

Analisis Laju Angkutan Sedimen dan Perubahan Morfologi Sungai Brantas Ruas Sutami-Lodoyo Menggunakan HEC-RAS 1D

Chairul Adam¹, Neil Andika¹, Istiarto¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: chairuladamst@mail.ugm.ac.id

INTISARI

Daerah Aliran Sungai (DAS) Brantas mengalami penurunan fungsi ekologis yang ditandai dengan akumulasi sedimentasi, sehingga berpotensi menyebabkan banjir dan mengurangi masa operasional waduk. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis laju angkutan sedimen di ruas Sungai Brantas antara Bendungan Sutami dan Lodoyo menggunakan perhitungan empiris dan simulasi perangkat lunak HEC-RAS 1D. Metode penelitian melibatkan penggunaan data sekunder berupa gradasi butiran sedimen, debit harian selama lima tahun (2019-2023), topografi LiDAR, dan data dimensi infrastruktur hidraulik. Analisis keandalan model dilakukan dengan membandingkan tiga metode empiris (Meyer-Peter dan Müller/MPM, Yang, dan Toffaletti) dan divalidasi menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE) serta *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE). Hasil validasi dari perubahan dasar sungai menunjukkan bahwa metode MPM memiliki tingkat keandalan tertinggi dengan klasifikasi "Sangat Baik" (NSE = 0,89) dan nilai RMSE 4,84 m. Perhitungan empiris menggunakan metode MPM menghasilkan total angkutan sedimen kumulatif sebesar 160.744.185 ton, sedangkan hasil simulasi HEC-RAS menunjukkan nilai 163.412.910,7 ton, dengan selisih antara kedua metode sebesar 1,66%. Tingginya laju angkutan sedimen ini menyebabkan perubahan morfologi dasar sungai melalui proses aggradasi dan degradasi, yang berimplikasi pada penurunan kapasitas tampung sungai. Sebagai solusi, direkomendasikan tindakan pengerukan (*dredging*) pada STA 7+970 hingga STA 8+400 untuk mengelola laju sedimentasi.

Kata kunci: Angkutan Sedimen, Empiris, HEC-RAS, Morfologi Sungai, Sungai Brantas

1 PENDAHULUAN

Indonesia memiliki sumber air sungai yang sangat besar, sehingga diperlukan perhatian khusus terhadap sungai agar dapat berfungsi secara optimal dan memberikan manfaat (Erlina, 2018). Transformasi morfologi dapat terjadi melalui dua mekanisme utama yaitu proses alamiah dan antropogenik. Secara alamiah, perubahan morfologi sungai dipengaruhi oleh proses erosi pada lahan sekitar sehingga terjadi degradasi struktur tebing sungai. Sementara itu, perubahan antropogenik terjadi sebagai konsekuensi dari konversi tata guna lahan menjadi area pertanian dan pemukiman, yang secara signifikan meningkatkan laju erosi pada tebing sungai dan mengakibatkan akumulasi sedimentasi pada badan sungai (Dewi, 2018). Proses pengendapan sedimen terjadi ketika kecepatan aliran air yang membawa material sedimen relatif rendah hingga mencapai titik kecepatan pengendapan. Pada kondisi ini partikel-partikel sedimen tidak lagi dapat terangkut oleh air dan akhirnya mengendap (Aviva, 2018).

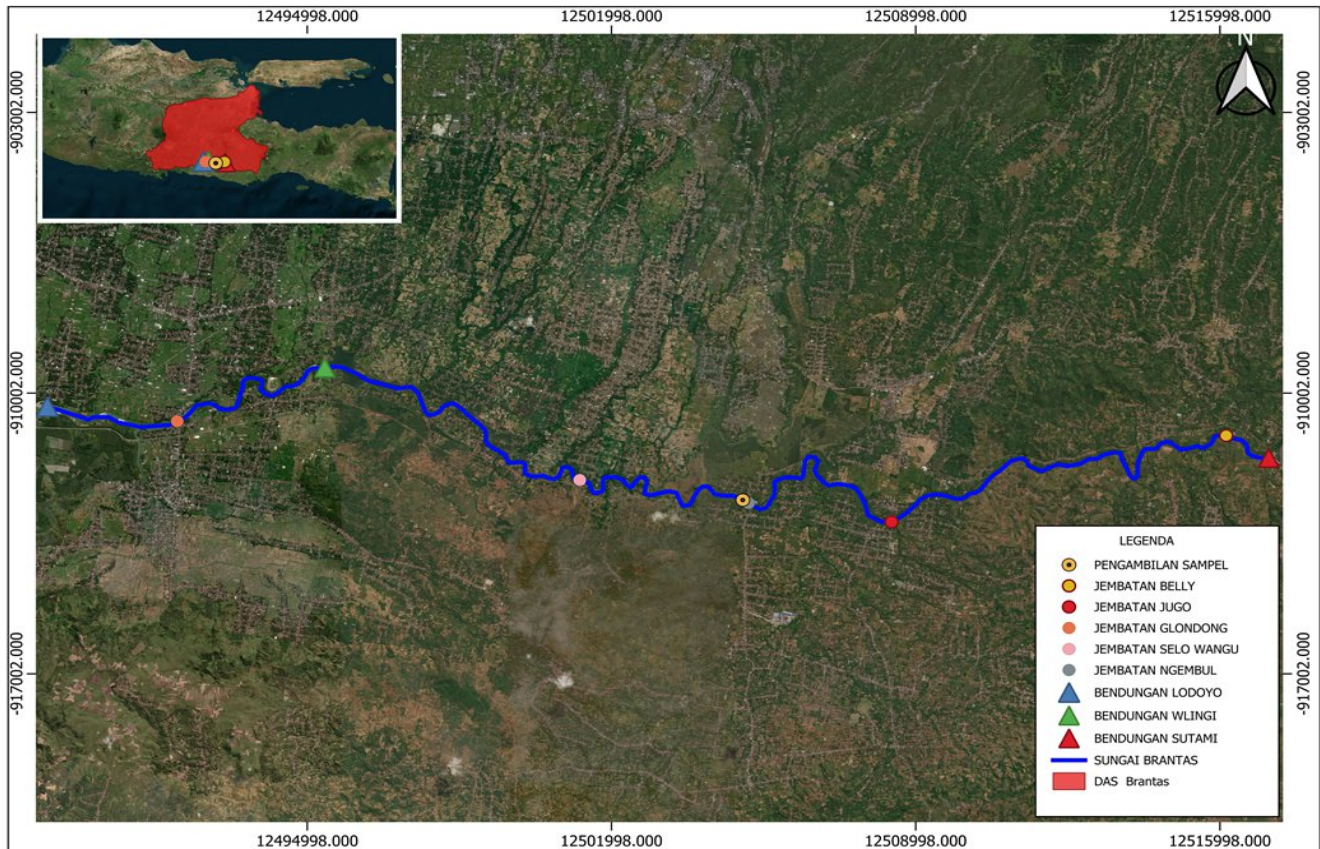
Daerah Aliran Sungai (DAS) Brantas saat ini mengalami penurunan fungsi ekologis yang signifikan, dengan salah satu konsekuensi utamanya berupa akumulasi sedimentasi pada badan sungai yang berpotensi memicu peristiwa banjir dan mengurangi masa operasional waduk (Bari et al., 2024; PSDA WS Brantas, 2021). Sumber utama sedimen Waduk Sutami berasal dari erosi di daerah tangkapan air (DTA). Sedimentasi waduk meningkat sejak terjadinya pembabatan dan penggundulan hutan menyebabkan dampak longsor tanah memenuhi waduk (Suroso & Widiyanto, 2009). Perhitungan besarnya sedimentasi dapat dihitung berdasarkan hasil erosi yang terjadi pada lahan (Kasyful Haq et al., 2021). Ketika aliran air tidak memiliki kemampuan untuk mengangkut sedimen, material tersebut akan mengendap di berbagai lokasi. Pada kondisi tertentu, pengendapan sedimen ini dapat mengurangi kapasitas sungai dalam menampung air (Aviva, 2018). Untuk mengatasi hal ini, salah satu upaya yang umum dilakukan adalah pengerukan sedimen (*dredging*), yang bertujuan untuk mengembalikan kapasitas tampung sungai dan waduk serta menjaga kelancaran aliran air (Andriawati et al., 2015).

