



## Analisis Laju Sedimen Berdasarkan Data *Unsteady Flow Real Time* Dengan HEC-RAS di DAS Bomo Banyuwangi

Habib Marjun Syafa'at<sup>1</sup>, YP. Widi Prasetyo<sup>2</sup>, Heri Sujatmiko<sup>3</sup>, Dimas Aji Purnomo<sup>4</sup>, Zulis Erwanto<sup>5,6</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Banyuwangi

<sup>5</sup>Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Banyuwangi,

<sup>6</sup>Departemen Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya,

<sup>1</sup>habibmarjunsyafaat@gmail.com\*, <sup>2</sup>widiprasetyo@untag-banyuwangi.ac.id, <sup>3</sup>heri.untag@yahoo.com,

<sup>4</sup>dimas.untag@gmail.com, <sup>5,6</sup>zulis.erwanto@poliwangi.ac.id

### Abstract

The 2018 flash flood in Banyuwangi Regency highlighted the role of sedimentation in increasing disaster risks. This study aims to analyze sedimentation rates based on real-time unsteady flow data during the rainy and dry seasons, understand the relationship between unsteady flow and sedimentation, and evaluate the role of HEC-RAS in mitigating sedimentation-related risks. Hydrometric measurements were conducted in real-time over seven days in both seasons. Data were analyzed using HEC-RAS and validated using the Mean Absolute Error (MAE) method of bathymetric measurements. The results show that sedimentation rates were higher during the rainy season (2.77 m<sup>3</sup>/day) compared to the dry season (1.33 m<sup>3</sup>/day) due to increased discharge and flow velocity. Flow velocity correlates more strongly with sedimentation than discharge, with regression values of 0.8257 in the dry season and 0.4072 in the rainy season. Flood modeling with HEC-RAS indicates that sedimentation increases flood risks, particularly in downstream areas. Therefore, mitigation measures such as river normalization, embankment construction, drainage optimization, and upstream soil conservation are necessary. These findings also support early warning systems to enhance community preparedness for sedimentation-induced floods.

*Keywords:* Sedimentation, Unsteady Flow, HEC-RAS, Bomo Watershed, Flood Mitigation

### Abstrak

Banjir bandang di Kabupaten Banyuwangi tahun 2018 menunjukkan sedimentasi berperan dalam meningkatkan risiko bencana. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis laju sedimentasi berdasarkan data *unsteady flow real-time* pada musim hujan dan kemarau, memahami hubungan antara *unsteady flow* dan sedimentasi, serta mengevaluasi peran HEC-RAS dalam mitigasi risiko akibat sedimentasi. Pengukuran hidrometri dilakukan secara *real-time* selama 7 hari di dua musim. Data dianalisis dengan HEC-RAS dan divalidasi menggunakan metode *Mean Absolute Error* (MAE) dari pengukuran batimetri. Hasil menunjukkan laju sedimentasi lebih tinggi pada musim hujan (2.77 m<sup>3</sup>/hari) dibandingkan musim kemarau (1.33 m<sup>3</sup>/hari) akibat debit dan kecepatan aliran yang lebih besar. Kecepatan aliran memiliki korelasi lebih tinggi terhadap sedimentasi dibanding debit, dengan regresi 0.8257 di musim kemarau dan 0.4072 di musim hujan. Pemodelan banjir dengan HEC-RAS menunjukkan bahwa sedimentasi memperbesar risiko luapan, terutama di hilir. Oleh karena itu, mitigasi diperlukan melalui normalisasi sungai, pembangunan tanggul, optimalisasi drainase, serta konservasi tanah di hulu. Hasil ini juga mendukung sistem peringatan dini untuk meningkatkan kesiapsiagaan masyarakat terhadap banjir akibat sedimentasi.

Kata kunci : Sedimentasi, *Unsteady Flow*, HEC-RAS, DAS Bomo, Mitigasi Banjir

Diterima Redaksi : 2025-01-09 | Selesai Revisi : 2025-03-02 | Diterbitkan Online : 2025-03-03

### 1. Pendahuluan

Banjir bandang di kabupaten Banyuwangi pada tahun 2018 yang melanda kecamatan Sragi, Songgon, Singojuruh, Licin, Glagah, dan Rogojampi melalui DAS Bomo dan DAS Glondong membawa longsor dari bendungan alami di hulu yang terbentuk akibat erosi yang tersedimentasi. Pada saat intensitas hujan tinggi, bendung alami tersebut tidak dapat menahan aliran air sehingga pecah menyebabkan banjir bandang [1].

Kawasan yang berpotensi longsor dapat terdeteksi dari tebalnya sedimentasi hasil erosi pada suatu kawasan [2]–[5].

Selain sebagai pendeteksi kawasan rawan longsor, sedimentasi membawa dampak pada pendangkalan sungai yang menyebabkan meluapnya air sungai. Sedimentasi dapat berpengaruh terhadap penurunan kapasitas sungai karena penumpukan sedimen. Sedimentasi juga berdampak pada penurunan pasokan



air, produksi pangan, biaya pemeliharaan bangunan penahan sedimen, serta penurunan kualitas air dan keanekaragaman hayati [6].

Sungai tanpa adanya talud atau perkerasan lantai dibawahnya merupakan jenis sungai dengan aliran tak tunak (*unsteady flow*) berpotensi terjadi pengikisan dan sedimentasi yang menyebabkan perubahan kedalaman aliran dalam waktu tertentu. Sungai dengan bentuk *unsteady flow* memiliki pengaruh yang besar terhadap pergerakan sedimen karena permukaan dasar sungai yang tidak stabil sehingga mempengaruhi transportasi sedimen [7].

Sedimentasi di DAS dipengaruhi oleh bentuknya, yang diklasifikasikan menjadi tipe bulu burung, paralel, radial, dan kompleks [8]. Sungai besar di Banyuwangi, seperti sungai Baru, Setail, Bomo, dan Tambong, memiliki tipe bulu burung, dengan aliran berasal dari Gunung Raung dan Gunung Ijen. Bentuk ini ditandai oleh debit kecil di hulu yang bergabung ke sungai utama yang besar [9]. Percabangan dan belokan di hulu memicu erosi, menyebabkan sedimen terbawa arus dan menumpuk di hilir [10].

Pemodelan sedimentasi dan luapan sungai dapat dilakukan dengan HEC-RAS, software hidrolis terintegrasi dengan antarmuka grafis, analisis hidrolis, manajemen data, serta fitur laporan dan visualisasi [11]–[15]. HEC-RAS memiliki akurasi tinggi, menampilkan distribusi data *cross section* secara langsung, dan memungkinkan simulasi alternatif lebih cepat dibanding perhitungan analitis [16]. Laju sedimentasi dihitung berdasarkan penampang dan geometri sungai, sampel sedimen dasar, data debit, dan suhu. Data *unsteady flow* berupa data debit yang diambil langsung di lapangan diukur secara *real-time* selama 7 hari di dua musim menggunakan alat sensor hidrometri [17], [18].

Parameter input awal mencakup data geometri, koefisien Manning, koefisien ekspansi dan koefisien kontraksi, kemiringan dasar sungai, serta debit aliran. Hasil simulasi disesuaikan dengan data lapangan, dan jika tidak sesuai, parameter hidrolis akan disesuaikan. Setelah validasi, input data untuk simulasi *sediment transport* mencakup diameter butiran sedimen, kecepatan aliran, dan kedalaman sungai [11], [19]–[22]. Hasil pemodelan HEC-RAS divalidasi dengan kondisi batimetri sungai menggunakan metode *Mean Absolute Error* (MAE).

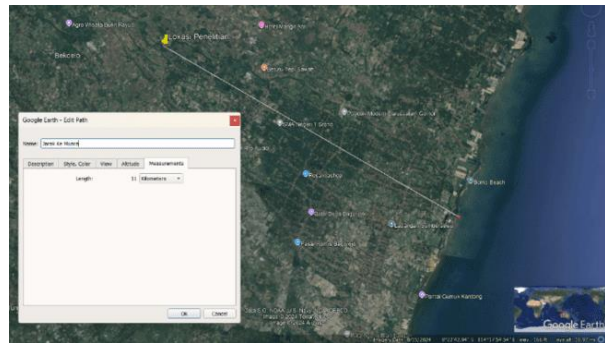
Penelitian ini penting karena laju sedimentasi yang tinggi mempercepat pendangkalan sungai, mengurangi daya tampung, dan berpotensi menyebabkan luapan. Dengan parameter dan rumus dalam HEC-RAS, data yang diolah diharapkan mendekati kondisi lapangan. Hasil penelitian ini bermanfaat untuk perencanaan kantong lumpur, bendung, normalisasi sungai, dan konservasi tanah [23]–[28]. Selain itu, penelitian ini berkontribusi pada mitigasi banjir akibat sedimentasi

serta konservasi lahan di sungai-sungai Banyuwangi yang bertipe bulu burung [29].

