Channel Shifting In The Bengawan Solo River, Indonesia (Vol. 80, Number 5)*. www.jurnalteknologi.utm.my
- Triatmodjo, B. (2009). *Perencanaan Pelabuhan*.

- Try Al Tanto, Semeidi Husrin, Ulung J Antama Wissha, Aprizon Putra, Radha Karina Putri, & Ilham. (2016). Karakteristik Oseanografi Fisik (Batimetri, Pasang Surut, Gelombang Signifikan dan Arus Laut) Perairan Teluk Bungkus Kota Padang. *Jurnal Kelautan*.
- Undang-undang No. 17 Tahun 2019. (2019). Mengingat Dengan Persetujuan Bersama Dewan Perwakilan Rakyat Republik Indonesia Dan Presiden Republik Indonesia Dalam Undang-Undang ini yang dimaksud dengan: Presiden Republik Indonesia-2,
- USACE. (2021). *HEC-RAS River Analysis System HEC-RAS Hydraulic Reference Manual*.
- Wang, J., Chu, A., Dai, Z., & Nienhuis, J. (2024). *Delft3D model-based estuarine suspended sediment budget with morphodynamic changes of the channel-shoal complex in a mega fluvial-tidal delta. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 18(1). <https://doi.org/10.1080/19942060.2023.2300763>
- Xiang, H., Zhang, Z., Ji, C., Xu, D., Chen, X., Tang, L., & Wang, Y. (2024). *Numerical Simulations of Impact River Morphology Evolution Mechanism Under the Influence of Floodplain Vegetation. Fluids*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/fluids9100243>
- Yuliana Wardani, F., Erwanto, Z., Yuni Ulfiyati, dan, Program Studi Teknik Sipil, M., Negeri Banyuwangi, P., Raya Jember Km, J., Kabat Banyuwangi, L., Banyuwangi, N., & Program Studi Teknik Sipil, D. (2018a). Studi Muatan *Suspended Load* Dan *Bed Load* Pada *Upstream* Bendung Di Hulu Sungai-Sungai Besar Kabupaten Banyuwangi. In *Maret* (Vol. 18, Number 1).

BIODATA PENULIS



Akhmad Fauzi Almudhoqi, yang akrab disapa Fauzi, lahir di Kabupaten Nganjuk pada 12 Februari 2003. Ia merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Pendidikan formal yang telah ditempuh meliputi SDN Embat-Embat I Nganjuk, SMPN 1 Pace Nganjuk, dan SMKN 1 Nganjuk. Saat menempuh pendidikan di SMKN 1 Nganjuk, Peneliti mengambil jurusan Desain Pemodelan dan Informasi Bangunan (DPIB). Pada saat mengenyam Pendidikan SMK Peneliti melakukan kegiatan Praktik Kerja Industri (Prakrin) di PT. Mitra Cipta Engineering Kota Surabaya. Pengalaman belajar di bidang tersebut menjadi awal ketertarikannya terhadap dunia konstruksi dan Teknik

Sipil. Setelah lulus SMK, pada tahun 2021, Peneliti memulai karier profesionalnya dengan bergabung kembali dalam perusahaan magang SMK sebelumnya di Kota Surabaya. Pengalaman bekerja di lingkungan profesional memberikan wawasan dan pengalaman praktis yang memperkuat pemahamannya mengenai perencanaan dan pelaksanaan proyek konstruksi. Di dalam Perusahaan sendiri Peneliti sering terlibat dalam pekerjaan-pekerjaan dibidang drainase perkotaan dan pembangunan rumah pompa. Hal inilah yang menjadi awal ketertarikannya dalam dunia Teknik Sipil khususnya bidang Keairan. Untuk mengembangkan kompetensi akademik dan profesionalnya, pada tahun 2022 Peneliti melanjutkan pendidikan jenjang Sarjana (S1) pada Program Studi Teknik Sipil di Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya. Selama menempuh pendidikan, Peneliti memiliki minat pada bidang keairan, terutama yang berkaitan dengan hidrologi, hidraulika, sistem drainase, pengelolaan sumber daya air, dan infrastruktur keairan. Selain aktif dalam kegiatan akademik, Peneliti juga memiliki ketertarikan untuk terus mengembangkan kemampuan di bidang perencanaan teknik, desain konstruksi, serta pemanfaatan teknologi dalam dunia teknik sipil. Baginya, pendidikan dan pengalaman kerja merupakan bekal penting untuk berkontribusi dalam pembangunan infrastruktur yang aman, berkelanjutan, dan bermanfaat bagi masyarakat. Melalui karya tulis ini, Peneliti berharap dapat memberikan kontribusi ilmu pengetahuan serta menjadi bagian dari pengembangan inovasi di bidang Teknik Sipil, khususnya pada bidang keairan.

Email : fauziakhmad079@gmail.com Whatsapp : 087745791667

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

L 1. Dokumentasi Pengambilan Data Lapangan

No.	Dokumentasi	Dokumentasi
1.	 Pengambilan Data Sedimen Dasar	 Data Sedimen Dasar
2.	 Pengambilan Data Sedimen Layang	 Data Sedimen Layang
3.	 12 Okt 2025 15.13.42 Wonorejo Kecamatan Rungkut Surabaya Jawa Timur	

L 2. Dokumentasi Uji Laboratorium

No.	Dokumentasi	Dokumentasi
1.	 Sedimen Dasar Lolos Saringan	 Pengeringan Sample Sedimen didalam oven
2.	 Hidrometer Test	 Data Sedimen Dasar

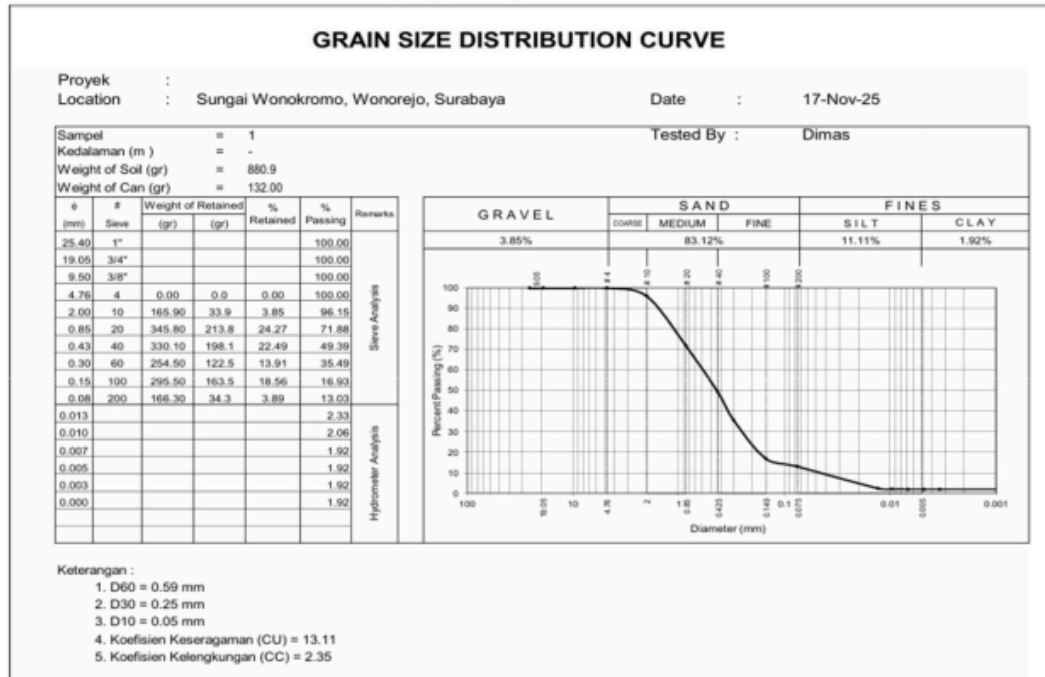
L 3. Hasil Uji Gradasi Butiran



Laboratorium Hidroteknik & Surveying
Departemen Teknik Infrastruktur Sipil
Fakultas Vokasi – Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus ITS Manyar Jl. Menur 127 Surabaya 60116
No. Telp. (031) 5947637