Tujuan dari studi ini yaitu untuk mengetahui laju angkutan sedimen yang terjadi pada Sungai Brantas Bendungan Sutami-Lodoyo baik secara perhitungan empiris misalnya menggunakan persamaan Meyer-Peter Muller, Toffaletti dan Yang. Ketiga persamaan tersebut di gunakan untuk mendapatkan perkiraan angkutan sedimen yang paling mendekati kondisi aktual lapangan, mengingat tidak ada satu rumus empiris pun yang akurat untuk semua jenis sungai dan kondisi aliran (Wardhana, 2015). Hasil dari kedua metode tersebut kemudian dibandingkan untuk menghasilkan nilai persentase rerata selisihnya.

2 METODOLOGI

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian berlokasi di Daerah Aliran Sungai (DAS) Brantas, yang terletak di Desa Karangates, Provinsi Jawa Timur, khususnya di bagian hilir Waduk Sutami yang mencakup area hilir Bendungan Sutami, Bendungan Wlingi dan Bendungan Lodooyo di Sungai Brantas. Panjang ruas Sungai Brantas yang digunakan pada penelitian ini lebih dari 38 km dari patok STA 38+200 di hulu ($8^{\circ} 9' 58.28''$ LS dan $112^{\circ} 26' 57.18''$ BT) sampai STA 0 di hilir ($8^{\circ} 9' 0.75''$ LS dan $112^{\circ} 11' 26.54''$ BT). Gambar 2.1 menunjukkan lokasi penelitian bendungan dan juga pengambilan sampel sedimen yang dilakukan di Jembatan Ngembul STA 21+560.



Gambar 2.1. Lokasi Penelitian Dan Pengambilan Sampel Sedimen

2.2 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sekunder, beberapa data tersebut antara lain (Iqbal et al., 2022):

- a) Data Gradasi Butiran Sedimen
Data gradasi butiran merupakan data *bed-load* dan data *suspended-load* yang merupakan data sekunder yang didapatkan dari pengelola Bendungan Sutami, Bendungan Wlingi dan Bendungan Lodooyo.
- b) Data Debit
Data debit bulanan merupakan data sekunder yang diambil pada AWLR Sutami yang digunakan periode tahun 2019-2023. digunakan dalam menentukan debit dominan dan debit banjir rancangan.
- c) Data topografi Sungai Brantas
Data topografi Sungai Brantas merupakan data sekunder berdasarkan pada Data LiDAR (*Light Detection and Ranging*) digunakan untuk input dalam pemodelan.
- d) Data dimensi infrastruktur
Data dimensi infrastruktur merupakan data sekunder untuk mengetahui dimensi infrastruktur pemodelan berupa data:
 - 1) Bendungan (Bendungan Sutami, Bendungan Wlingi, dan Bendungan Lodooyo,)
 - 2) Jembatan (*bridge*)
 - 3) Gorong-gorong (*culvert*)
 - 4) Pintu air (*gate*)
 - 5) Dimensi, elevasi, dan operasional struktur

2.3 Metode

2.3.1 Analisis Debit Aliran

Debit yang digunakan merupakan rerata bulanan hasil pencatatan *Automatic Water Level Recorder* (AWLR) Sutami selama periode 2019–2023. Debit rerata bulanan pada Tabel 2.1 digunakan sebagai debit dominan untuk analisis angkutan sedimen pada bulan Januari–Desember setiap tahun, kemudian disimulasikan dengan HEC-RAS untuk memperoleh data hidraulik sungai.