## 2. Metode Penelitian

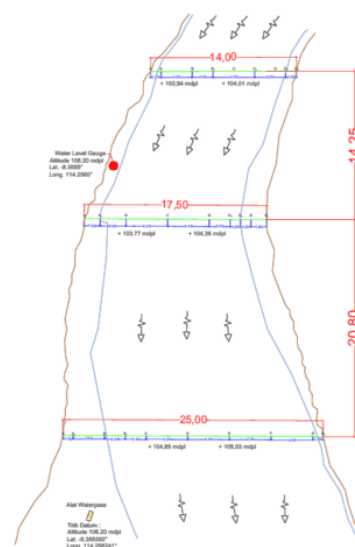
### 2.1. Lokasi Penelitian

DAS Bomo terletak di Kecamatan Srono, dengan aliran melewati Kecamatan Sempu dan Glagah sepanjang 37,70 km dan luas 101,4 km<sup>2</sup> [30]. Pengukuran *unsteady flow real-time* dan batimetri dilakukan di hilir Sungai Bomo, tepatnya di Dusun Bongkoran, Desa Parijatah Wetan, Kecamatan Srono, Banyuwangi, pada koordinat 8°21'19.43"S, 114°15'17.53"E. Titik ini tidak dipengaruhi pasang surut karena berjarak kurang lebih 11 s.d 13 Km dari muara Pantai Bomo [10], seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Jarak Titik Pengukuran ke Muara Sungai  
(Sumber : Google Earth)

Kondisi lapangan di lokasi studi ditampilkan pada Gambar 2. Pada DAS Bomo, tiga penampang sungai dipilih untuk pengukuran batimetri dan pengambilan sedimen. Waterpass ditempatkan di hilir, di tepi sungai, untuk menjangkau ketiga penampang secara langsung. Sementara itu, *water level* dipasang di area yang lebih tinggi guna menghindari risiko kerusakan akibat luapan sungai.

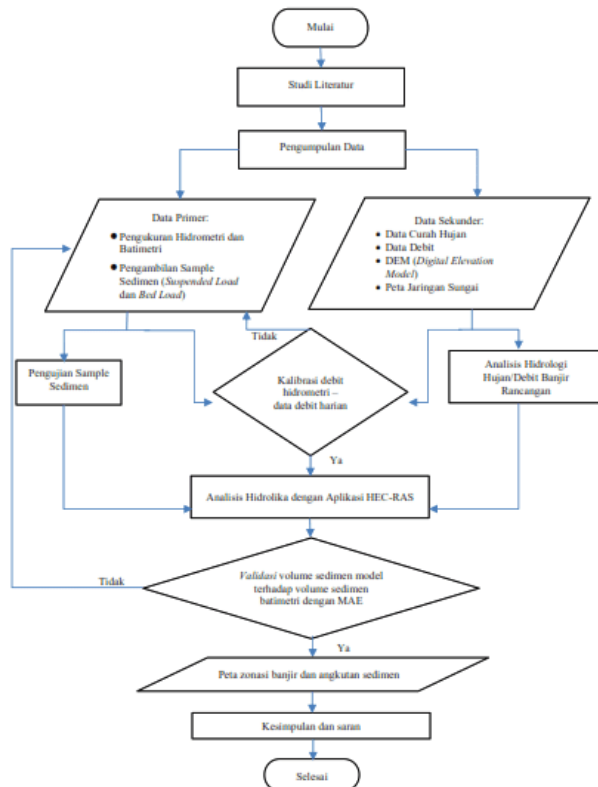


Gambar 2. Kondisi Lapangan, Letak Alat Uji Hidrometri, dan Letak Alat Ukur Waterpass

## 2.2. Waktu Penelitian

Pengumpulan data hidrometri jam-jaman sebagai data *unsteady flow real-time*, data batimetri, dan sedimen. Pengukuran ini dilakukan dalam dua periode berbeda, yaitu saat musim kemarau selama 7 hari pada bulan Agustus 2022 dan saat musim penghujan selama 7 hari pada bulan Januari 2023. Pengambilan data pada dua musim bertujuan untuk membandingkan variasi debit, kedalaman, serta perubahan karakteristik sedimentasi yang terjadi akibat perbedaan intensitas curah hujan.

## 2.3. Langkah Penelitian



Gambar 3. Bagan Alir (Flow Chart) Pelaksanaan Penelitian

Langkah-langkah penelitian berdasarkan bagan alir Gambar 3 sebagai berikut:

### 1.) Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mencari *state of the art* dan *novelty* penelitian.

### 2.) Pengumpulan Data Primer

Data primer yang dikumpulkan antara lain:

#### a. Survey Hidrometri dan Survey Batimetri Sungai

Survei hidrometri dilakukan untuk memperoleh data *unsteady flow* menggunakan alat ukur berbasis sensor [17]. Data dikumpulkan setiap jam dan dipantau melalui ponsel Android dengan koneksi *WiFi*. Dengan dua metode aplikasi berbeda: *water level* dipasang di lokasi untuk memantau perubahan ketinggian air secara langsung, sementara *water flow* dipegang agar tidak terbawa arus sungai seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Proses Pengambilan Data *Water Level* dan *Water Flow* dengan Suhu dengan Alat Hidrometri Berbasis Sensor [17]

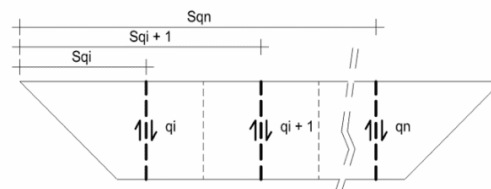
Survei batimetri sungai dilakukan dalam dua tahap pada dua musim. Tahap pertama bertujuan menentukan data awal sungai sebagai input *cross section* untuk pemodelan HEC-RAS sebelum sedimentasi terjadi. Tahap kedua digunakan untuk validasi hasil pemodelan dengan kondisi lapangan setelah sedimentasi. Pengukuran dilakukan secara manual menggunakan *waterpass* dan bak ukur, seperti ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Proses Pengukuran Batimetri Sungai Secara Manual

Survei batimetri tahap pertama dilakukan pada Juli dan Desember 2022 untuk memperoleh data *cross section* sebagai input pemodelan. Tahap kedua dilakukan pada Agustus 2022 dan Januari 2023 untuk validasi hasil pemodelan dengan kondisi lapangan setelah sedimentasi.

Pengambilan sampel sedimen dasar dan melayang dilakukan berdasarkan pembagian penampang sungai pada Gambar 2. Setiap penampang melintang sungai diambil tiga sampel sedimen, dengan titik pengambilan yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Sketsa Pengambilan Sample Sedimen tiap Penampang Sungai ( $S_{qi}$  Jarak Antara Titik Pengambilan Terhadap Titik Awal) [31]

Pengambilan sampel sedimen dilakukan pada dua musim, yaitu Agustus 2022 (musim kemarau) dan Januari 2023 (musim penghujan). Proses pengambilan serta hasil sedimen yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Proses Pengambilan Sampel Sedimen dan Hasil Sampel Sedimen

- 3.) Pengumpulan Data Sekunder  
 Pengumpulan data sekunder dilakukan sebagai data pendukung analisa hidrologi dan geometri DAS.  
 Data sekunder yang dikumpulkan antara lain:
  - a. Data Curah Hujan Harian
  - b. Data Debit Harian
  - c. DEM (*Digital Elevation Model*)
  - d. Peta Jaringan Sungai
- 4.) Pengujian Sampel Sedimen  
 Pengujian sampel sedimen di laboratorium antara lain:
  - a. Analisa Saringan [32]
  - b. Hidrometer [33]
  - c. Berat Jenis [34]
  - d. Berat Volume [35]
  - e. Konsentrasi Sedimen [36]
- 5.) Kalibrasi Debit Hidrometri Terhadap Data Debit Harian AWLR  
 Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan data debit hidrometri dari lapangan dengan data debit harian dari AWLR. Proses ini menggunakan persamaan regresi linier untuk memastikan akurasi dan konsistensi data.
- 6.) Analisis Hidrologi  
 Analisis hidrologi dilakukan untuk menentukan debit banjir rancangan dengan kala ulang 1 tahun sebagai pendekatan musim kering (Agustus) dan kala ulang 5 tahun untuk musim basah (Januari). Perhitungan menggunakan metode Hidrograf Satuan Sintetik Nakayasu, yang kemudian digunakan sebagai input dalam analisis hidraulika di HEC-RAS.
- 7.) Analisis Hidrolika  
 Analisis hidrolika menggunakan aplikasi HEC-RAS dengan tahapan sebagai berikut
  - a. *Open RAS Mapper*
  - b. *Input & Create Geometrik Data*
  - c. *Input Cross Section*
  - d. *Input Unsteady Flow*
  - e. *Input Sediment Data*
  - f. *Running Model*
  - g. *View Output Model*

- 8.) Validasi Volume Sedimen Terhadap Pengukuran Batimetri

Validasi volume sedimen hasil analisis HEC-RAS dilakukan dengan membandingkan data model terhadap pengukuran batimetri sungai di lapangan menggunakan *Mean Absolute Error* (MAE). Pengukuran batimetri dilakukan pada Agustus 2022 dan Januari 2023.