3. Hasil Uji Laboratorium *Bed Load*

Gradasi Butiran dan Hidrometer sedimen hasil pengujian disajikan dalam tabel berikut :



L 4. Hasil Uji Hidrometer



Laboratorium Hidroteknik & Surveying

Departemen Teknik Infrastruktur Sipil
Fakultas Vokasi – Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus ITS Manyar Jl. Menur 127 Surabaya 60116
No. Telp. (031) 5947637

2. Hasil Uji Laboratorium *Suspended Load*

Hasil uji laboratorium sampel *Suspended Load* disajikan dalam tabel berikut :

Location : Sungai Wonokromo, Wonorejo, Kota Surabaya				
Asal Material		Sungai Wonokromo	Sungai Wonokromo	Sungai Wonokromo
No. Tes		Titik A	Titik B	Titik C
Kandungan Sedimen	Berat Cawan + Air + Sedimen (Gram)	724.00	736.50	722.00
	Berat Cawan (Gram)	95.60	95.50	98.60
	Berat Cawan + Sedimen (Gram)	95.66	95.60	98.69
	Berat Sedimen (Gram)	0.06	0.10	0.09
	Kandungan Sedimen (%)	0.000095	0.000156	0.000144



Gambar 2.1 Sampel *suspended load* yang diuji

L 5. Debit Eksisting Observasi Lapangan

Jam ke-	<i>Time</i>	Debit Eksisting (m3)
0	11/10/2025 16:00	49,943
1	11/10/2025 17:00	40,583
2	11/10/2025 18:00	32,702
3	11/10/2025 19:00	30,058
4	11/10/2025 20:00	18.731
5	11/10/2025 21:00	-3,665
6	11/10/2025 22:00	-1,795
7	11/10/2025 23:00	-30,398
8	12/10/2025 00:00	-41,816
9	12/10/2025 01:00	29.942
10	12/10/2025 02:00	110,815
11	12/10/2025 03:00	112,487
12	12/10/2025 04:00	75,705
13	12/10/2025 05:00	52,525
14	12/10/2025 06:00	44,861
15	12/10/2025 07:00	44,783
16	12/10/2025 08:00	44,466
17	12/10/2025 09:00	39.757
18	12/10/2025 10:00	31,073
19	12/10/2025 11:00	19.115
20	12/10/2025 12:00	4,585
21	12/10/2025 13:00	-11,816
22	12/10/2025 14:00	-29.386
23	12/10/2025 15:00	-47,424
24	12/10/2025 16:00	-65,227

(Sumber : Pamungkas & Patriadi, 2025)

L 6. Debit Rencana Perum Jasa Tirta



Bulan	Debit
	(m ³ /detik)
Januari	62.79
Februari	55.77
Maret	60.64
April	36.89
Mei	54.78
Juni	49.13
Juli	35.30
Agustus	33.89
September	31.30
Oktober	36.94
November	66.13
Desember	51.41

(Sumber: Perum Jasa Tirta 1, 2025)

L 7. Tinggi Muka Air Observasi Lapangan

Jam ke-	Time	Observasi	
		(m)	(cm)
0	11/10/2025 16:00	11,904	0,119
1	11/10/2025 17:00	2,058	0,021
2	11/10/2025 18:00	-7,940	-0,079
3	11/10/2025 19:00	-15,964	-0,160
4	11/10/2025 20:00	-5,073	-0,051
5	11/10/2025 21:00	24,830	0,248
6	11/10/2025 22:00	63,236	0,632
7	11/10/2025 23:00	102,606	1,026
8	12/10/2025 00:00	126,539	1,265
9	12/10/2025 01:00	127,424	1,274
10	12/10/2025 02:00	108,554	1,086
11	12/10/2025 03:00	77,209	0,772
12	12/10/2025 04:00	44,339	0,443
13	12/10/2025 05:00	11,795	0,118
14	12/10/2025 06:00	-18,499	-0,185
15	12/10/2025 07:00	-43,920	-0,439
16	12/10/2025 08:00	-61,848	-0,618
17	12/10/2025 09:00	-70,708	-0,707
18	12/10/2025 10:00	-71,488	-0,715
19	12/10/2025 11:00	-65,561	-0,656
20	12/10/2025 12:00	-54,301	-0,543
21	12/10/2025 13:00	-39,080	-0,391
22	12/10/2025 14:00	-21,273	-0,213
23	12/10/2025 15:00	-2,253	-0,023
24	12/10/2025 16:00	16,607	0,166

(Sumber : Pamungkas & Patriadi, 2025)

L 8. Tinggi Muka Air Simulasi HEC-RAS

Jam ke-	Time	HEC-RAS	
		(m)	(cm)
0	11/10/2025 16:00	11,9	0,119
1	11/10/2025 17:00	6,9	0,069
2	11/10/2025 18:00	-4,3	-0,043
3	11/10/2025 19:00	-12,7	-0,127
4	11/10/2025 20:00	-4	-0,04
5	11/10/2025 21:00	24,7	0,247
6	11/10/2025 22:00	63,1	0,631
7	11/10/2025 23:00	101,3	1,013
8	12/10/2025 00:00	124,9	1,249
9	12/10/2025 01:00	128	1,28
10	12/10/2025 02:00	118,7	1,187
11	12/10/2025 03:00	92,2	0,922
12	12/10/2025 04:00	55	0,55
13	12/10/2025 05:00	19,6	0,196
14	12/10/2025 06:00	-10,6	-0,106
15	12/10/2025 07:00	-33,5	-0,335
16	12/10/2025 08:00	-49,4	-0,494
17	12/10/2025 09:00	-57,9	-0,579
18	12/10/2025 10:00	-61,9	-0,619
19	12/10/2025 11:00	-60,8	-0,608
20	12/10/2025 12:00	-53,6	-0,536
21	12/10/2025 13:00	-39,9	-0,399
22	12/10/2025 14:00	-25	-0,25
23	12/10/2025 15:00	-9,8	-0,098
24	12/10/2025 16:00	5,1	0,051

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

L 9. Tinggi Muka Air Simulasi Delft3D

Jam ke-	Time	Delft3D	
		(m)	(cm)
0	11/10/2025 16:00	11,90	0,119
1	11/10/2025 17:00	19,05	0,190
2	11/10/2025 18:00	5,41	0,054
3	11/10/2025 19:00	-3,73	-0,037
4	11/10/2025 20:00	0,37	0,004
5	11/10/2025 21:00	23,35	0,233
6	11/10/2025 22:00	62,47	0,625
7	11/10/2025 23:00	118,58	1,186
8	12/10/2025 00:00	103,01	1,030
9	12/10/2025 01:00	131,55	1,315
10	12/10/2025 02:00	136,29	1,363
11	12/10/2025 03:00	115,13	1,151
12	12/10/2025 04:00	73,78	0,738
13	12/10/2025 05:00	34,98	0,350
14	12/10/2025 06:00	4,05	0,041
15	12/10/2025 07:00	-17,33	-0,173
16	12/10/2025 08:00	-32,01	-0,320
17	12/10/2025 09:00	-43,31	-0,433
18	12/10/2025 10:00	-51,79	-0,518
19	12/10/2025 11:00	-56,27	-0,563
20	12/10/2025 12:00	-53,26	-0,533
21	12/10/2025 13:00	-43,45	-0,434
22	12/10/2025 14:00	-33,68	-0,337
23	12/10/2025 15:00	15,97	0,160
24	12/10/2025 16:00	32,02	0,320