Bulan/ Tahun	2019 (m ³ /dt)	2020 (m ³ /dt)	2021 (m ³ /dt)	2022 (m ³ /dt)	2023 (m ³ /dt)
Januari	108.73	86.99	151.19	151.71	154.39
Februari	124.64	151.78	152.36	147.33	278.08
Maret	157.40	155.34	157.62	156.58	260.11
April	156.42	156.18	157.50	168.12	202.00
Mei	136.81	156.21	109.66	152.37	194.27
Juni	87.15	152.78	156.27	146.72	128.48
Juli	91.30	63.38	93.24	95.91	317.49
Agustus	94.96	74.92	98.31	121.17	71.52
Sepember	106.17	90.77	107.57	125.61	87.28
Oktober	45.71	106.19	106.93	156.72	86.65
November	40.56	137.90	150.95	285.97	87.87
Desember	89.69	142.27	151.24	230.57	89.34

2.3.2 Analisis Gradasi Butiran Sedimen

Lokasi sampel material sedimen yang diambil dari ruas Jembatan ngembul STA 21+560. Sampel tersebut dilakukan uji *grain size* di laboratorium tanah sipil Universitas Brawijaya. Hasil uji tersebut memiliki keluaran berupa persentase gradasi butiran berat jenis dan data lainnya. Data-data tersebut selanjutnya digunakan untuk perhitungan angkutan sedimen dan pada pemodelan dengan aplikasi digunakan sebagai parameter yang dimasukkan ke dalam sistem HEC-RAS pada bagian menu sediment data.

2.3.3 Analisis Keandalan

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data pengukuran pada perubahan elevasi dasar sungai menggunakan RMSE dan NSE.

- a) *Root Mean Square Error* (RMSE) berfungsi sebagai parameter statistik yang merepresentasikan akar rata-rata kuadrat deviasi antara nilai prediksi model dengan nilai observasi. Nilai RMSE yang rendah mengindikasikan bahwa distribusi nilai yang dihasilkan oleh model prediktif memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi dengan distribusi nilai observasi. Formulasi matematis untuk menghitung nilai RMSE diekspresikan melalui persamaan berikut.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_I - \hat{Y}_I)^2}{n}} \quad (2.1)$$

- b) *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) merupakan parameter statistik yang berfungsi sebagai indikator kuantitatif untuk mengevaluasi kinerja model prediktif, khususnya dalam konteks pemodelan hidrologi. parameter ini mengukur seberapa baik model dapat memprediksi variabel yang diamati relatif terhadap rata-rata pengukuran. Nilai NSE dapat dicari dengan persamaan berikut. NSE memiliki beberapa kriteria seperti ditunjukkan pada Tabel 2.2 berikut (Moriassi, 2007).

Nilai NSE	Kriteria Penilaian
$0,75 < NSE < 1,00$	Sangat baik
$0,65 < NSE < 0,75$	Baik
$0,5 \leq NSE < 0,65$	Cukup
$NSE < 0,5$	Buruk

2.3.4 Simulasi Model HEC-RAS

a) Geometry

Data geometri yang digunakan dalam pemodelan adalah data topografi sungai berupa *cross section* dan potongan memanjang hasil pengukuran lapangan pada sungai Brantas (Istiarto, 2019).

b) Data Sedimen

Gradasi sedimen pada 1 titik yang telah didapatkan diinput pada *menu define bed gradation*.

c) Boundary Condition

Boundary condition pada simulasi pemodelan ini adalah *flow-series* yang berupa debit dominan selama lima tahun. Sedangkan batas kondisi hulu angkutan sedimen digunakan “*equilibrium load*” (Army Corps of Engineering, 2016)

d) Analisis Angkutan Sedimen dan Perubahan Morfologi Sungai.

Hasil pemodelan angkutan sedimen dapat berupa jumlah total angkutan tiap *cross section*, perubahan berdasarkan waktu, dan besar perubahan morfologi yang dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik maupun angka.

2.4 Perhitungan Angkutan Sedimen

Perhitungan angkutan sedimen dasar sungai (*Bed load*) menggunakan metode Yang, Meyer-Peter dan Muller, dan Toffaletti. Metode ini menghasilkan rumus empiris sebagai berikut (Army Corps of Engineering, 2016) :

2.4.1 Yang

a) Untuk pasir $d_m < 2 \text{ mm}$

$$\log C_t = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega d_m}{v} - 0.457 \log \frac{u_*}{\omega} + \left(1.799 - 0.409 \log \frac{\omega d_m}{v} - 0.314 \log \frac{u_*}{\omega} \right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{crS}}{\omega} \right) \quad (2.2)$$

b) Untuk kerikil $d_m \geq 2 \text{ mm}$

$$\log C_t = 6.681 - 0.633 \log \frac{\omega d_m}{v} - 4.816 \log \frac{u_*}{\omega} + \left(2.784 - 0.305 \log \frac{\omega d_m}{v} - 0.282 \log \frac{u_*}{\omega} \right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{crS}}{\omega} \right) \quad (2.3)$$

2.4.2 Meyer-Peter dan Muller

$$\gamma_w R \mu I - 0.047 (\gamma_s - \gamma_w) d_m = 0.25 \left(\frac{\gamma_w}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot (q'_b)^{\frac{2}{3}} \quad (2.4)$$

Pada perhitungan angkutan sedimen juga terdapat faktor koreksi yang disebut “faktor *ripple*” (μ). yaitu :

$$\mu = \lambda' / \lambda = (C' / C)^{3/2} \quad (2.5)$$

Pada kondisi kritis $q'_b = 0$. $\mu = 1$ rumus MPM akan menjadi :

$$\frac{\gamma_w R I}{(\gamma_s - \gamma_w) d_m} = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w) d_m} = 0.047 \quad (2.6)$$

2.4.3 Toffaletti

a) Zona rendah

$$g_{ssl} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24} \right)^{1+n_v-0.756z}}{1+n_v-0.756z} \quad (2.7)$$

b) Zona tengah

$$g_{ssM} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24} \right)^{0.244z} \left[\frac{R}{2.5}^{1+n_v-Z} - \left(\frac{R}{11.24} \right)^{1+n_v-Z} \right]}{1+n_v-Z} \quad (2.8)$$

c) Zona atas

$$g_{ssU} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24} \right)^{0.244z} \left(\frac{R}{2.5} \right)^{0.5z} \left[R^{1+n_v-1.5z} - \left(\frac{R}{2.5} \right)^{1+n_v-1.5z} \right]}{1+n_v-1.5z} \quad (2.9)$$

d) Zona dasar

$$g_{sb} = M (2d_m)^{1+n_v-0.756z} \quad (2.10)$$

$$M = 43.2 C_L (1 + n_v) V R^{0.76Z-n_v} \quad (2.11)$$

$$g_s = g_{ssL} + g_{ssM} + g_{ssU} + g_b \quad (2.12)$$

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Analisis Debit

Simulasi debit menggunakan model HEC-RAS menghasilkan berbagai parameter hidraulik, antara lain elevasi muka air, kedalaman kritis, jari-jari hidraulik, lebar penampang, luas area pengaliran, serta bilangan *Froude*. Hasil simulasi tersebut disajikan pada Tabel 3.1, yang memperlihatkan data penampang melintang STA 21+560 pada ruas Jembatan Ngembul untuk periode Januari hingga Desember tahun 2019 hingga tahun 2023.