Variabel dalam validasi model simulasi sedimen berdasarkan rumus 1 meliputi nilai aktual dan nilai prediksi.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (1)$$

Dimana n merupakan jumlah data.  $y_i$  adalah nilai aktual hasil observasi pengukuran batimetri ke-i.  $\hat{y}_i$  adalah nilai prediksi hasil dari pemodelan pada aplikasi HEC-RAS.  $|y_i - \hat{y}_i|$  merupakan selisih absolut antara nilai aktual dan prediksi ke-i.

- 9.) *Layouting* peta zonasi genangan banjir dan angkutan sedimen menggunakan aplikasi QGIS sebagai *output* model *RAS Mapper*.
- 10.) Rekomendasi upaya mitigasi bencana berdasarkan *output* peta zonasi banjir dan nilai angkutan sedimen sebagai kesimpulan dari hasil analisa karakteristik sedimen, dan besar sedimen yang dimodelkan pada aplikasi HEC-RAS.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Hasil Analisis Hidrologi

Analisis hidrologi dilakukan untuk memahami karakteristik aliran sungai di DAS Bomo, terutama kaitannya dengan curah hujan, debit sungai, pola aliran yang mempengaruhi proses sedimen. Analisis hidrologi diperoleh dari data curah hujan dari instansi terkait.

Curah hujan harian maksimal dari beberapa stasiun di rata-rata menggunakan metode aritmatik dengan hasil pada Tabel 1. Kemudian analisis curah hujan rancangan diperoleh dengan menggunakan metode distribusi statistik *log person type III*, didapatkan curah hujan rancangan kala ulang untuk di-*input* kedalam rumus perhitungan distribusi frekuensi hujan netto jam-jaman.

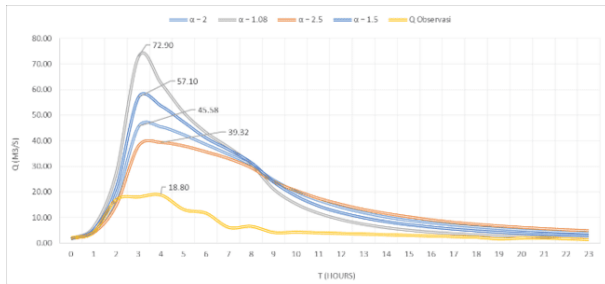
Tabel 1. Curah Hujan Harian Maksimal

Tahun	Stasiun Hujan (mm)					CH (mm)
	Alas Malang	Gambor	Turus Kumbo	Temu guruh	Songgon	
2004	14	132	12	39	43	48
2005	39	44	0	143	80	61
2006	199	65	89	106	31	98
2007	56	131	44	33	12	55
2008	199	65	89	0	31	77
2009	146	0	57	13	54	54
2010	21	22	42	49	164	60
2011	10	83	0	0	182	55
2012	148	75	52	30	16	64
2013	193	140	148	120	117	144
2014	34	31	138	13	67	57
2015	0	0	128	0	41	34
2016	142	92	180	120	35	114
2017	127	66	183	0	29	81
2018	120	60	176	174	316	169
2019	10	0	23	8	204	49
2020	37	57	128	0	199	84

Tahun	Stasiun Hujan (mm)					CH (mm)
	Alas Malang	Gambar	Turus Kumbo	Temu guruh	Songgon	
2021	62	50	84	68	292	111
2022	72	76	130	0	117	79
2023	27	46	50	34	224	76
Rata-Rata	83	62	88	48	113	78

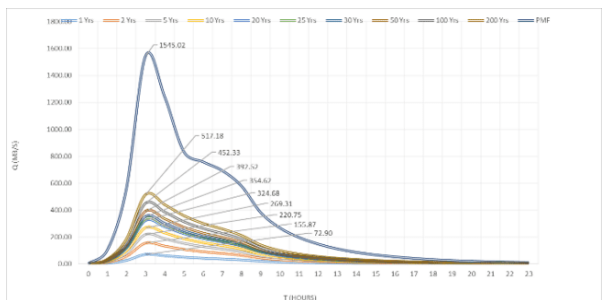
Data geometri diperoleh dari instansi terkait. Data *Digital Elevation Model* (DEM) yang sudah dijadikan peta kemiringan lereng dapat dilihat pada Gambar 10 dan untuk peta jaringan DAS Bomo pada Gambar 11.

Langkah berikutnya melakukan analisis hidrograf satuan menggunakan metode Nakayasu dengan nilai  $\alpha$  1.08 hasil dari *trial error* seperti pada Gambar 8 hasil perbandingan nilai  $\alpha$ .



Gambar 8. Grafik Hidrograf Banjir Rancangan Metode Nakayasu dengan berbagai Tingkat  $\alpha$

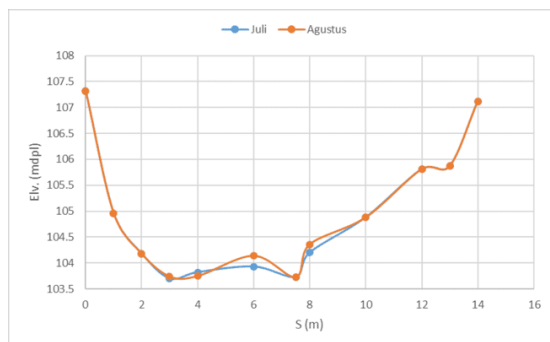
Kemudian debit banjir rancangan kala ulang dihitung menggunakan metode Nakayasu diperoleh grafik pada Gambar 9.



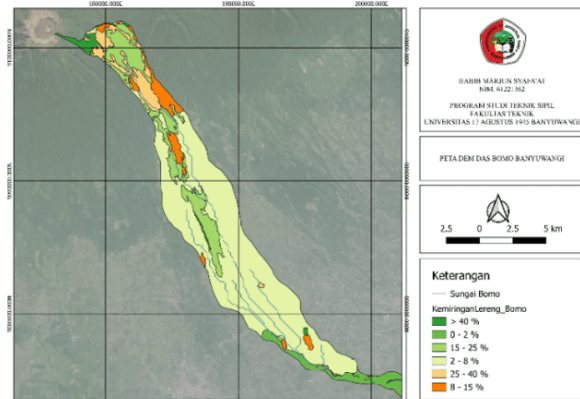
Gambar 9. Grafik Hidrograf Banjir Rancangan Metode Nakayasu Berbagai Kala Ulang

### 3.2. Hasil Analisis Hidrolika

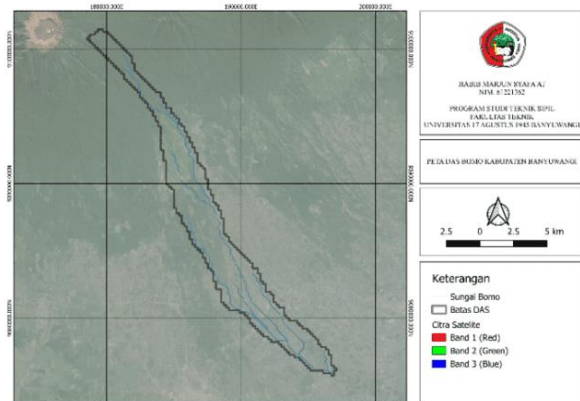
#### 3.2.1. Data Geometri dan Batimetri



(a) *Cross Section 1* (Hulu) di Bulan Juli – Agustus 2022 (Musim Kemarau)