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

L 10. Data Kecepatan Aliran di Titik 1

Jam ke-	Time	OBS (m/s)	HEC- RAS (m/s)	Delft3D (m/s)
0	11/10/2025 16:00		0,000	0,000
1	11/10/2025 17:00		0,492	0,604
2	11/10/2025 18:00		0,412	0,519
3	11/10/2025 19:00		0,389	0,491
4	11/10/2025 20:00		0,234	0,298
5	11/10/2025 21:00		0,048	0,060
6	11/10/2025 22:00		0,027	0,039
7	11/10/2025 23:00		0,289	0,112
8	12/10/2025 00:00		0,362	0,311
9	12/10/2025 01:00		0,25	0,293
10	12/10/2025 02:00		0,938	0,987
11	12/10/2025 03:00		1,035	1,103
12	12/10/2025 04:00		0,794	0,911
13	12/10/2025 05:00		0,616	0,752
14	12/10/2025 06:00		0,578	0,717
15	12/10/2025 07:00		0,617	0,758
16	12/10/2025 08:00		0,645	0,790
17	12/10/2025 09:00		0,598	0,744
18	12/10/2025 10:00	0,443	0,479	0,606
19	12/10/2025 11:00		0,295	0,380
20	12/10/2025 12:00		0,067	0,088
21	12/10/2025 13:00		0,172	0,224
22	12/10/2025 14:00		0,404	0,555
23	12/10/2025 15:00		0,624	0,770
24	12/10/2025 16:00		0,831	1,038

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

L 11. Data Kecepatan Aliran di Titik 2

Jam ke-	Time	OBS (m/s)	HEC-RAS (m/s)	Delft3D (m/s)
0	11/10/2025 16:00		0,000	0,000
1	11/10/2025 17:00		0,366	0,401
2	11/10/2025 18:00		0,306	0,340
3	11/10/2025 19:00		0,288	0,320
4	11/10/2025 20:00		0,176	0,200
5	11/10/2025 21:00		0,032	0,037
6	11/10/2025 22:00		0,014	0,019
7	11/10/2025 23:00		0,217	0,156
8	12/10/2025 00:00		0,282	0,382
9	12/10/2025 01:00		0,199	0,224
10	12/10/2025 02:00		0,734	0,757
11	12/10/2025 03:00		0,788	0,815
12	12/10/2025 04:00		0,591	0,630
13	12/10/2025 05:00		0,454	0,495
14	12/10/2025 06:00		0,423	0,458
15	12/10/2025 07:00		0,45	0,484
16	12/10/2025 08:00		0,468	0,495
17	12/10/2025 09:00		0,433	0,459
18	12/10/2025 10:00		0,347	0,369
19	12/10/2025 11:00	0,283	0,215	0,239
20	12/10/2025 12:00		0,05	0,057
21	12/10/2025 13:00		0,125	0,146
22	12/10/2025 14:00		0,298	0,370
23	12/10/2025 15:00		0,465	0,530
24	12/10/2025 16:00		0,621	0,726

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

L 12. Lembar Persetujuan Dosen Pembimbing



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA**

LEMBAR BIMBINGAN & PERSETUJUAN DOSEN PEMBIMBING
Periode Semester Genap 2025/2026

Nama	: Akhmad Fauzi Almudhoqi	
NIM	: 1432200022	
Alamat Rumah/Kost	: RT.02, RW.02, dsn. Jogasan, ds. Batembat, kec. Pace, kab. Nganjuk	
Nomor HP/Whatsapp	: 087745791667	
Dosen Pembimbing 1	: Dr. Andi Patriadi, S.T., M.T.	
Dosen Pembimbing 2	: -	
Tanggal Pembekalan TA	: Kamis, 29 Januari 2026	
Publikasi Artikel Ilmiah		Paraf Koor TA
Nama Jurnal/Seminar	: Jurnal Teknik Industri Perintegrasi (Jurni)	
Link Jurnal	: -	
Tanggal Publish	: -	

Judul Tugas Akhir:

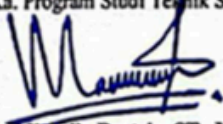
**ANALISIS POLA EROSI-DEPOSISI TERHADAP DAMPAK PERUBAHAN DEBIT BANJIR
BELOKAN SUNGAI WONOKROMO MENGGUNAKAN SOFTWARE DELFT3D**

Dosen Pembimbing 1  (Dr. Andi Patriadi, S.T., M.T.)	Dosen Pembimbing 2 <i>(Kosongkan Bila tidak ada pembimbing ke 2)</i> (Nama Dosen Pembimbing 2)	Persetujuan Koordinator TA  (Dr. Ir. Dika Ayu Safitri, ST., MT., Ph.D)
--	---	--

Keterangan :

1. Bimbingan WAJIB dilakukan minimal 2 minggu sekali
2. Mahasiswa WAJIB sudah melakukan bimbingan dan publikasi jurnal / seminar nasional / internasional yang terakreditasi
3. Segala bentuk pelanggaran dapat dikenakan sanksi dari Program Studi Teknik Sipil Untag Surabaya

Mengetahui,
Ka. Program Studi Teknik Sipil



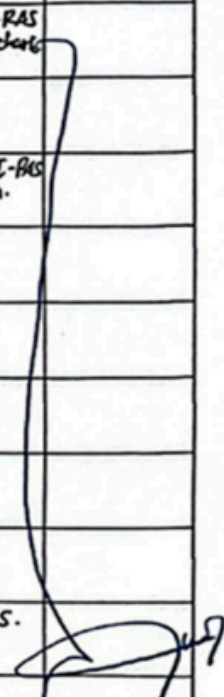
(Ir. Michella Beatrix, ST., MT.)

L 13. Lembar Bimbingan



PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA

LEMBAR BIMBINGAN TUGAS AKHIR

Minggu	No	Tanggal	Uraian Perbaikan / Konsultasi	Paraf Dosen Pembimbing
Ke - 1 dan 2 Perkuliahan	1.	05/03 2026	- Permodelan angkutan sedimen di HEC-RAS - penambahan uraian HECRAS pada flowchart	
	2.	06/03 2026	- Permodelan Angkutan Sedimen di HEC-RAS lanjutkan, penambahan cross per 20 m.	
Ke - 3 dan 4 Perkuliahan	3.	10/03 2026	- RAS Ok. lanjut mengerjakan jurnal dan Delft 3D	
	4.	13/03 2026	- Revisi pemodelan di Hec RAS, kritik observasi sesuai lapangan.	
Ke - 5 dan 6 Perkuliahan	5.	1/04 2026	- Revisi Permodelan Delft 3D. dan RAS. - Revisi jurnal	
	6.	3/04 2026	- Revisi Permodelan delft 3D. - minta data ke jasa tirta.	
Ke - 7 dan 8 Perkuliahan	7.	10/04 2026	- Revisi Permodelan Delft 3D - Dunning jurnal.	
	8.	17/04 2026	- Revisi jurnal 1, pendahuluan lebih spesifik.	



PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA

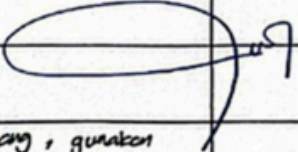
LEMBAR BIMBINGAN TUGAS AKHIR

Minggu	No	Tanggal	Uraian Perbaikan / Konsultasi	Paraf Dosen Pembimbing
Ke - 9 dan 10 Perkuliahahan	9.	20/01 2026	- ReVisi Jurnal .	
	10.	21/01 2026	- ReVisi Jurnal - laporan TA dilanjutkan BAB IV	
Ke - 11 dan 12 Perkuliahahan	11.	23/01 2026	- ReVisi pemodelan Delft 3D	
	12.	24/01 2026.	- ReVisi pemodelan Delft 3D	
Ke - 13 dan 14 Perkuliahahan	13.	28/01 2026.	- ReVisi pemodelan Delft 3D	
	14.	29/01 2026	- Validasi data dr , lanjut Jurnal dan laporan.	
Ke - 15 Perkuliahahan	15.	04/05 2026	- Perkecil lagi Grid dan H Smakness serta M. orgonality perkecil lagi	
	16.	06/05 2026	- Jurnal Revisi lagi , laporan Revisi BAB IV	



PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA

LEMBAR BIMBINGAN TUGAS AKHIR

Minggu	No	Tanggal	Uraian Perbaikan / Konsultasi	Paraf Dosen Pembimbing
	17.	7/05 2026	- Revisi jurnal .	
	18.	8/05 2026	- Simulasi Delft ulang , gunakan data debit konstan .	
	19.		Daftar Riwayat IA	18/5 2026