Tabel 3.1 Analisis Debit

Tahun	Bulan	Elv Dasar (m)	Elv Ma (m)	H	Q_t	B	A	P	R	V	Fr
2019	Jan	156.093	161.182	5.089	108.730	36.351	185.000	46.530	3.976	0.588	0.083
	Feb	156.089	161.429	5.341	124.640	36.702	196.018	47.384	4.137	0.636	0.088
	Mar	156.023	161.875	5.852	157.400	37.385	218.780	49.089	4.457	0.719	0.095
	Apr	155.998	161.869	5.870	156.420	37.391	219.504	49.132	4.468	0.713	0.094
	May	156.012	161.600	5.588	136.810	37.000	206.761	48.176	4.292	0.662	0.089
	Jun	156.050	160.824	4.774	87.150	35.894	171.360	45.442	3.771	0.509	0.074
	Jul	156.088	160.895	4.806	91.300	35.957	172.823	45.569	3.793	0.528	0.077
	Aug	156.118	160.956	4.838	94.960	36.016	174.262	45.693	3.814	0.545	0.079
	Sep	156.135	161.140	5.005	106.170	36.257	181.458	46.267	3.922	0.585	0.084
	Oct	156.160	159.991	3.830	45.710	34.653	132.738	42.314	3.137	0.344	0.056
	Nov	156.193	159.864	3.672	40.560	34.438	126.451	41.782	3.026	0.321	0.053
	Dec	156.216	160.867	4.651	89.690	35.803	166.502	45.104	3.692	0.539	0.080
2020	Jan	156.230	160.820	4.590	86.990	35.724	163.979	44.905	3.652	0.530	0.079
	Feb	156.144	161.804	5.660	151.780	37.203	210.579	48.523	4.340	0.721	0.097
	Mar	156.071	161.843	5.772	155.340	37.308	215.354	48.853	4.408	0.721	0.096
	Apr	156.066	161.850	5.784	156.180	37.322	215.877	48.890	4.416	0.723	0.096
	May	156.070	161.858	5.788	156.210	37.331	216.071	48.907	4.418	0.723	0.096
	Jun	156.079	161.814	5.735	152.780	37.260	213.676	48.730	4.385	0.715	0.095
	Jul	156.113	160.389	4.276	63.380	35.247	150.723	43.799	3.441	0.421	0.065
	Aug	156.167	160.609	4.442	74.920	35.492	157.655	44.376	3.553	0.475	0.072
	Sep	156.204	160.889	4.685	90.770	35.845	167.929	45.215	3.714	0.541	0.080
	Oct	156.224	161.142	4.918	106.190	36.185	177.959	46.021	3.867	0.597	0.086
	Nov	156.203	161.613	5.410	137.900	36.882	199.532	47.702	4.183	0.691	0.095
	Dec	156.175	161.666	5.491	142.270	36.979	203.053	47.961	4.234	0.701	0.095
2021	Jan	156.174	161.785	5.610	151.190	37.154	208.454	48.375	4.309	0.725	0.098
	Feb	156.179	161.800	5.621	152.360	37.173	208.952	48.415	4.316	0.729	0.098
	Mar	156.191	161.867	5.677	157.620	37.265	211.543	48.618	4.351	0.745	0.100
	Apr	156.200	161.870	5.670	157.500	37.263	211.288	48.603	4.347	0.745	0.100
	May	156.241	161.202	4.960	109.660	36.255	179.834	46.176	3.895	0.610	0.087
	Jun	156.279	161.855	5.576	156.270	37.187	207.358	48.339	4.290	0.754	0.102
	Jul	156.301	160.951	4.650	93.240	35.844	166.694	45.145	3.692	0.559	0.083
	Aug	156.357	161.034	4.677	98.310	35.911	167.952	45.265	3.710	0.585	0.086
	Sep	156.405	161.181	4.776	107.570	36.082	172.328	45.634	3.776	0.624	0.091
	Oct	156.439	161.174	4.735	106.930	36.041	170.662	45.511	3.750	0.627	0.092
	Nov	156.422	161.792	5.371	150.950	36.988	198.655	47.730	4.162	0.760	0.105
	Dec	156.407	161.800	5.393	151.240	37.011	199.585	47.796	4.176	0.758	0.104
2022	Jan	156.418	161.813	5.395	151.710	37.022	199.718	47.811	4.177	0.760	0.104
	Feb	156.437	161.760	5.323	147.330	36.928	196.575	47.574	4.132	0.749	0.104
	Mar	156.455	161.880	5.426	156.580	37.100	201.291	47.951	4.198	0.778	0.107
	Apr	156.463	162.039	5.577	168.120	37.343	208.247	48.496	4.294	0.807	0.109
	May	156.482	161.841	5.358	152.370	37.018	198.350	47.734	4.155	0.768	0.106
	Jun	156.514	161.772	5.258	146.720	36.887	193.959	47.403	4.092	0.756	0.105
	Jul	156.574	161.061	4.487	95.910	35.742	160.370	44.716	3.586	0.598	0.090
	Aug	156.628	161.437	4.809	121.170	36.267	174.413	45.885	3.801	0.695	0.101
	Sep	156.647	161.505	4.858	125.610	36.356	176.610	46.072	3.833	0.711	0.103
	Oct	156.629	161.915	5.286	156.720	37.024	195.728	47.597	4.112	0.801	0.111
	Nov	156.308	163.307	6.998	285.970	39.827	278.713	53.823	5.178	1.026	0.124