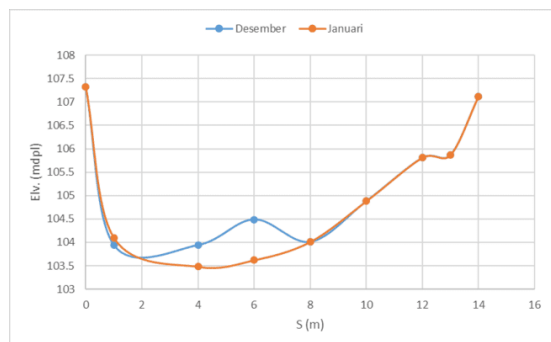


Gambar 10. DEM Kemiringan Lereng DAS Bomo

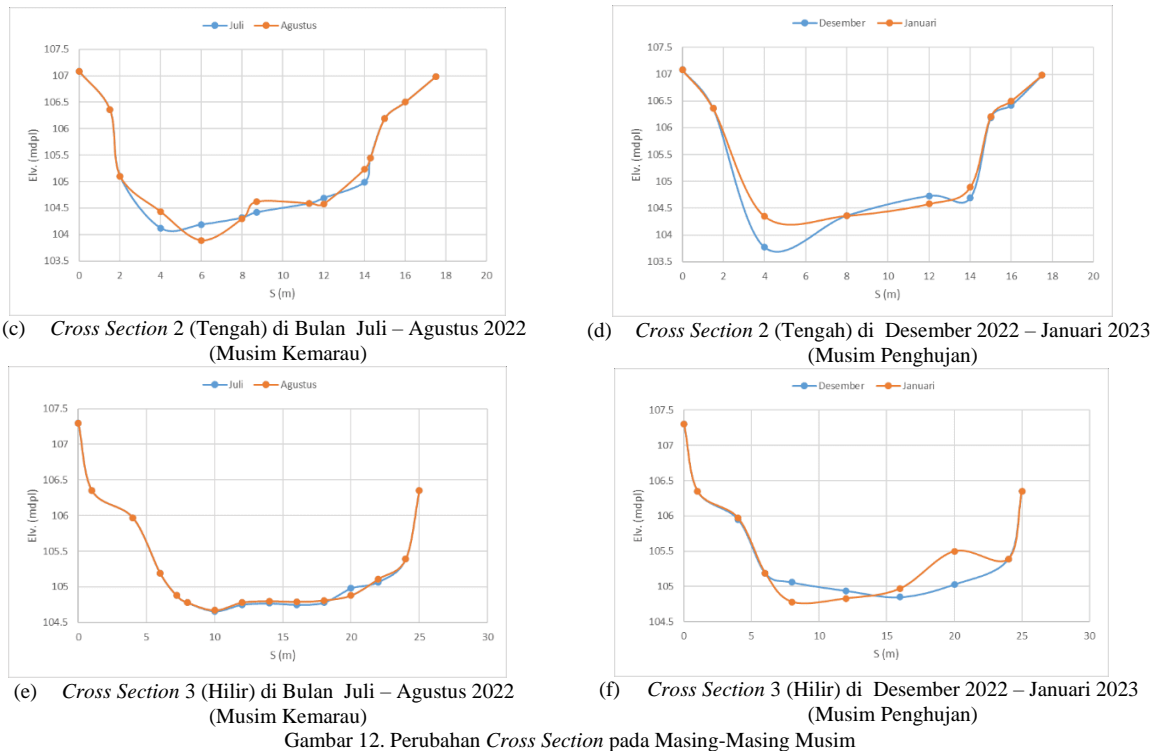


Gambar 11. Jaringan Sungai DAS Bomo

Data batimetri diperoleh sebagai *input cross section* dan cek validasi sedimen yang diambil pada bulan Juli dan Agustus 2022 sebagai perwakilan musim kemarau, serta bulan Desember 2022 dan Januari 2023 sebagai perwakilan musim penghujan. Grafik hasil pengukuran batimetri pada Gambar 12.



(b) *Cross Section 1* (Hulu) di Desember 2022 – Januari 2023 (Musim Penghujan)



Gambar 12. Perubahan Cross Section pada Masing-Masing Musim

3.2.2. Data Sedimen

Data sedimen yang diperoleh dari analisa saringan dapat dilihat pada Tabel 2 untuk musim kemarau dan Tabel 4 untuk musim hujan. Untuk mengetahui karakteristik

sedimen di DAS Bomo data pengujian dapat dilihat pada Tabel 3 untuk musim kemarau dan Tabel 5 untuk musim

Tabel 2. Diameter Butiran Sungai Bomo Musim Kemarau

Tanggal	Data	Diameter Butiran Sungai Bomo							
		Finner #200 (%)	Gravel (%)	Sand (%)	Silt/Clay (%)	D <sub>35 mm</sub>	D <sub>50 mm</sub>	D <sub>65 mm</sub>	D <sub>90 mm</sub>
4/8/2022	1	0.15	54.90	44.95	0.15	3.83	5.05	6.26	8.37
5/8/2022	2	0.05	56.25	43.70	0.05	4.03	5.33	6.37	8.40
6/8/2022	3	0.05	76.50	23.45	0.05	5.47	6.24	7.12	8.68
7/8/2022	4	0.10	42.40	57.50	0.10	3.05	4.10	5.36	8.07
8/8/2022	5	0.10	41.10	58.80	0.10	3.00	4.10	5.26	8.03
9/8/2022	6	0.10	37.90	62.00	0.10	2.66	3.70	5.01	7.91
10/8/2022	7	0.10	53.50	46.40	0.10	3.68	4.97	6.24	8.35
Rata-Rata		0.09	51.79	48.11	0.09	3.68	4.79	5.95	8.26

Tabel 3. Rekap Hasil Pengujian Sedimen Musim Kemarau

Tanggal	Data	Berat Jenis Rata-Rata	Berat Isi rata-rata (gr/cm <sup>3</sup> )	C rata-rata (mg/L atau ppm)	Suhu (oC)	TDS (ppm)
4/8/2022	1	2.50	1.57	485	28.09	415
5/8/2022	2	2.49	1.59	385	27.11	373
6/8/2022	3	2.49	1.57	447	27.39	386
7/8/2022	4	2.56	1.55	327	27.05	381
8/8/2022	5	2.55	1.58	320	27.83	315
9/8/2022	6	2.58	1.59	320	29.26	406
10/8/2022	7	2.68	1.56	440	28.33	442
Rata-Rata		2.55	1.57	389	27.87	388

Tabel 4. Diameter Butiran Sungai Bomo Musim Hujan

Tanggal	Data	Diameter Butiran Sungai Bomo							
		Finner #200 (%)	Gravel (%)	Sand (%)	Silt/Clay (%)	D <sub>35 mm</sub>	D <sub>50 mm</sub>	D <sub>65 mm</sub>	D <sub>90 mm</sub>
23/1/2023	1	0.25	16.50	83.25	0.25	0.32	0.43	0.91	6.24
24/1/2023	2	0.20	22.30	77.50	0.20	0.35	0.52	1.66	6.96
25/1/2023	3	0.25	27.65	72.10	0.25	0.37	0.63	3.01	7.39
26/1/2023	4	0.25	19.25	80.50	0.25	0.42	0.64	1.58	6.63
27/1/2023	5	0.40	16.80	82.80	0.40	0.32	0.44	0.91	6.29
28/1/2023	6	0.25	15.50	84.25	0.25	0.34	0.49	0.82	6.07
29/1/2023	7	0.45	29.40	70.15	0.45	0.35	0.73	3.45	7.50
Rata-Rata		0.29	21.06	78.65	0.29	0.35	0.55	1.76	6.73

Tabel 5. Rekap Hasil Pengujian Sedimen Musim Hujan

Tanggal	Data	Berat Jenis Rata-Rata	Berat Isi rata -rata (gr/cm <sup>3</sup> )	C rata -rata (mg/L atau ppm)	Suhu (oC)	TDS (ppm)
23/1/2023	1	2.40	1.47	300	29.38	262
24/1/2023	2	2.61	1.48	210	29.77	242
25/1/2023	3	2.51	1.48	287	28.56	230
26/1/2023	4	2.52	1.49	200	28.06	254
27/1/2023	5	2.50	1.49	220	27.94	229
28/1/2023	6	2.50	1.52	420	27.43	410
29/1/2023	7	2.43	1.51	360	27.55	368
Rata-Rata		2.50	1.49	285	28.38	285

### 3.2.3. Kalibrasi Debit Hidrometri

Kalibrasi debit adalah proses penyesuaian parameter model hidrologi atau hidraulik agar hasil simulasi lebih sesuai dengan data pengukuran lapangan. Kalibrasi ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi dalam melakukan pemodelan. Kalibrasi debit hidrometri dilakukan pada

data pengukuran dari alat sensor hidrometri dengan kalibrasi pada data debit dari instansi dengan metode bangkitan persamaan regresi berganda. Diperoleh data debit setelah kalibrasi dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Debit AWLR dengan Debit Ukur Kalibrasi