L 14 Perintah Revisi Sidang Tugas Akhir



PROGRAM STUDI SI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA
Jl. Semolowaru No. 45, Surabaya 60118
Homepage : www.sipil.untag-sby.ac.id Email : sipil@untag-sby.ac.id

Lampiran 3

PERINTAH REVISI SIDANG TUGAS AKHIR (SESI 2)
TAHUN AKADEMIK GENAP 2025/2026

Yang bertandatangan di bawah ini, Dosen Penguji Sidang Tugas Akhir (TA) pada tanggal **Rabu, 03 Juni 2026** dari Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil :

Nama Mahasiswa : Akhmad Fauzi Almudhoqi
NBI/NIM : 1432200022
Judul : Analisis Pola Erosi-Deposisi Terhadap Dampak Perubahan Debit Banjir Belokan Sungai Wonokromo Menggunakan Software Delft3D

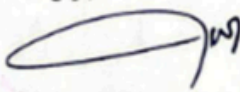
Memerintahkan untuk memperbaiki dokumen Tugas Akhir (TA) Sebagai berikut :

No	URAIAN PERBAIKAN	PARAF DOSEN (setelah perbaikan)
1.	Tabel 4.2G - 4.30 → lengkapi satuan. semua tabel cek kembali ✓	 4/6/2026
2	Validasi konsentrasi sedimen tabel. 13g ✓	

Dari Sidang Tugas Akhir yang telah dilakukan maka mahasiswa dinyatakan:

☐ : Lulus tanpa perbaikan
☒ : Lulus dengan perbaikan
☐ : Dilakukan Sidang TA ulang

(Dosen Penguji dapat memberikan tanda centang (✓) pada kotak yang tersedia)

Surabaya, 03 Juni 2026
 Penguji,

(Dr. Andi Patriadi, S.T., M.T.)



Lampiran 3

**PROGRAM STUDI SI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA**

Jl. Semolowaru No. 45, Surabaya 60118
Homepage : www.sipil.untag-sby.ac.id Email : sipil@untag-sby.ac.id

**PERINTAH REVISI SIDANG TUGAS AKHIR (SESI 2)
TAHUN AKADEMIK GENAP 2025/2026**

Yang bertandatangan di bawah ini, Dosen Penguji Sidang Tugas Akhir (TA) pada tanggal **Rabu, 03 Juni 2026** dari Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil :

Nama Mahasiswa : Akhmad Fauzi Almudhoqi

NBI/NIM : 1432200022

Judul : Analisis Pola Erosi-Deposisi Terhadap Dampak Perubahan Debit Banjir Belokan Sungai Wonokromo Menggunakan Software Delft3D

Memerintahkan untuk memperbaiki dokumen Tugas Akhir (TA) Sebagai berikut :

No	URAIAN PERBAIKAN	PARAF DOSEN (setelah perbaikan)
	Lengkapi visualisasi sedimentasi pada laporan TA. sesuaikan antara pustaka yg ditulis dengan bab 4 yang dibahas. ✓ Fokuskan pada titik tikungan ✓ Perbaiki tampilan gambar dan tabel ✓ Jelaskan setiap grafik dan tabel yg digambarkan. Kesimpulan ditulis lebih singkat ✓	 17 Juni 2026

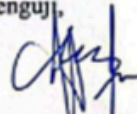
Dari Sidang Tugas Akhir yang telah dilakukan maka mahasiswa dinyatakan:

- ☐ : Lulus tanpa perbaikan
☒ : Lulus dengan perbaikan
☐ : Dilakukan Sidang TA ulang

(Dosen Penguji dapat memberikan tanda centang (✓) pada kotak yang tersedia)

Surabaya, 03 Juni 2026

Penguji,



(Ir. Laili Endah Fatmawati, S.T., M.T.)



Lampiran 3

**PROGRAM STUDI SI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA**

Jl. Semolowaru No. 45, Surabaya 60118
Homepage : www.sipil.untag-sby.ac.id Email : sipil@untag-sby.ac.id

**PERINTAH REVISI SIDANG TUGAS AKHIR (SESI 2)
TAHUN AKADEMIK GENAP 2025/2026**

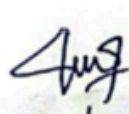
Yang bertandatangan di bawah ini, Dosen Penguji Sidang Tugas Akhir (TA) pada tanggal Rabu, 03 Juni 2026 dari Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil :

Nama Mahasiswa : Akhmad Fauzi Almudhoqi

NBI/NIM : 1432200022

Judul : Analisis Pola Erosi-Deposisi Terhadap Dampak Perubahan Debit Banjir Belokan Sungai Wonokromo Menggunakan Software Delft3D

Memerintahkan untuk memperbaiki dokumen Tugas Akhir (TA) Sebagai berikut :

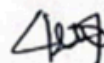
No	URAIAN PERBAIKAN	PARAF DOSEN (setelah perbaikan)
	- Daftar pustaka yang ada font yg besar semua ✓ - hal pada Nama Bab trans di bawah tengah ✓ - Dalam analisis bab 9 Tambahkan referensi dalam membahas baik referensi yg menunjang ataupun yg tidak ✓	 17 Juni 2026

Dari Sidang Tugas Akhir yang telah dilakukan maka mahasiswa dinyatakan:

- ☐ : Lulus tanpa perbaikan
☒ : Lulus dengan perbaikan
☐ : Dilakukan Sidang TA ulang

(Dosen Penguji dapat memberikan tanda centang (✓) pada kotak yang tersedia)

Surabaya, 03 Juni 2026
Penguji,



(Dr. Ir. Nurul Rochmah, S.T., M.T., M.Sc.)

L 15 Bukti Persentase Plagiasi Laporan Tugas Akhir

qTtn-TA-Turnitin.pdf

ORIGINALITY REPORT

11%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	digilib.uinsa.ac.id Internet	1137 words — 3%
2	ojs.pnb.ac.id Internet	468 words — 1%
3	123dok.com Internet	413 words — 1%
4	repository.untag-sby.ac.id Internet	402 words — 1%
5	repository.its.ac.id Internet	229 words — 1%
6	journal.umy.ac.id Internet	193 words — < 1%
7	docplayer.info Internet	162 words — < 1%
8	ejournal-balitbang.kkp.go.id Internet	157 words — < 1%
9	repository.unsulbar.ac.id Internet	157 words — < 1%
10	dspace.uui.ac.id Internet	139 words — < 1%

repository.umsu.ac.id

L 16. *Letter of Acceptance* (LoA) Jurnal Publikasi

Terbit online pada laman web jurnal : <https://journal.universitaspahlawan.ac.id/index.php/jutin>

**Jurnal Teknik Industri Terintegrasi
(JUTIN)**

Jl. Tuanku Tambusai No. 23 Bangkinang, Riau

[e-ISSN (Online) 2620-8967]



LETTER OF ACCEPTANCE (LoA)

Nomor. 58397/JUTIN/TIN-FT/UPTT/VI/2026

Dewan penyunting Jurnal JUTIN telah menerima artikel,

Nama : Aris Fiatno, M.T
Jabatan : Editor in Chief Jurnal Teknik Industri Terintegrasi (JUTIN)
Institusi : Universitas Pahlawan Tuanku Tambusai
Terindeks : Google Scholar, Portal Garuda, Crossref, SINTA (Grade 5)

Dengan ini menerangkan bahwa artikel dengan judul :

**Simulasi Hidrodinamika pada Tikungan Sungai
Wonokromo Surabaya Menggunakan Delft 3D**

Nama : Akhmad Fauzi Almudhoqi⁽¹⁾, Andi Patriadi¹
Asal Instansi : ⁽¹⁾Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya

Menyatakan bahwa artikel tersebut **telah diproses** sesuai Prosedur Penulisan dan **akan publish** pada **Jurnal Teknik Industri Terintegrasi (JUTIN)** Volume 9 Nomor 3 Tahun 2026.

Demikian surat keterangan ini dibuat dan harap dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Bangkinang, 23 Juni 2026

Yang membuat pernyataan



Aris Fiatno, M.T

L 17 Lembar Publikasi Jurnal Ilmiah Tugas Akhir

Periode : Gasal/Genap th.....