2023	Dec	156.197	162.762	6.565	230.570	38.954	255.738	52.084	4.910	0.902	0.112
	Jan	156.284	161.901	5.617	154.390	37.457	210.400	48.691	4.321	0.734	0.099
	Feb	156.266	163.233	6.967	278.080	39.865	277.719	53.798	5.162	1.001	0.121
	Mar	156.247	163.059	6.812	260.110	39.560	269.487	53.184	5.067	0.965	0.118
	Apr	156.293	162.465	6.172	202.000	38.386	236.936	50.731	4.670	0.853	0.110
	May	156.354	162.399	6.045	194.270	38.215	231.017	50.305	4.592	0.841	0.109
	Jun	156.433	161.607	5.174	128.480	36.886	190.852	47.234	4.041	0.673	0.094
	Jul	156.282	163.583	7.302	317.490	40.793	297.857	55.396	5.377	1.066	0.126
	Aug	156.276	160.785	4.509	71.520	35.907	161.896	44.924	3.604	0.442	0.066
	Sep	156.403	161.027	4.624	87.280	36.173	167.265	45.421	3.683	0.522	0.077
	Oct	156.517	161.012	4.495	86.650	36.035	161.972	45.025	3.597	0.535	0.081
	Nov	156.615	161.027	4.412	87.870	35.960	158.659	44.784	3.543	0.554	0.084
	Dec	156.701	161.048	4.347	89.340	35.904	156.062	44.597	3.499	0.572	0.088

3.2 Hasil Analisis Gradasi Butiran

Hasil pengujian gradasi butiran (*grain size*) di Laboratorium Mekanika Tanah pada sampel dari ruas Jembatan Ngembul menunjukkan nilai distribusi diameter butiran sebagai berikut:

$$D_{10} = 0.106 \text{ mm} = 0.000106 \text{ m}$$

$$D_{30} = 0.13 \text{ mm} = 0.00013 \text{ m}$$

$$D_{50} = 0.173 \text{ mm} = 0.000173 \text{ m}$$

$$D_{60} = 0.196 \text{ mm} = 0.000196 \text{ m}$$

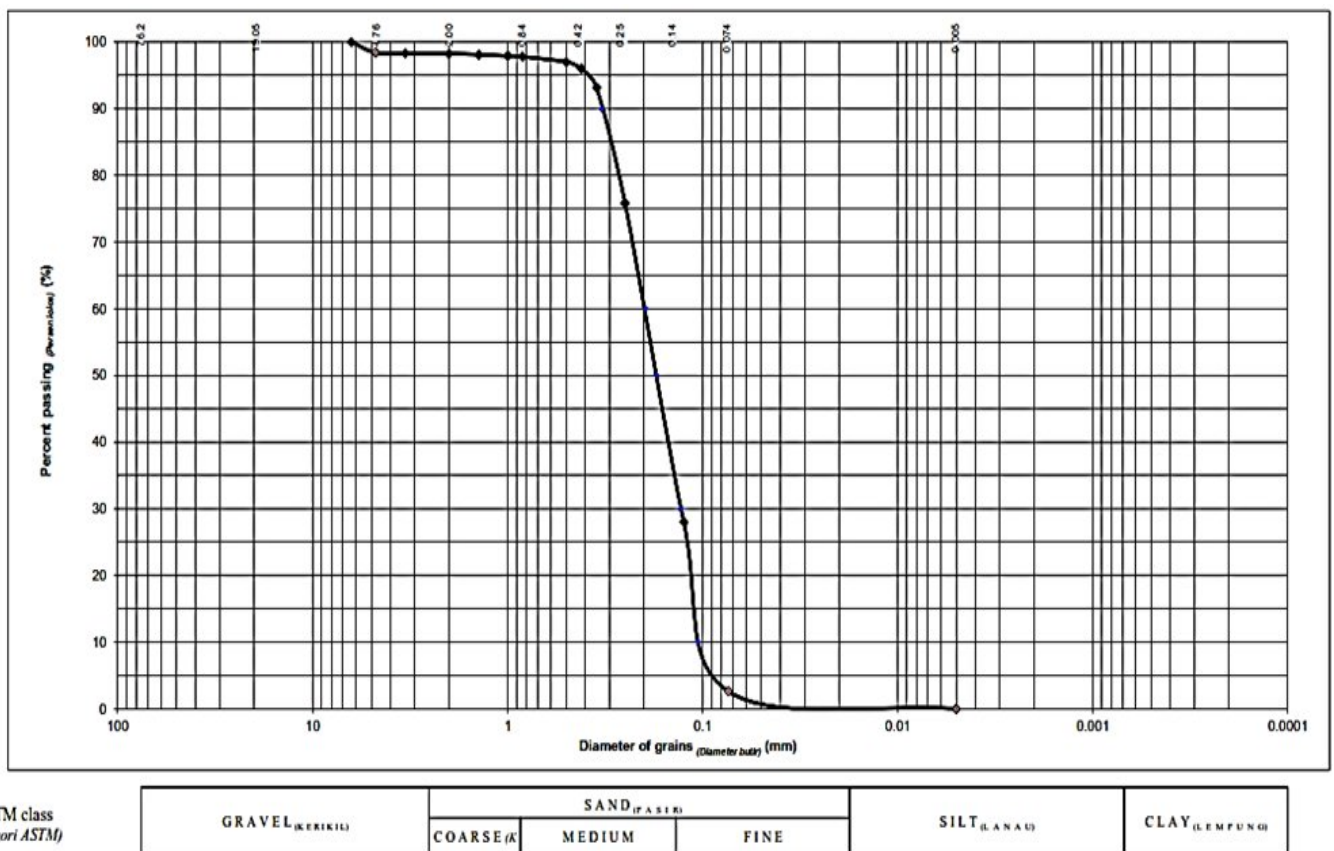
$$D_{90} = 0.33 \text{ mm} = 0.00033 \text{ m}$$

Data persentase serta berat jenis butiran sedimen pada ruas ini tercatat sebesar:

$$\text{Gravel} = 1.5 \%$$

$$\text{Sand} = 95.84 \% \quad \text{berat jenis } (\gamma_s) = 2675.1 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Silt} = 2.66 \%$$