No.	Tgl/Bln/Thn	Debit AWLR	Debit Ukur Sebelum Kalibrasi	Debit Ukur Setelah Kalibrasi
		Qo (m <sup>3</sup> /s)	Qu (m <sup>3</sup> /s)	Qu (m <sup>3</sup> /s)
1	4/8/2022	1.57	2.76	2.60
2	5/8/2022	1.90	1.62	1.92
3	6/8/2022	2.07	1.84	2.06
4	7/8/2022	2.07	3.77	3.10
5	8/8/2022	1.57	2.96	2.70
6	9/8/2022	1.57	3.33	2.89
7	10/8/2022	1.57	5.35	3.79
8	11/8/2022	2.64	4.06	3.24
11	23/1/2023	2.25	1.73	1.99
12	24/1/2023	1.57	1.54	1.87
13	25/1/2023	1.73	2.09	2.22
14	26/1/2023	2.25	2.01	2.17
15	27/1/2023	2.64	2.81	2.63
16	28/1/2023	3.51	4.68	3.51
17	29/1/2023	3.98	6.66	4.29
18	30/1/2023	3.98	2.69	2.56
Rata-Rata		2.22	3.22	2.78

## 3.3. Hasil Pemodelan

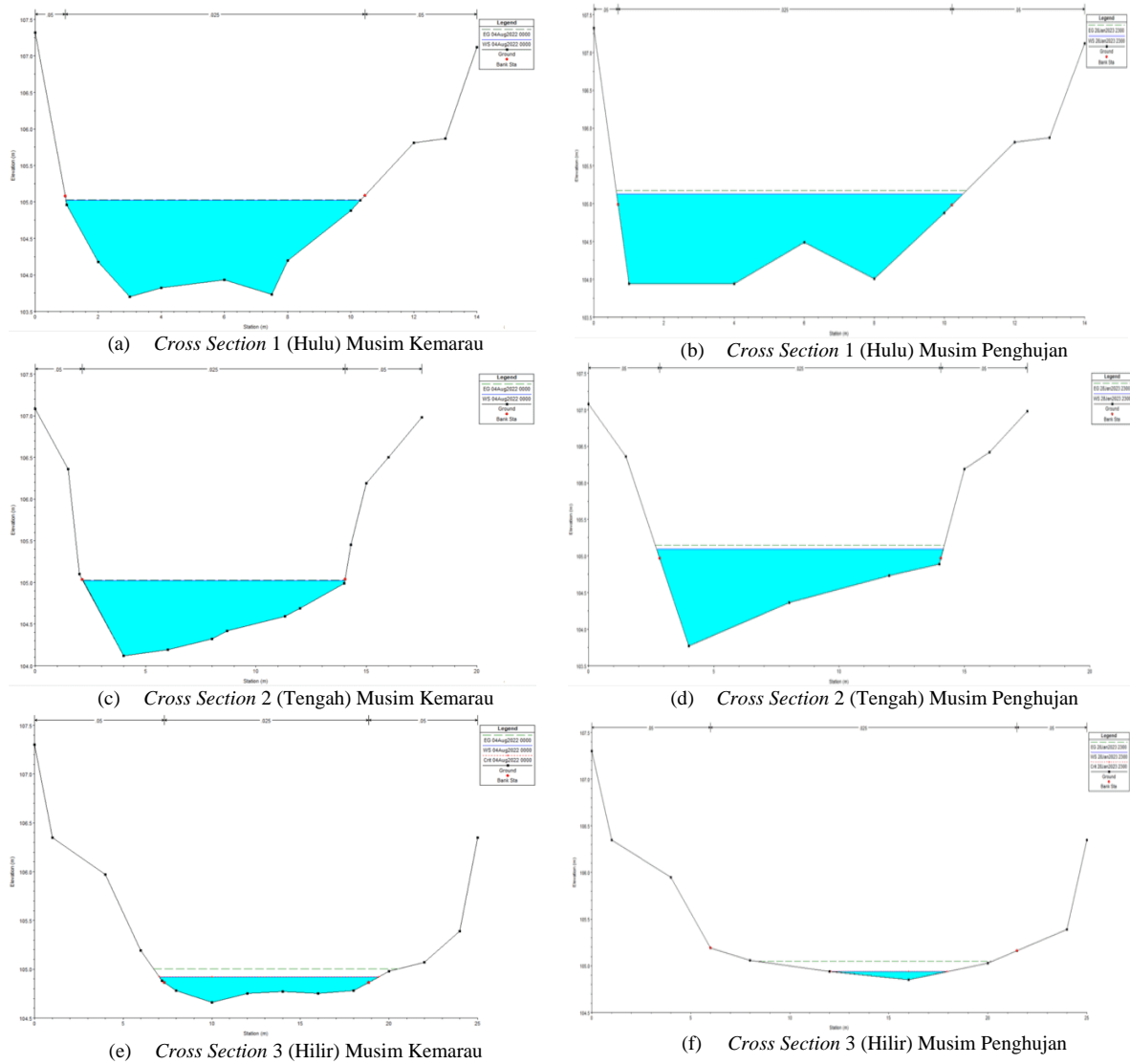
### 3.3.1. Pemodelan Geometri



Gambar 13. Pemodelan Geometri DAS Bomo

Pemodelan geometri DAS Bomo pada HEC-RAS berdasarkan data DEM dan peta jaringan DAS Bomo diperoleh hasil seperti Gambar 13. Dengan aliran sungai utama pada DAS Bomo dan garis batas pada hulu dan hilir serta batas DAS

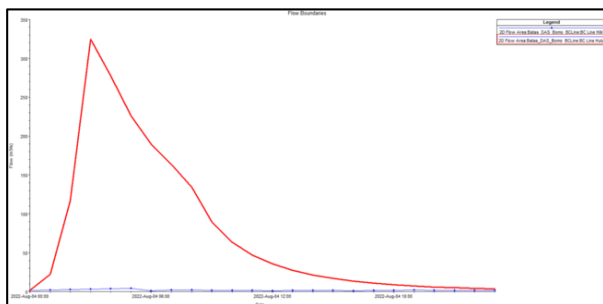
Pemodelan geometri berdasarkan data batimetri diperoleh gambar *cross section* seperti pada Gambar 14



Gambar 14. Pemodelan Cross Section

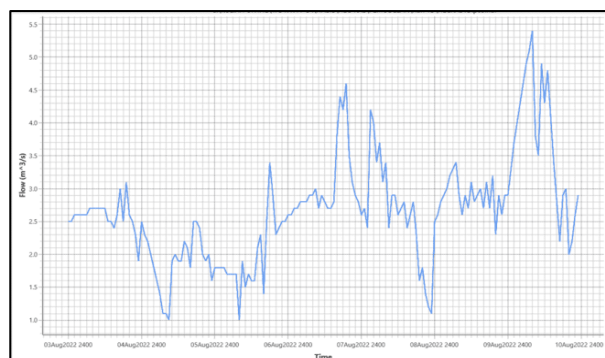
### 3.3.2. Pemodelan *Unsteady Flow*

Pemodelan *unsteady flow* berdasarkan data analisis hidrologi debit banjir rancangan diperoleh hasil pemodelan grafik seperti pada Gambar 15. berikut



Gambar 15. Unsteady Flow Hulu dan Hilir DAS Bomo

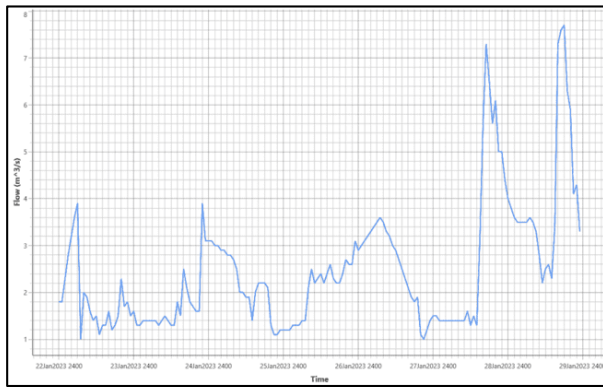
seperti pada Gambar 16 untuk periode kemarau dan Gambar 17 untuk periode penghujan



Gambar 16. Grafik Pemodelan *Unsteady Flow Real Time* Periode Kemarau

Pemodelan *Unsteady Flow* berdasarkan data pengukuran *real time* jam-jaman diperoleh pemodelan

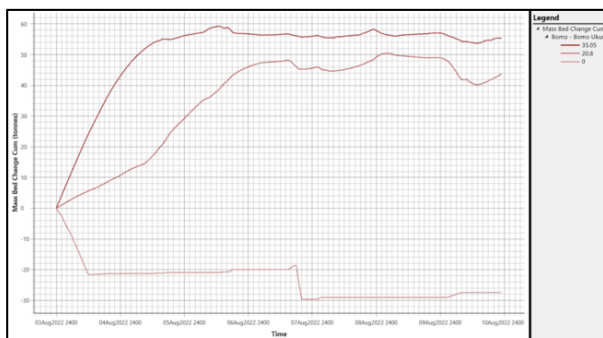




Gambar 17. Grafik Pemodelan *Unsteady Flow Real Time Periode Penghujan*

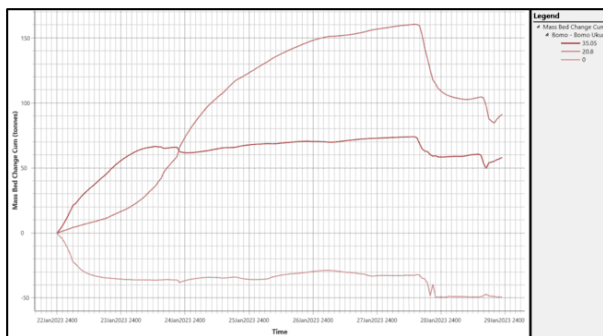
### 3.3.3. Pemodelan *Sediment Transport*

Pemodelan *sediment transport* diperoleh dengan *running plan* setelah data geometri *cross section* dan data *unsteady flow real time* telah terinput. Hasil pemodelan *sediment transport* seperti pada Gambar 18 dan Gambar 19.