LEMBAR PUBLIKASI TUGAS AKHIR

Nama	:	Akhnad Fauzi Almudhoqi					
NBI / NIM	:	1432200022					
Nomor WA	:	0877 4579 1667					
Email	:	fauzi almudhoqi@gmail.com					
Judul Publikasi	:						
Pemilihan Publikasi	:	Seminar Nasional ☐		Seminar Internasional ☐			
		Jurnal Nasional Terindeks ☒	S5 ☒	S4 ☐	S3 ☐	S2 ☐	
		Jurnal Internasional ☐					
		Media Massa ☐					

PUBLIKASI SEMINAR

Tema/Judul Seminar	:	
Jenis Seminar	:	(Nasional/Internasional)
Judul Paper	:	
Tanggal Pelaksanaan	:	
Penyelenggara	:	

PUBLIKASI JURNAL ILMIAH

Nama Jurnal	:	Jurnal Teknik Industri Terintegrasi (JTIN)
ISSN	:	2620 - 8962
Tahun	:	2026
Volume	:	-
Nomor	:	-
Penerbit	:	Universitas Pahlawan
DOI	:	
Nama Penulis	:	1. Akhnad Fauzi Almudhoqi
		2. Andi Patriadi
		3.
		4.

PUBLIKASI MEDIA MASSA

Nama Media Massa	:	
Link Publikasi Media Massa	:	
Tanggal Terbit	:	

LEMBAR BIMBINGAN PUBLIKASI ILMIAH

No	Tanggal	Uraian	Paraf
		Perbaiki domain Untag.	
		Acc Jurnal → Sinta 5	

Disetujui oleh,
Koordinator Publikasi Tugas Akhir



Ir. Faradlillah Saves, ST., MT.

L 18 Bukti Persentase Plagiasi Jurnal Tugas Akhir

0_JUTIN-Fauzi-Oke-1fgu7diY.pdf

ORIGINALITY REPORT

14%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	journal.universitaspahlawan.ac.id Internet	79 words — 2%
2	repository.untag-sby.ac.id Internet	66 words — 2%
3	www.mdpi.com Internet	41 words — 1%
4	eprints.umg.ac.id Internet	39 words — 1%
5	www.netnest.com.au Internet	33 words — 1%
6	repository.its.ac.id Internet	19 words — 1%
7	www.researchgate.net Internet	18 words — 1%
8	emrlibrary.gov.yk.ca Internet	16 words — < 1%
9	eprints.upnjatim.ac.id Internet	13 words — < 1%
10	D.R.H. Jones. "Analysis of a fatal bungee-jumping accident", Engineering Failure Analysis, 2004 Crossref	12 words — < 1%

BUKTI KORESPONDENSI

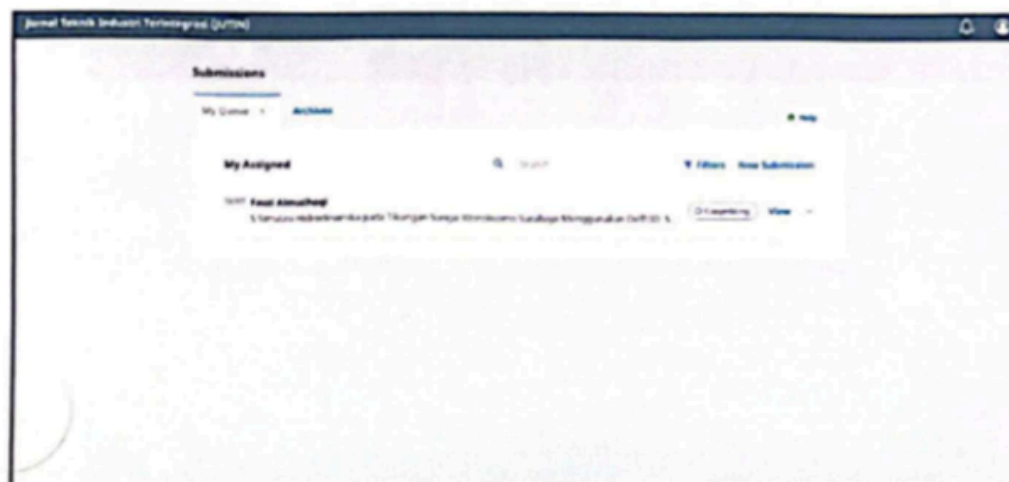
ARTIKEL JURNAL NASIONAL BEREPUTASI

Judul Artikel	: Simulasi Hidrodinamika pada Tikungan Sungai Wonokromo -
Jurnal	: Jurnal Teknik Industri terintegrasi (JUTIN)
Penulis (email)	: 193220022@surel.untag-sby.ac.id
	:
	:
	:
Submission Files (Journal)	: Sehin, 11 - 05 - 26
Pemberitahuan Penerimaan Artikel	: 11-05 - 26
Bukti konfirmasi review dan hasil review pertama	: 21 - 05 - 26
Bukti konfirmasi dan submit revisi	: 12 - 06 - 26
Bukti Accept Submitted Revision Article	: 18 - 06 - 26
Bukti Pengiriman LoA	: 23 - 06 - 26
Bukti konfirmasi artikel published	: -

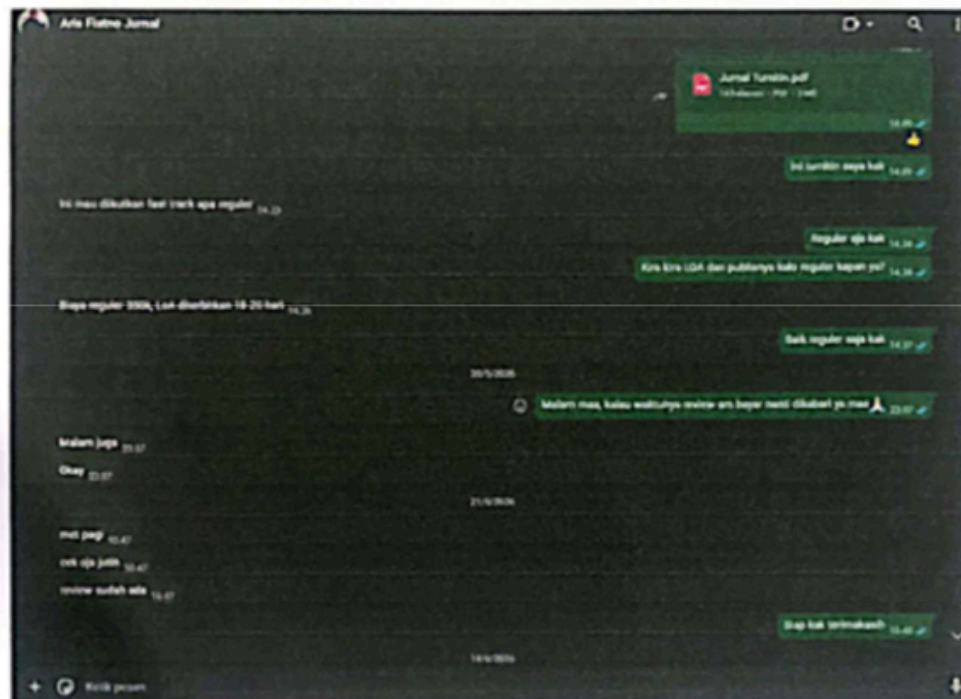
LAMPIRAN KORESPONDENSI JURNAL

1. Bukti Submission (Submit Jurnal)
2. Notifikasi Accepted Submission (Bukti respon editor jurnal ter submit dan memberikan review)
3. Notifikasi Resubmit Untuk Review (Bukti mengirimkan hasil perbaikan jurnal dari reviewer)
4. Notifikasi Accepted Submission Revision (Bukti submit hasil perbaikan diterima)
5. Review From Reviewer (bukti review final dari editor/reviewer)
6. Notifikasi LoA (Bukti penerimaan LoA dari Editor/Reviewer Jurnal)
7. LoA (FILE LoA)
8. Bukti Konfirmasi Artikel Publish (File Bukti Konfirmasi Jurnal Sudah Terpublish)
9. Jurnal (File Jurnal terpublish)
10. Bukti Turnitin (Max 20%)