Gambar 3.1 Grafik *Grain Size* Sedimen Jembatan Ngembul

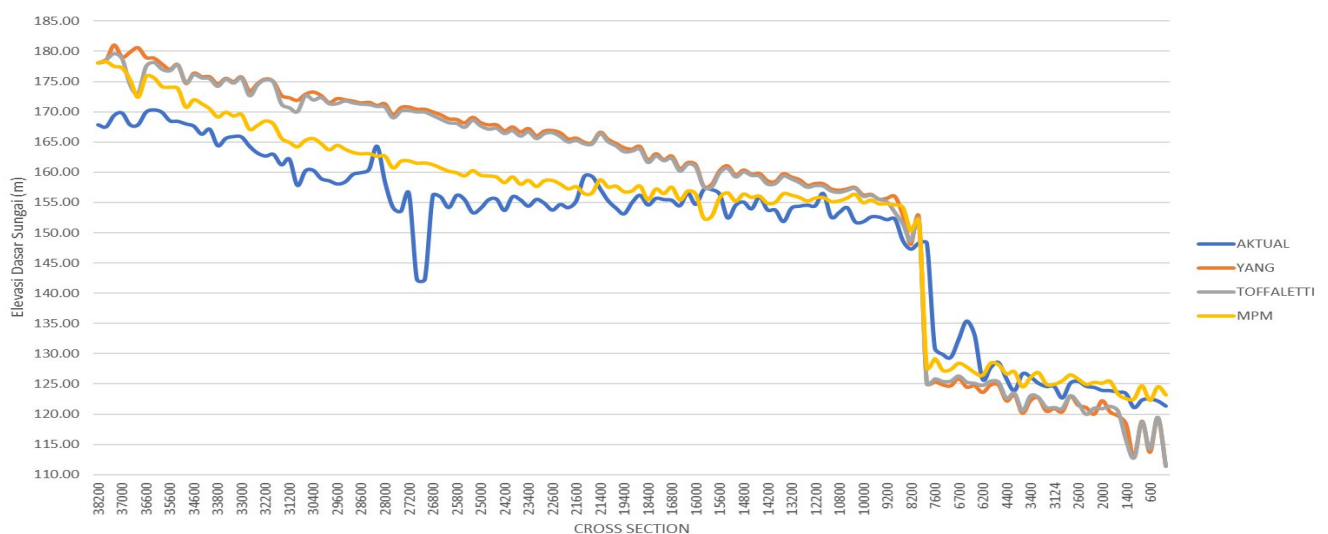
Tabel 3.2 memperlihatkan klasifikasi gradasi butiran pada ruas Jembatan Ngembul yang dijadikan acuan dalam analisis angkutan sedimen.

Tabel 3.2 Klasifikasi Gradasi Butiran

Klasifikasi	Diameter (mm)		%
	Min	Max	
Clay	0,001	0,005	0
Silt	0,005	0,075	2.66
Fine Sand	0,075	0,425	73.18
Medium Sand	0,425	2	22.42
Coarse Sand	2,0	4,75	0.240
Gravel	4,75	76,2	1.5

3.3 Hasil Uji Keandalan

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data pengukuran pada perubahan elevasi dasar sungai. Validasi perubahan elevasi dasar sungai dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data pengukuran batimetri pada beberapa penampang melintang yang diukur pada tahun 2015 (*forecast*) dan 2022 (*actual*) hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Validasi Perubahan Dasar Sungai

Hasil validasi menunjukkan bahwa model mampu memprediksi pola umum aggradasi dan degradasi dengan cukup baik, meskipun terdapat beberapa deviasi lokal yang signifikan. *Root Mean Square Error* (RMSE) antara perubahan elevasi dasar MPM adalah 4.836 m, yang relatif kecil dibandingkan dengan perubahan elevasi dasar Toffaletti maupun elevasi dasar Yang.

Tabel 3.3 Evaluasi Kinerja Model berdasarkan Kriteria Statistik

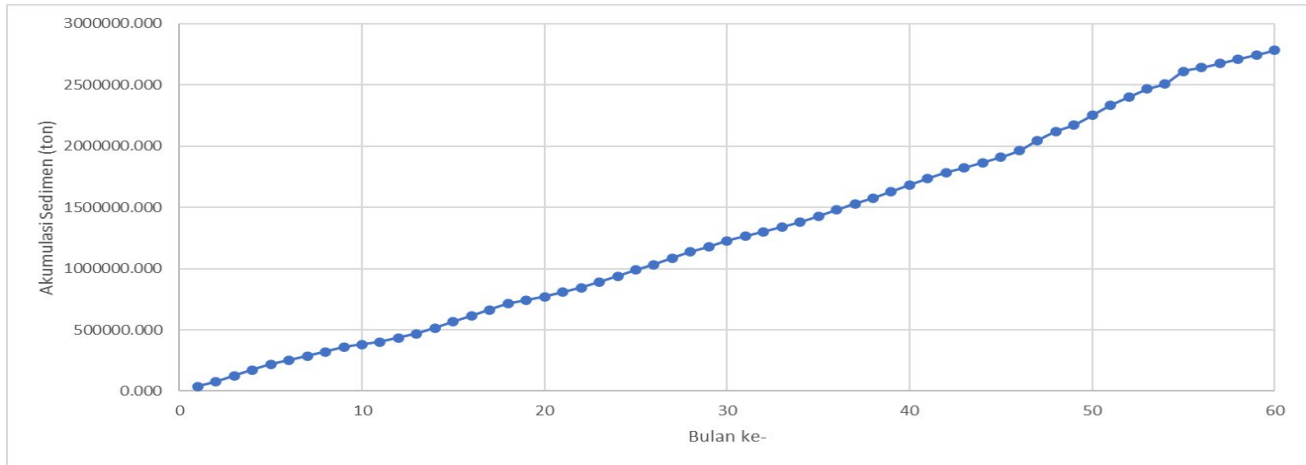
Simulasi	Parameter	Kriteria Statistik			
		R	RMSE	NSE	Klasifikasi
MPM	Perubahan Elevasi Dasar	0.9437	4.836	0.89	Sangat Baik
Toffaletti	Perubahan Elevasi Dasar	0.9273	9.185	0.588	Cukup
Yang	Perubahan Elevasi Dasar	0.9285	9.664	0.54	Cukup

Evaluasi kinerja model menggunakan kriteria *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) untuk parameter perubahan elevasi dasar menghasilkan nilai 0.89, yang menurut klasifikasi (Moriassi, 2007) termasuk dalam kategori “Sangat Baik”. Tabel 3.3 merangkum hasil evaluasi kinerja model berdasarkan berbagai kriteria statistik. Oleh karena itu untuk perhitungan sedimen selanjutnya hanya menggunakan rumus MPM.