Gambar 18. Grafik Hasil *Sediment Transport* Periode Kemarau

Gambar 18 merupakan grafik perubahan dasar sungai pada musim kemarau yang menunjukkan dinamika transportasi sedimen bervariasi dari hulu ke hilir. Di bagian hulu, terjadi akumulasi sedimen yang menyebabkan kenaikan elevasi dasar sungai, sedangkan di bagian hilir justru mengalami penurunan akibat proses erosi. Pola ini mencerminkan bagaimana distribusi sedimen dipengaruhi oleh faktor-faktor hidrodinamika, termasuk variasi aliran dan karakteristik morfologi sungai.



Gambar 19. Grafik Hasil *Sediment Transport* Periode Penghujan

Pada Gambar 19 yaitu *sediment transport* saat musim hujan sedikit berbeda dengan musim kemarau, dimana bagian hulu lebih kecil dibandingkan bagian tengah. Hal ini diakibatkan oleh morfologi sungai, dimana pada bagian hulu merupakan bagian kelokan sungai sehingga ketika terjadi peningkatan kecepatan aliran sedimen lebih mudah terangkut dan mengendap di bagian tengah dan terus tererosi di hilir.

Tabel 7. Laju Sedimentasi Musim Kemarau

Tanggal	Mass Bed/day (tonnes)	Mass Bed /day (m <sup>3</sup> )
8/4/2022	4.12	0.26
8/5/2022	16.22	1.03
8/6/2022	24.97	1.59
8/7/2022	27.21	1.73
8/8/2022	24.34	1.55
8/9/2022	25.72	1.63
8/10/2022	23.48	1.49
Rata-Rata	20.86	1.33

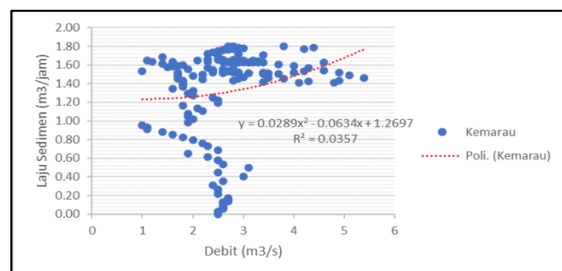
Tabel 8. Laju Sedimentasi Musim Penghujan

Tanggal	Mass Bed/day (tonnes)	Mass Bed /day (m <sup>3</sup> )
1/23/2023	4.13	0.28
1/24/2023	21.41	1.44
1/25/2023	43.64	2.93
1/26/2023	57.46	3.86
1/27/2023	64.29	4.32
1/28/2023	61.35	4.12
1/29/2023	36.28	2.43
Rata-Rata	41.22	2.77

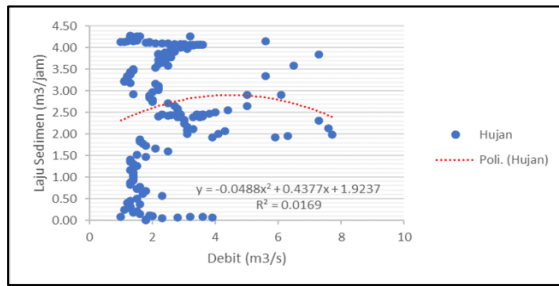
Pada Tabel 7 dapat diketahui nilai laju sedimentasi rata-rata pada musim kemarau mencapai 1.33 m<sup>3</sup>/hari dan pada Tabel 8 nilai laju sedimentasi rata-rata pada musim hujan mencapai 2.77 m<sup>3</sup>/hari. Nilai laju sedimentasi pada musim hujan lebih besar daripada nilai laju sedimentasi pada musim kemarau.

### 3.4. Hubungan *Unsteady Flow* dengan *Sediment Transport*

Transportasi sedimen dipengaruhi oleh dinamika *unsteady flow*, di mana debit dan kecepatan aliran berubah terhadap waktu. Variasi ini mempengaruhi jumlah sedimen yang terbawa serta pola pengendapannya. Analisis menggunakan HEC-RAS dilakukan untuk memahami hubungan antara perubahan debit, kecepatan, dan laju sedimentasi dalam kondisi aliran tidak stabil.

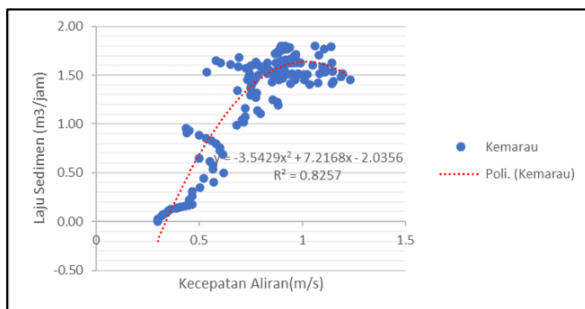


Gambar 20. Grafik Korelasi Debit dengan Laju Sedimen Musim Kemarau

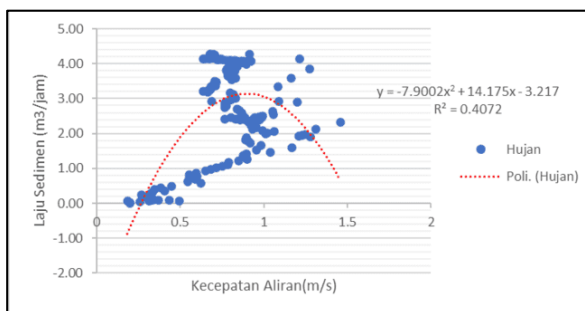


Gambar 21. Grafik Korelasi Debit dengan Laju Sedimen Musim Hujan

Pada Gambar 20 menunjukkan korelasi debit dengan laju sedimen pada musim kemarau memiliki nilai regresi yang kecil yaitu 0.0357 dan Gambar 21 korelasi debit dengan laju sedimen pada musim hujan memiliki nilai regresi 0.0169. Nilai regresi yang kecil menunjukkan bahwa debit bukan satu-satunya faktor utama yang menentukan laju sedimentasi. Pada Gambar 22 dan Gambar 23 merupakan grafik korelasi kecepatan aliran dengan laju sedimen pada musim kemarau dan musim hujan.



Gambar 22. Grafik Korelasi Kecepatan Aliran dengan Laju Sedimen Musim Kemarau



Gambar 23. Grafik Korelasi Kecepatan Aliran dengan Laju Sedimen Musim Hujan

Nilai korelasi kecepatan aliran pada musim kemarau mencapai 0.8257 dan musim hujan sebesar 0.4072. Hal ini menunjukkan hubungan bahwa kecepatan aliran merupakan faktor utama dalam menentukan laju sedimen dibandingkan debit khususnya pada DAS bertipe bulu burung. Semakin tinggi kecepatan aliran, semakin besar energi yang tersedia untuk mengangkat dan mengangkut sedimen baik dalam bentuk *suspended load* ataupun *bed load*, yang diakibatkan tegangan geser kritis lebih besar daripada tegangan geser dasar pada dasar sungai tersebut.

DOI : <https://doi.org/10.52158/jaceit.v6i1.1114>

Kecepatan aliran lebih representatif dibandingkan debit, hal ini dapat terjadi karena debit merupakan hasil dari kecepatan dikalikan dengan luas penampang, sehingga nilai debit bisa tinggi karena luas sungai besar tetapi belum tentu memiliki kecepatan aliran yang cukup untuk mengangkut sedimen.

Pada grafik kecepatan aliran memiliki pola non-linier, hal ini dapat menunjukkan mekanisme pengangkutan sedimen. Pada kecepatan rendah, hanya sedimen halus yang bisa terangkut dalam suspensi. Setelah mencapai kecepatan kritis, lebih banyak sedimen terangkut sehingga laju sedimentasi meningkat drastis. Saat kecepatan aliran meningkat terlalu tinggi, laju sedimentasi menurun akibat turbulensi yang meningkat sehingga sedimen yang sebelumnya mengendap di dasar akan terus tersuspensi dalam aliran akibatnya laju sedimentasi menurun dan tidak sempat untuk mengendap di dasar sungai.