1. Submission



2. Review



Understanding Urban River Dynamics: How Technology Helps Manage Flood Risks and River Changes in Surabaya



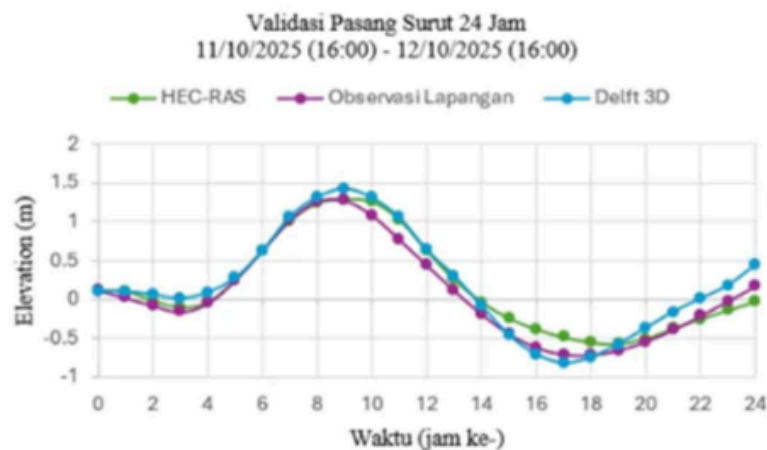
Fauziamudhoqi

Follow

4 min read · May 11, 2026



Rivers are more than just flowing water. They shape cities, support ecosystems, carry sediment, and help protect communities from flooding. In many urban areas, however, rivers are under increasing pressure from population growth, land development, and changing environmental conditions. One example can be found in Wonokromo River, a river that plays an important role in the water system of Surabaya.





Program Studi S1 Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya

Alamat : Jl. Semolowaru No. 45 Surabaya 60118

Homepage : www.sipil.untag-sby.ac.id

E-mail : sipil@untag-sby.ac.id

Nomor : 0165/K/TS/V/2026

Lamp. : 1 berkas

Perihal : ***Permohonan Surat Tugas Panitia Kegiatan Bakti Sosial
Semester Genap 2025/2026***

Kepada : Yth. Dekan Fakultas Teknik
Universitas 17 Agustus 1945
S u r a b a y a

Dengan Hormat,

Sehubungan dengan akan dilaksanakan Kegiatan Civil Connect: Peduli dan Menginspirasi Periode Genap 2025/2026 bagi Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya dengan tema: "***Dari Teknik Sipil untuk Anak Negeri: Peduli dan Menginspirasi demi Generasi yang Lebih Baik***", maka kami selaku Ka. Prodi Teknik Sipil ingin mengajukan Surat Tugas untuk Panitia dari kegiatan tersebut. Adapun jadwal pelaksanaan Kegiatan Civil Connect: Peduli dan Menginspirasi Periode Genap 2025/2026 sebagai berikut :

Hari/tanggal	: Sabtu, 27 Juni 2026
Waktu	: 09.00 - 12.00 WIB
Tempat	: UPTD Kampung Anak Negeri, Kalijudan Jalan Villa Kalijudan Indah XV No.Kav. 2-4, Surabaya

Demikian surat permohonan ini kami buat, atas perkenan dan juga kerja samanya diucapkan terimakasih

Surabaya, 18 Mei 2026

Ka. Prodi Teknik Sipil

Ir. Michella Beatrix, ST., MT
NPP. 2043F.15.0660

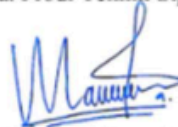
Daftar Nama Panitia Bakti Sosial
Periode Genap 2025/2026
Program Studi Teknik Sipil
Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya

Periode/Tanggal : 27 Juni 2026

Nama	NPP/NBI	Struktur Panitia
Ir. Michella Beatrix, ST., MT	(2043F.15.0660)	Penanggungjawab Umum
Dr. Ir. Dika Ayu Safitri, ST., MT., Ph.D	(20430.15.0655)	Pembimbing HIMASIPTA
Mochamad Firmansyah, ST., MT	(20430.24.0894)	Dosen Pembimbing Kegiatan
Riska Carollina, SE	(23.8690)	Admin Pelaksana
Riki Saputra	(1432400071)	Penanggung Jawab
Rama Aji Zulkhifli	(1432400110)	Ketua Pelaksana
Franzeska Dekasi Tunti	(1432500037)	Sekretaris
Yuliana Sitompul	(1432500091)	Bendahara
Rafik Dwi Saktiawan	(1432400025)	Sie Acara
muhammad ilham Arifin	(1432200126)	
Yulia Dwi Elyana	(1432200083)	
Abdul Jawad	(1432200092)	
Femas Putra Bagaskara	(1432200085)	
M. Luthfi Hamzah	(1432000011)	Sie Humas
Istifaiah	(1432200125)	
Falah Faustabi Akbar	(1432200129)	
Aldy Bagus Amarulloh	(1431900136)	
Muhammad Rosyid Assabili	(1432200065)	
Widinanta Emir Assidiqi	(1432200013)	Sie Pudekdok
Akhmad Fauzi Almudhoqi	(1432200022)	
Ilham Aditya A	(1432200137)	
Risky Surya Ardiansyah	(1432200009)	
Ahmad Dafit	(1432200016)	
Candra Diri Saka	(1432200002)	
Moch Andre Darmawan	(1432200069)	Sie Perlengkapan
Vicky Kheir Riva	(1432100065)	
Mohammad Iqbal	(1431900045)	
M. alvan mashuri al irsyad	(1432200108)	

Nama	NPP/NBI	Struktur Panitia
Ryan Marya Rachmawan Putra	(1432200076)	Sie Perlengkapan
Rifky Darmawan	(1432200109)	
Alfina Jana Vian Duri	(1432100132)	
M Fais Hidayatulloh	(1432200058)	
Mochammad Adi Prasetyo	(1432200067)	
Mohamad Dicky Saputra	(1432200132)	
Fitriyanti Cahya Ningrum	(1432200117)	Sie Konsumsi
Arfi Wahyu Pratama	(1432200098)	
Ahmad Choirun Nidak	(1432200021)	
Andra Satria Pratama	(1432200004)	
Miftakul Huda	(1432200005)	
Rajib Rizkul Hidayatullah	(1432200047)	
Aldi Bayu Winata	(1432500026)	Sie Keamanan
Conrad Esguerra Jordy Beoang	(1432000057)	
Adrian Setyo Nugroho	(1432200070)	
iqbal hayes gavrela	(1432100083)	
Dzaki Arif Fikri	(1432000006)	
Mahmud Dwi wardoyo	(1432200041)	
Handy Surya S	(1432200038)	

Surabaya, 18 Mei 2026
Ka. Prodi Teknik Sipil



Ir. Michella Beatrix, ST., MT
NPP. 2043F.15.0660

ANALISIS POLA EROSI-DEPOSISI TERHADAP DAMPAK PERUBAHAN DEBIT BANJIR BELOKAN SU WONOKROMO MENGGUNAKAN SOFTWARE DELFT3D

ORIGINALITY REPORT

15%

SIMILARITY INDEX

13%

INTERNET SOURCES

4%

PUBLICATIONS

5%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1

digilib.uinsa.ac.id

Internet Source

2

Submitted to Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya

Student Paper

3

ojs.pnb.ac.id

Internet Source

4

repository.its.ac.id

Internet Source

5

123dok.com

Internet Source

6

repository.untag-sby.ac.id

Internet Source

7

journal.umy.ac.id

Internet Source

8

ejournal-balitbang.kkp.go.id

Internet Source

9

repository.unsulbar.ac.id

Internet Source

10

repository.unej.ac.id

Internet Source

11

Fadhoilus Shofi, Wahyu Agung Setio Prabowo, Amalia Rosada. "Transformasi Transa Keuangan Digital: Pengaruh Penggunaan Sistem Pembayaran Non-Tunai terhadap Kinerja Keuangan UMKM di Kabupaten Pamekasan", RIGGS: Journal of Artificial Intelligence and Digital Business, 2026