3.4 Hasil Angkutan Sedimen Metode MPM

Perhitungan angkutan sedimen menggunakan metode MPM pada STA 38+200 menunjukkan nilai sebesar 36.016.14 ton pada bulan pertama, yang secara akumulatif meningkat menjadi 2.779.678.69 ton pada bulan ke-60. Analisis grafik yang disajikan pada Gambar 3.3 menunjukkan ketidakseragaman nilai angkutan sedimen setiap bulannya.

Pola ini mengisyaratkan bahwa morfologi penampang sungai bersifat dinamis dan mengalami perubahan seiring waktu. Perubahan morfologi pada setiap penampang bervariasi karena adanya proses degradasi dan aggradasi yang mengubah dasar sungai. Tanpa adanya tindakan teknis yang tepat, seperti pengerukan (*dredging*) atau penempatan struktur pengendali, akumulasi material dapat mengurangi kapasitas tampung sungai. Kondisi ini dapat menyebabkan penurunan kemampuan sungai dalam mengalirkan debit, yang pada akhirnya memicu banjir atau limpasan air.



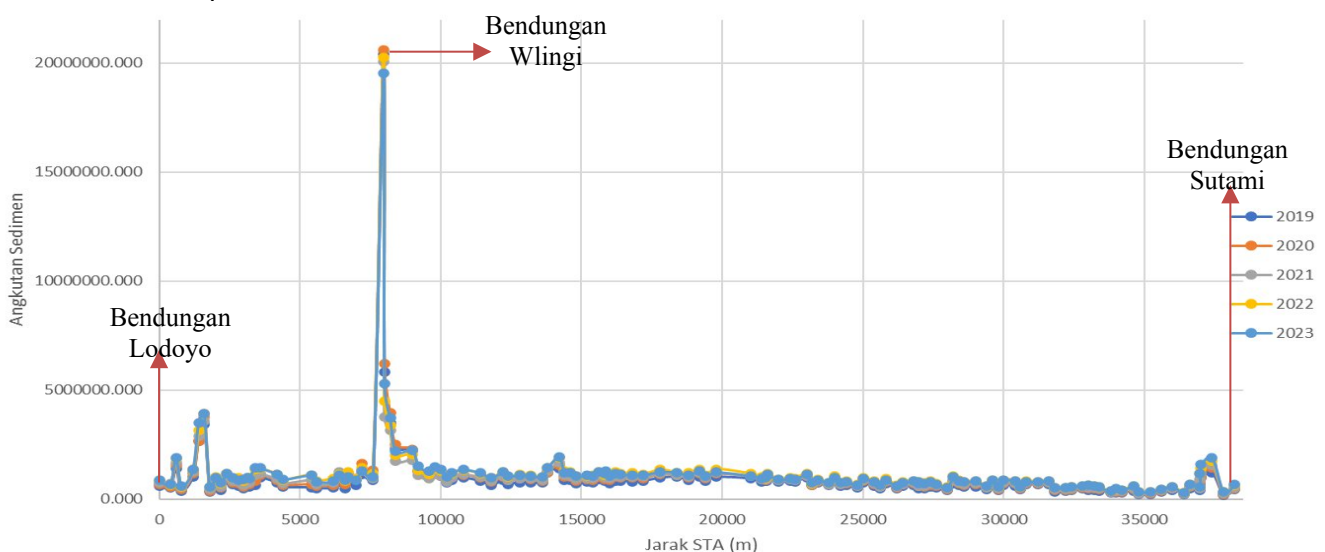
Gambar 3.3 Grafik Akumulasi Sedimen Pada STA 38+200

Hasil perhitungan berdasarkan data komposisi material sedimen di ruas Jembatan Ngembul, menunjukkan bahwa volume sedimen total yang terangkut dalam aliran mencapai 1.039.093.4 m³ dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Total Angkutan Sedimen Di STA 38+200

No	Jenis tanah	Komposisi (%)	γ_s (ton/m ³)	Total Load (ton)	Volume (m ³)
	1	2	3	4	6
1	gravel	1.5			
2	Sand	95.84	2.6751	2.779.678.69	1.039.093.4
3	Silt	2.66			
4	Clay	0			

Berdasarkan perhitungan di STA 38+000 hingga STA 0, total angkutan sedimen kumulatif mencapai 160.744.185 ton. Nilai angkutan sedimen tertinggi tercatat di STA 7+970, sedangkan nilai terendah ditemukan STA 36+400. Rincian data ini dapat dilihat di Gambar 3.4.