### 3.5. Validasi Model

Validasi hasil laju sedimentasi dari pemodelan *sediment transport* terhadap data batimetri lapangan ditunjukkan dalam Tabel 9. Nilai laju sedimen yang digunakan dalam perhitungan MAE disesuaikan dengan total sedimen hasil pengukuran batimetri, karena laju sedimentasi dipengaruhi oleh variasi debit aliran.

Tabel 9. Perhitungan Validasi Model Menggunakan MAE

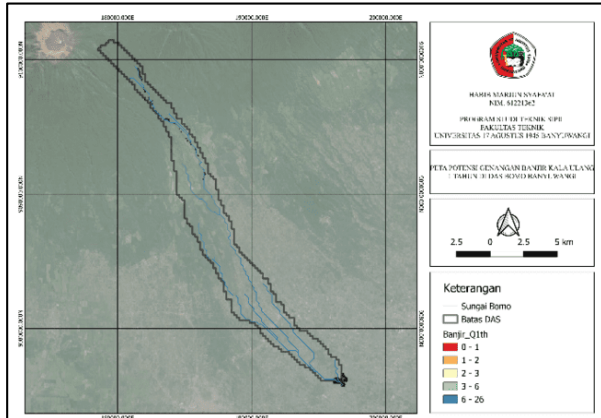
Tanggal	Laju Sedimen (m³/hari)	Total Sedimen (1 Bulan) HEC-RAS (m³)	Total Sedimen (1 Bulan) Batimetri (m³)	MAE
a	b	c=bx30	d	$e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  d - c $
8/5/2022	1.03	30.92	23.86	0.30
1/24/2023	1.44	43.12	39.30	0.10

Pada Tabel dapat diketahui nilai MAE pada musim kemarau 0.30 dan nilai MAE pada musim hujan 0.10. Menunjukkan bahwa hasil pemodelan pada musim kemarau memiliki tingkat *error* lebih tinggi, hal ini disebabkan oleh rendahnya debit aliran di musim kemarau yang membuat kurangnya tingkat keakuratan alat penangkap kecepatan arus. Tapi dari dua perwakilan musim penghujan dan kemarau tersebut, maka model simulasi laju sedimentasi dapat dinyatakan *reliabel* sesuai kondisi di lapangan karena memiliki keakurasian sangat baik (< 1%).

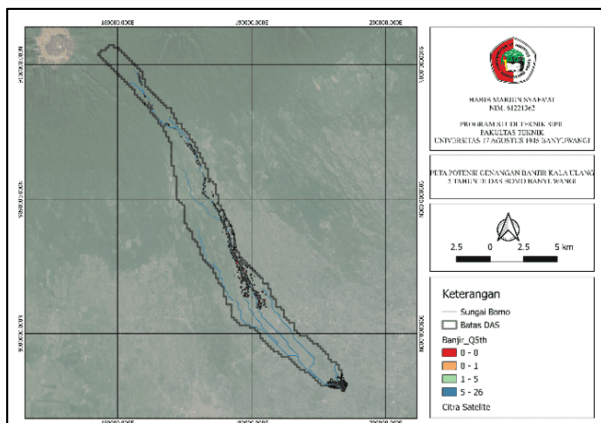
### 3.6. Peran HEC-RAS dalam Mitigasi Risiko Banjir

HEC-RAS membantu memetakan dan menganalisis potensi banjir melalui pemodelan hidrodinamika, yang menghitung ketinggian muka air. Hasilnya berupa peta genangan yang menunjukkan wilayah rawan banjir. Gambar 24 menunjukkan peta potensi banjir dengan kala ulang 1 tahun di DAS Bomo, Banyuwangi. Dari peta ini, terlihat bahwa genangan banjir umumnya masih berada

di dalam kawasan sungai, akibat peningkatan ketinggian air. Namun, di bagian hilir, terutama di sekitar Bendung Gembleng, terdapat potensi genangan yang lebih luas. Hal ini disebabkan oleh fungsi bendung yang menampung air untuk mengalir sawah, sehingga area sekitarnya lebih rentan terhadap luapan air.



Gambar 24. Peta Potensi Genangan Banjir Kala Ulang 1 Tahun di DAS Bomo Banyuwangi



Gambar 25. Peta Potensi Genangan Banjir Kala Ulang 5 Tahun di DAS Bomo Banyuwangi

Gambar 25 menunjukkan peta potensi genangan banjir kala ulang 5 tahun di DAS Bomo, yang mencakup wilayah hulu, tengah, dan hilir. Di hulu, genangan terjadi di Kecamatan Songgon, Desa Sumberarum dan Sragi, terutama di sekitar aliran sungai akibat luapan air. Di wilayah tengah, Kecamatan Sempu, khususnya Desa Gendoh, dan Kecamatan Singonjuruh terdampak genangan karena aliran dari hulu yang membawa material sedimen. Sementara itu, di hilir, genangan terjadi di sekitar Bendung Gembleng, yang berfungsi mengalir sawah, namun saat debit meningkat, terjadi limpasan air.

Pemodelan banjir menggunakan HEC-RAS tidak hanya memetakan daerah genangan, tetapi juga mengidentifikasi peran sedimentasi dalam meningkatkan risiko banjir. Pendangkalan akibat sedimentasi mengurangi kapasitas sungai, memperbesar kemungkinan luapan air, terutama di daerah hilir. Oleh karena itu, mitigasi seperti normalisasi sungai,

pembangunan tanggul, dan optimalisasi drainase diperlukan untuk mengurangi dampak banjir dan sedimentasi.

Selain itu, pengelolaan sedimentasi dapat dilakukan melalui konservasi tanah dan air di hulu guna mengurangi erosi. Penetapan zona hijau dan daerah resapan air juga membantu menekan limpasan dan sedimentasi berlebih. Hasil pemodelan ini mendukung pengembangan sistem peringatan dini banjir, sehingga masyarakat lebih siap menghadapi risiko banjir. Dengan pendekatan yang terintegrasi, mitigasi banjir dan sedimentasi dapat dilakukan lebih efektif dan berkelanjutan.

#### 4. Kesimpulan

Analisis laju sedimentasi berdasarkan data *unsteady flow real-time* dengan HEC-RAS menunjukkan bahwa distribusi sedimen di DAS Bomo dipengaruhi oleh morfologi sungai dan variasi aliran. Di hulu terjadi akumulasi sedimen, sementara di hilir terjadi erosi. Pada musim hujan, laju sedimentasi lebih tinggi ( $2.77 \text{ m}^3/\text{hari}$ ) dibanding musim kemarau ( $1.33 \text{ m}^3/\text{hari}$ ) akibat debit dan kecepatan aliran yang lebih besar.

Pada DAS Bomo bertipe bulu burung sangat dipengaruhi oleh faktor kecepatan aliran terhadap laju sedimentasi dibanding debit, dengan hubungan non-linier model regresi berganda. Pada kecepatan rendah, hanya sedimen halus yang terbawa, sedangkan pada kecepatan tinggi, turbulensi menghambat pengendapan sedimen.

HEC-RAS memetakan potensi banjir dan dampak sedimentasi, menunjukkan risiko genangan tertinggi di hilir, terutama di Bendung Gembleng. Pendangkalan akibat sedimentasi meningkatkan risiko luapan, sehingga mitigasi banjir seperti normalisasi sungai, pembangunan tanggul, drainase, dan konservasi tanah diperlukan untuk mengurangi dampak banjir dan mendukung sistem peringatan dini banjir.

#### Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada kepada Bapak YP. Widi Prasetyo, Bapak Heri Sujatmiko, dan Bapak Dimas Aji Purnomo atas bimbingan dan arahnya selama penelitian berlangsung. Terimakasih kepada Bapak Zulis Erwanto sebagai mentor dalam menyelesaikan penelitian ini.

Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Universitas 17 Agustus 1945 Banyuwangi dan Laboratorium Teknik Sipil Politeknik Negeri Banyuwangi atas fasilitas yang diberikan dalam mendukung analisis penelitian ini. Selain itu, apresiasi diberikan kepada keluarga dan rekan-rekan yang telah memberikan semangat serta bantuan dalam menyelesaikan jurnal ini.

Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi Dinas terkait dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan aplikasi di bidang hidrologi, rekayasa sungai, serta mitigasi bencana banjir dan sedimentasi.