Publication

12

jurnalnasional.ump.ac.id

Internet Source

13

docplayer.info

Internet Source

14

teras.unimal.ac.id

Internet Source

15 Ram P. Neupane, Joseph D. White, Sara E. Alexander. "Projected hydrologic changes monsoon-dominated Himalaya Mountain basins with changing climate and deforestation", Journal of Hydrology, 2015
Publication

16 repository.ub.ac.id
Internet Source

17 bappeda.banyuwangikab.go.id
Internet Source

18 digilib.unila.ac.id
Internet Source

19 repository.ppns.ac.id
Internet Source

20 Submitted to Universitas Bengkulu
Student Paper

21 repository.unissula.ac.id
Internet Source

22 jurnal.untan.ac.id
Internet Source

23 Eka Kusuma Putra, Kharistya Amaru, Dwi Rustam Kendarto. "Pengaruh Perubahan Tutupan Lahan terhadap Respon Hidrologi di Sub Daerah Aliran Sungai Cimeta Menggunakan Model Soil and Water Assessment Tool (SWAT)", JURNAL TRITON, 2021
Publication

24 digilib.uinsby.ac.id
Internet Source

25 Submitted to UPN Veteran Yogyakarta
Student Paper

26 Submitted to Universitas Islam Riau
Student Paper

27 irjet.net
Internet Source

28 ojs.unm.ac.id
Internet Source

29 Syam Syamsudin, Arie Antasari Kushadiwijayanto, Risiko Risiko. "Studi Batimetri dan Pasang Surut Di Kawasan Perairan Batu Burung Kota Singkawang Selatan Kalimantan Barat", Jurnal Laut Khatulistiwa, 2020
Publication

30 repository.uinjkt.ac.id
Internet Source

repository.ump.ac.id

31

Internet Source

32

text-id.123dok.com

Internet Source

33

Submitted to Universitas Muslim Indonesia

Student Paper

34

Ezzy Yuanita, Doddi Yudianto. "Pemodelan Dispersi Fosfat dan Evaluasi Strategi Mitig Pencemaran Limbah Deterjen Domestik di Saluran Irigasi Cibarani Menggunakan HE RAS", JURNAL SUMBER DAYA AIR, 2026

Publication

35

digilibadmin.unismuh.ac.id

Internet Source

36

dspace.uui.ac.id

Internet Source

37

etheses.uin-malang.ac.id

Internet Source

38

Muhammad Taufiq Makmur Zainuddin, Irmanto Irmanto, Joko Nugroho, Waluyo Hatmoko. "PEMODELAN SEDIMENTASI MENGGUNAKAN HEC-RAS 6.1 UNTUK MENGANALISIS PERUBAHAN ELEVASI DASAR SUNGAI TONDANO, SULAWESI UTARA" JURNAL TEKNIK HIDRAULIK, 2023

Publication

39

Submitted to Universitas Diponegoro

Student Paper

40

Ahmad Reski Awaluddin, Nur Fitriani Maskur, Hadi Abdurrahman, Rahmiyatal Munaj "Perubahan Morfologi Sungai Lariang: Analisis Spasiotemporal dengan Pendekatan Penginderaan Jauh", Jurnal Peweka Tadulako, 2025

Publication

41

repository.uma.ac.id

Internet Source

42

ejournal.unsrat.ac.id

Internet Source

43

gurumuda.net

Internet Source

44

id.123dok.com

Internet Source

45

jurnalth.pusair-pu.go.id

Internet Source

46

Submitted to Syiah Kuala University

Student Paper

47 Xinyu Huang, Jun Tang, Yanlong Zhao, Yongming Shen, Qingyi Meng. "Evolution prediction and spatiotemporal analysis of suspended sediment distribution in the Li River estuary – a deep learning perspective", Journal of Hydrology, 2026
Publication

48 dspace.umkt.ac.id
Internet Source

49 pdfcoffee.com
Internet Source

50 Submitted to FAKULTAS TEKNIK
Student Paper

51 ejournal2.pnp.ac.id
Internet Source

52 www.scribd.com
Internet Source

53 Submitted to Program Pascasarjana Universitas Negeri Yogyakarta
Student Paper

54 Submitted to Universitas Negeri Surabaya The State University of Surabaya
Student Paper

55 eprints.polsri.ac.id
Internet Source

56 jurnal.itg.ac.id
Internet Source

57 repository.ar-raniry.ac.id
Internet Source

58 www.nafiun.com
Internet Source

59 Z Erwanto, D Dwi Pranowo, D S W P J Widakdo, N S R Wilujeng. "The Influence of Sediment Loads on the Irrigation Discharge in The Upstream and Downstream of the Major River in Banyuwangi Regency", IOP Conference Series: Earth and Environment Science, 2018
Publication

60 eprints.unimudasorong.ac.id
Internet Source

61 journal.unair.ac.id
Internet Source

62 perikanaanbdp.blogspot.com
Internet Source

63 Submitted to Murdoch University
Student Paper

64 Submitted to Universitas Gadjah Mada
Student Paper

65 doaj.org
Internet Source

66 e-journals2.unmul.ac.id
Internet Source

67 putra14790.wordpress.com
Internet Source

68 repositori.usu.ac.id
Internet Source

69 repository.upnjatim.ac.id
Internet Source

70 "Impacts of Climate Change on Fish Biological Integrity within the Saginaw Bay Watershed", ASABE 1st Climate Change Symposium Adaptation and Mitigation, 2015
Publication

71 Submitted to Universitas Andalas
Student Paper

72 Submitted to Defense University
Student Paper

73 Submitted to Fakultas Ekonomi Universitas Indonesia
Student Paper

74 Submitted to Universitas Muhammadiyah Makassar
Student Paper

75 kc.umn.ac.id
Internet Source

76 Rukhsana Sarkar, Asraful Alam, Azizur Rahman Siddiqui. "Agriculture and Climatic Issues in South Asia - Geospatial Applications", CRC Press, 2023
Publication

77 doku.pub
Internet Source

78 etd.repository.ugm.ac.id
Internet Source

79 geomatejournal.com
Internet Source

80 Submitted to UIN Sunan Ampel Surabaya
Student Paper

81 Submitted to Universitas Muhammadiyah Purwokerto
Student Paper

82

Submitted to Universitas Muhammadiyah Surakarta

Student Paper

83

Submitted to Universitas Trunojoyo

Student Paper

84

journal.aptii.or.idInternet Source

85

eprints.itenas.ac.idInternet Source

86

id.scribd.comInternet Source

87

iptek.its.ac.idInternet Source

88

pubhtml5.comInternet Source

89

repository.um-surabaya.ac.idInternet Source

90

archive.orgInternet Source

91

eprints.uny.ac.idInternet Source

92

grips.repo.nii.ac.jpInternet Source

93

jizaf.blogspot.comInternet Source

94

repository.uksw.eduInternet Source

95

suprayitnoadi.blogspot.comInternet Source

96

vuir.vu.edu.auInternet Source

97

Submitted to Fakultas Teknik

Student Paper

98

Harmesa Harmesa. "TEKNIK-TEKNIK REMEDIASI SEDIMEN TERKONTAMINASI LOGAM BERAT", OSEANA, 2020

Publication

99

Indry S. Sepang, Jeffry D. Mamoto, Arthur H. Thambas. "Analisis Pasang Surut Di Kawasan Pantai Budo Desa Budo Kecamatan Wori Kabupaten Minahasa Utara", TEKNO, 2024

- 100 Saat Mubarrok, Ivonne Milichristi Radjawane, Tiara Syella Angelina Manikape. "IDENTIFIKASI KOMPONEN PASANG SURUT PERAIRAN DANGKAL DAN PERIODE PANJANG DI WILAYAH PERAIRAN INDONESIA", Jurnal Riset Kelautan Tropis (Journal C Tropical Marine Research) (J-Tropimar), 2025
Publication
-