## Daftar Rujukan

- [1] Sugiharto, "Banjir Bandang di Banyuwangi, Ternyata Ini Penyebabnya," *AGROINDONESIA*, 2018.
- [2] R. Mulyasari *et al.*, "Aplikasi Metode Geolistrik Resistivitas Untuk Analisis Bidang Gelincir Dan Studi Karakteristik Longsoran Di Jalan Raya Suban Bandar Lampung," *JGE (Jurnal Geofis. Eksplorasi)*, vol. 6, no. 1, pp. 66–76, 2020.
- [3] Z. Erwanto and N. Lestari, "Study of Rainfall Erosivity and Erosion Rate with MUSLE Method Using Geographic Information System In Badeng Watershed," in *International Conference on Innovation in Science and Technology (ICIST 2020)*, 2021, pp. 346–353.
- [4] Z. Erwanto, A. Holik, D. D. Pranowo, and S. N. Afifa, "Identification of Land Criticism for Land Conservation Actions in the Badeng Watershed with Regulation of Watershed and Protection Forest Management," in *Proceedings of the 4th International Conference on Applied Science and Technology on Engineering Science (iCAST-ES 2021)*, 2023, pp. 484–491.
- [5] Z. Erwanto, A. Holik, D. D. Pranowo, S. D. B. Prastyo, and A. Husna, "Hydrological Modeling Using SWAT Due to Landslides In The Badeng Watershed," in *International Conference on Innovation in Science and Technology (ICIST 2020)*, 2021, pp. 402–410.
- [6] L. Gonzalez Rodriguez, A. McCallum, D. Kent, C. Rathnayaka, and H. Fairweather, "A review of sedimentation rates in freshwater reservoirs: recent changes and causative factors," *Aquat. Sci.*, vol. 85, no. 2, pp. 1–19, 2023.
- [7] Z. Duan, J. Chen, C. Jiang, X. Liu, and B. Zhao, "Experimental study on uniform and mixed bed-load sediment transport under unsteady flow," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 6, 2020.
- [8] N. Triany, S. D. Nuryana, R. Adhitama, A. Gunto, M. H. Yudisatrio, and R. H. Daned, "Karakteristik Das Cisdane Berdasarkan Parameter Morfometri Di Daerah Rumpin – Ciseeng, Kabupaten Bogor Barat," *PETROJurnal Ilm. Tek. Perminyakan*, vol. 10, no. 3, pp. 110–116, 2021.
- [9] Z. Erwanto and N. Anwar, "Modelling the Sediment Load in the Bird Feather-Type Watersheds along the Main Rivers of Banyuwangi Regency," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1097, no. 1, p. 012050, 2022.
- [10] Z. Erwanto, D. Iranata, and M. A. Maulana, "Identification of Hydrological Characteristics and Sediment Rates of Bird Feather-Type Watersheds with SWAT Model: Case Study of Bomo River of Banyuwangi," in *International Conference on Architecture and Civil Engineering Conference*, 2024, pp. 741–762.
- [11] H. C. Cahyani, E. Hidayah, R. U. A. Wiyono, G. Halik, and W. Y. Widiarti, "Prediksi Laju Sedimentasi Pada Sungai Jatiroto," *J. Rekayasa Sipil*, vol. 17, no. 1, 2021.
- [12] E. Wijayanti and R. M. S. Prastica, "Pemodelan numerik 1-D untuk analisis banjir Sungai Tunggal pada DAS Tunggal," *J. Proy. Tek. Sipil*, vol. 4, no. 1, pp. 7–17, 2021.
- [13] F. B. Viriasisa and Z. Erwanto, "Kajian Potensi Peluapan Aliran Pada Sungai Badeng Tengah Di Daerah Wisata Pinus Songgon Banyuwangi," in *Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV) Ke-6*, 2020, vol. 6, no. 1, pp. 665–672.
- [14] R. D. Novianani, Z. Erwanto, and Q. Shofiyah, "Evaluasi Kapasitas Pada Sungai Tambong Tengah Terhadap Potensi Luapan Aliran," in *Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV) Ke-6*, 2020, vol. 6, no. 1, pp. 626–633.
- [15] F. Padli D. and N. N. Asad, "Penerapan Software HEC-RAS Untuk Menghitung Angkutan Sedimen Pada Muara Sungai," Universitas Muhammadiyah Makassar, 2022.
- [16] S. M. Ismawati and U. Lasminto, "Pemodelan Aliran 1D pada Bendungan Tugu Menggunakan Software HEC-RAS," *J. Hidroteknik*, vol. 2, no. 2, p. 19, 2017.
- [17] C. T. Erwanto *et al.*, "Pengembangan Alat Ukur Hidrometri Berbasis 5 Jenis Sensor Untuk Deteksi Konsentrasi Sedimen Dalam Upaya Mitigasi Bencana Banjir Sungai Bomo Abstrak penggenangan yang datang dari sungai atau mengancam kerusakan . Banjir ditunjukkan tanggul sungai , sehingga," *J. Teknol. Terpadu*, vol. 12, no. 1, 2024.
- [18] Soewarno, *Hidrologi Pengukuran dan Pengolahan (Hidrometri)*. Bandung: Nova, 1991.
- [19] C. T. Yang, *Sediment Transport Theory and Practice*. Malabar, FL: Krieger Publishing Company, 2003.
- [20] C. Ikhsan, "Pengaruh Variasi Debit Air Terhadap Laju Bed Load Pada Saluran Terbuka Dengan Pola Aliran Steady Flow," *Media Tek. Sipil*, pp. 63–68, 2007.
- [21] H. N. C. Breusers, *Lecture Notes on Sediment Transport I*. The Netherlands: Delft Hydraulics, 1988.
- [22] B. Kumar, A. Jha, V. Deshpande, and G. Sreenivasulu, "Regression model for sediment transport problems using multi-gene symbolic genetic programming," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 103, pp. 82–90, 2014.
- [23] E. Yulianti, "Pengembangan Konservasi Lahan Terhadap Erosi Parit/Jurang (Gully Erosion) Pada Sub Das Genteng Di Kabupaten Malang," *J. Spectra*, vol. 6, no. 12, pp. 28–35, 2017.
- [24] F. Irsyad and E. G. Ekaputra, "Analisis Wilayah Konservasi Daerah Aliran Sungai (DAS) Kuranji Dengan Aplikasi SWAT," *J. Teknol. Pertan. Andalas*, vol. 19, no. 1, pp. 39–45, 2013.
- [25] Z. Erwanto, D. D. Pranowo, Y. P. Gumelar, I. Wahyudin, and M. R. Husamadi, "Konservasi Lahan Gully Plugs Untuk Pengendali Erosi Di DAS Badeng Desa Sumberbulu, Songgon, Banyuwangi," *Panitia Abdi J. Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 5, no. 4, pp. 475–487, 2021.
- [26] E. W. Setyaningrum, Z. Erwanto, S. H. Yuniari, K. P. Prapti, and A. T. K. Dewi, *Manajemen Konservasi Lahan dan Sumberdaya Pesisir*. Purbalingga: Eureka Media Aksara, 2022.
- [27] Z. Erwanto, "Pengaruh Tindakan Konservasi Tata Guna Lahan Terhadap Laju Erosi Di DAS Sampean Baru Bondowoso Menggunakan Sistem Informasi Geografis." Jember: Universitas Jember, 2007.
- [28] R. M. S. Prastica and Z. Erwanto, *Pilar Manajemen Sumber Daya Air*. Purbalingga: Eureka Media Aksara, 2022.
- [29] Z. Erwanto, A. Holik, D. D. Pranowo, and S. N. Afifa, "Identification of Land Criticism for Land Conservation Actions in The Badeng Watershed with Regulation of Watershed and Protection Forest Management," in *International Conference on Applied Science and Technology (iCAST) 2021*, 2021.
- [30] Z. Erwanto, D. D. Pranowo, S. D. B. Prastyo, A. Holik, and A. Husna, "Hydrological Modeling Using SWAT Due to Landslides in the Badeng Watershed," in *International Conference on Innovation in Science and Technology (ICIST 2020)*, 2021, vol. 208, no. Icast 2020, pp. 402–410.
- [31] SNI 3414, "Tata cara pengambilan contoh muatan sedimen melayang di sungai dengan cara integrasi kedalaman berdasarkan pembagian debit." Badan Standardisasi Nasional, Bandung, 2008.
- [32] SNI 03-1968-1990, "Metode pengujian analisis saringan Agregat halus dan kasar." Badan Standardisasi Nasional, Bandung, 1990.
- [33] SNI 03-3423-1994, "Metode pengujian analisis ukuran butir tanah dengan alat hidrometer." Pusjatan - Balitbang PU, Jakarta, pp. 1–9, 1994.
- [34] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 1964:2008 Cara Uji Berat Jenis Tanah." 2008.
- [35] SNI 03-3637-1994, "Metode Pengujian Berat Isi Tanah Berbutir Halus Dengan Cetakan Benda Uji." Pusjatan - Balitbang PU, Jakarta, pp. 2–5, 1994.
- [36] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 6989.3:2019 Air dan Air Limbah-Bagian 3: Cara Uji Padatan Tersuspensi Total Secara Gravimetri," 2019.