- 101 briodharmawan.wordpress.com
Internet Source
-

- 102 csdms.colorado.edu
Internet Source
-

- 103 daerah.sindonews.com
Internet Source
-

- 104 docobook.com
Internet Source
-

- 105 eprints.iain-surakarta.ac.id
Internet Source
-

- 106 fr.scribd.com
Internet Source
-

- 107 ig.dgip.go.id
Internet Source
-

- 108 jurnal.borneo.ac.id
Internet Source
-

- 109 new.jurnal.untad.ac.id
Internet Source
-

- 110 repo.itera.ac.id
Internet Source
-

- 111 repositorio.udh.edu.pe
Internet Source
-

- 112 repository.dinamika.ac.id
Internet Source
-

- 113 repository.iti.ac.id
Internet Source
-

- 114 repository.unbari.ac.id
Internet Source
-

- 115 repository.unmuhpnk.ac.id
Internet Source
-

- 116 tpa.fateta.unand.ac.id
Internet Source
-

117 Arif Senoaji, S.B. Soeryamassoeka, Danang Gunarto. "MAPPING OF FLOOD-PRONE AREA UNDER IMPACT OF TIDAL INFLUENCE IN SINGKAWANG CITY", Jurnal Teknik Sip 2024
Publication

118 Submitted to Sriwijaya University
Student Paper

119 Steven Steven, Muliddin Muliddin, Ali Okto. "Kontrol geologi terhadap kualitas air di Kecamatan Pomalaa Kabupaten Kolaka Sulawesi Tenggara", OPHIOLITE : Jurnal Geol Terapan, 2021
Publication

120 acopen.umsida.ac.id
Internet Source

121 bandung-training.com
Internet Source

122 ecolearningcamp.org
Internet Source

123 ejournal.uniks.ac.id
Internet Source

124 eprints.binadarma.ac.id
Internet Source

125 eprints.ui.ac.id
Internet Source

126 eprints.ums.ac.id
Internet Source

127 es.scribd.com
Internet Source

128 etd.umy.ac.id
Internet Source

129 fexdoc.com
Internet Source

130 fly333.wordpress.com
Internet Source

131 hermands.id
Internet Source

132 issuu.com
Internet Source

133 journal.widyatama.ac.id
Internet Source

134 jurnal.univpgri-palembang.ac.id

Internet Source

135 repositori.uin-alauddin.ac.id

Internet Source

136 repository.narotama.ac.id

Internet Source

137 repository.umj.ac.id

Internet Source

138 repository.unj.ac.id

Internet Source

139 repository.upi.edu

Internet Source

140 scholar.unand.ac.id

Internet Source

141 summer-absolutely.icu

Internet Source

142 www.coursehero.com

Internet Source

143 www.ejournal-s1.undip.ac.id

Internet Source

144 www.tomatalikuang.com

Internet Source

145 Uray Muchlis Abdurahman, Muliadi Muliadi, Dwi Imam Prayitno. "Studi Karakteristik Hidro-Oseanografi Perairan Muara Sungai Duri Kabupaten Bengkayang", Jurnal Laut Khatulistiwa, 2024

Publication

146 idoc.pub

Internet Source

147 journal.trunojoyo.ac.id

Internet Source

148 moam.info

Internet Source

149 qdoc.tips

Internet Source

Exclude quotes

On

Exclude bibliography

On

Exclude matches

Off

ANALISIS POLA EROSI-DEPOSISI TERHADAP DAMPAK PERUBAHAN DEBIT BANJIR BELOKAN SU WONOKROMO MENGGUNAKAN SOFTWARE DELFT3D

GRADEMARK REPORT

FINAL GRADE

GENERAL COMMENTS

/0

PAGE 1

PAGE 2

PAGE 3

PAGE 4

PAGE 5

PAGE 6

PAGE 7

PAGE 8

PAGE 9

PAGE 10

PAGE 11

PAGE 12

PAGE 13

PAGE 14

PAGE 15

PAGE 16

PAGE 17

PAGE 18

PAGE 19

PAGE 20

PAGE 21

PAGE 22

PAGE 23

PAGE 24

PAGE 25

PAGE 26

PAGE 27

PAGE 28

PAGE 29

PAGE 30

PAGE 31

PAGE 32

PAGE 33

PAGE 34

PAGE 35

PAGE 36

PAGE 37

PAGE 38

PAGE 39

PAGE 40

PAGE 41

PAGE 42

PAGE 43

PAGE 44

PAGE 45

PAGE 46

PAGE 47

PAGE 48

PAGE 49

PAGE 50

PAGE 51

PAGE 52

PAGE 53

PAGE 54

PAGE 55

PAGE 56

PAGE 57

PAGE 58

PAGE 59

PAGE 60

PAGE 61

PAGE 62

PAGE 63

PAGE 64

PAGE 65

PAGE 66

PAGE 67

PAGE 68

PAGE 69

PAGE 70

PAGE 71

PAGE 72

PAGE 73

PAGE 74

PAGE 75

PAGE 76

PAGE 77

PAGE 78

PAGE 79

PAGE 80

PAGE 81

PAGE 82

PAGE 83

PAGE 84

PAGE 85

PAGE 86

PAGE 87

PAGE 88

PAGE 89

PAGE 90

PAGE 91

PAGE 92

PAGE 93

PAGE 94

PAGE 95

PAGE 96

PAGE 97

PAGE 98

PAGE 99

PAGE 100

PAGE 101

PAGE 102

PAGE 103

PAGE 104

PAGE 105

PAGE 106

PAGE 107

PAGE 108

PAGE 109

PAGE 110

PAGE 111

PAGE 112

PAGE 113

PAGE 114

PAGE 115

PAGE 116

PAGE 117

PAGE 118

PAGE 119

PAGE 120

PAGE 121

PAGE 122

PAGE 123

PAGE 124

PAGE 125

PAGE 126

PAGE 127

PAGE 128

PAGE 129

PAGE 130

PAGE 131

PAGE 132

PAGE 133

PAGE 134

PAGE 135

PAGE 136

PAGE 137

PAGE 138

PAGE 139

PAGE 140

PAGE 141

PAGE 142

PAGE 143

PAGE 144

PAGE 145

PAGE 146

PAGE 147

PAGE 148

PAGE 149

PAGE 150

PAGE 151

PAGE 152

PAGE 153

PAGE 154

PAGE 155

PAGE 156

PAGE 157

PAGE 158

PAGE 159

PAGE 160

PAGE 161

PAGE 162

PAGE 163

PAGE 164

PAGE 165

PAGE 166

PAGE 167

PAGE 168

PAGE 169

PAGE 170

PAGE 171

PAGE 172

PAGE 173

PAGE 174

PAGE 175

PAGE 176

PAGE 177

PAGE 178

PAGE 179

PAGE 180

PAGE 181

PAGE 182

PAGE 183

PAGE 184

PAGE 185

PAGE 186

PAGE 187

PAGE 188

PAGE 189

PAGE 190

PAGE 191

PAGE 192

PAGE 193

PAGE 194

PAGE 195

PAGE 196

PAGE 197

PAGE 198

PAGE 199

PAGE 200

PAGE 201

PAGE 202

PAGE 203

PAGE 204

PAGE 205

PAGE 206

PAGE 207

PAGE 208

PAGE 209

PAGE 210

PAGE 211

PAGE 212

PAGE 213

PAGE 214

PAGE 215

PAGE 216

PAGE 217

PAGE 218

PAGE 219

PAGE 220

PAGE 221

PAGE 222

PAGE 223

PAGE 224

PAGE 225

PAGE 226

PAGE 227

PAGE 228

PAGE 229

PAGE 230

PAGE 231

PAGE 232

PAGE 233

PAGE 234

PAGE 235

PAGE 236

PAGE 237

PAGE 238

PAGE 239

PAGE 240

PAGE 241

PAGE 242

PAGE 243

PAGE 244

PAGE 245

PAGE 246

PAGE 247

PAGE 248

PAGE 249

PAGE 250

PAGE 251

PAGE 252

PAGE 253

PAGE 254

PAGE 255

PAGE 256

PAGE 257

PAGE 258