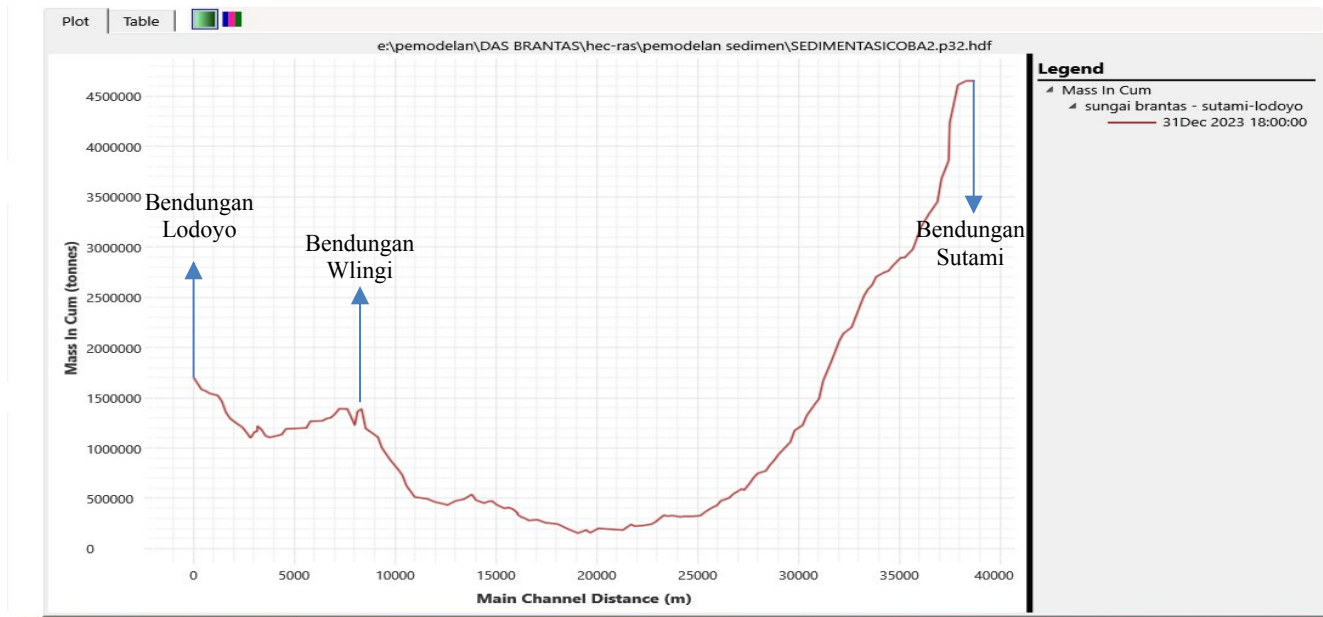
Gambar 3.4 Grafik Nilai Angkutan Sedimen Sungai Brantas 2019-2023

Sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3.4, terjadi perubahan elevasi dasar sungai yang cukup besar sebagai akibat dari alterasi morfologi berupa aggradasi dan degradasi. Fenomena ini disebabkan oleh transpor material sedimen yang

dipicu oleh debit aliran. Mengingat skala perubahan yang ekstrem, diperlukan sebuah langkah-langkah pengendali untuk meregulasi laju angkutan sedimen. Penelitian ini mengusulkan pada STA 7+970 hingga STA 8+400 dilakukan *dredging*.

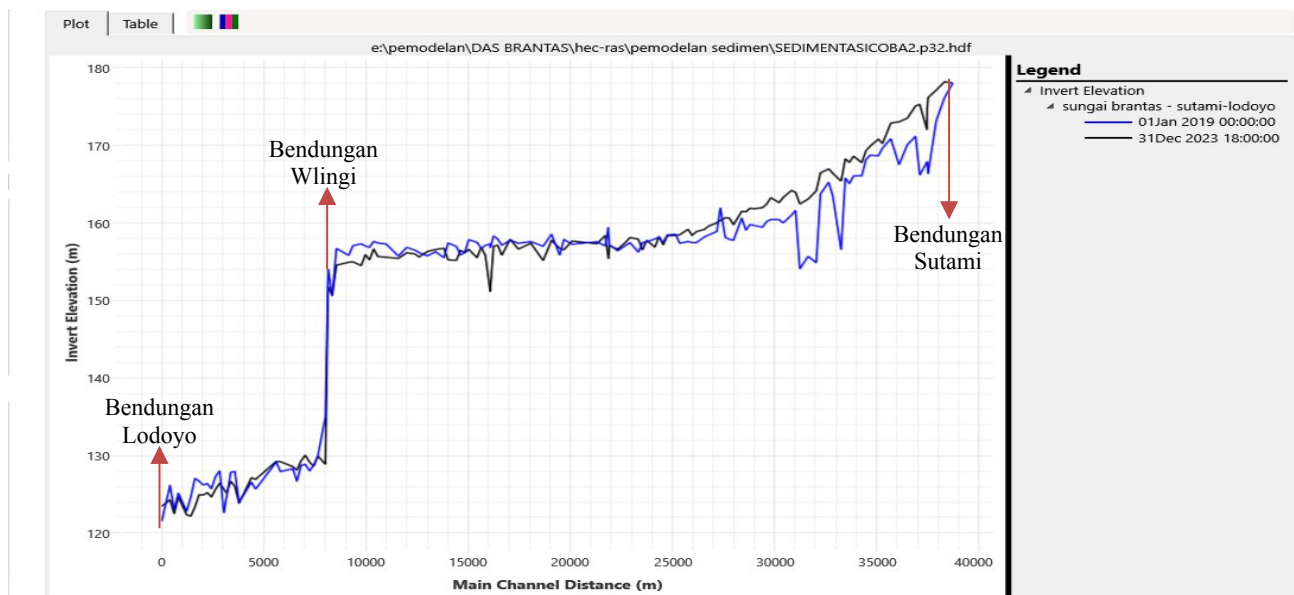
3.5 Model HEC-RAS

Berdasarkan hasil pemodelan dengan Metode Meyer-Peter-Müller yang menggunakan data debit aliran selama lima tahun (2019 - 2023), diperoleh total angkutan sedimen sebesar 163.412.910.7 ton. Nilai tersebut merupakan akumulasi sedimen yang terjadi secara berkelanjutan dari Januari 2019 hingga Desember 2023. Simulasi menunjukkan bahwa angkutan sedimen tertinggi terjadi di STA 38+200, sedangkan yang terendah teridentifikasi dari penampang melintang STA 18+800, sebagaimana diilustrasikan di Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Grafik Angkutan Sedimen 2019 - 2023

Perubahan morfologi sungai dengan ditunjukkan hasil perubahan elevasi dasar sungai yang dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Grafik Perubahan Elevasi Dasar Dari Tahun 2019 - 2023

Hasil simulasi pada Gambar 3.6 menunjukkan adanya degradasi di beberapa titik misalnya pada titik STA 38+200 hingga STA 28+000 kemudian terjadi aggradasi di STA 25+000 hingga STA 10+000 pada periode 2019–2023

4. Kesimpulan

Laju angkutan sedimen yang terjadi di Sungai Brantas, khususnya ruas Bendungan Sutami-Lodoyo, dapat dihitung menggunakan metode empiris dan disimulasikan dengan perangkat lunak HEC-RAS. Hasil validasi model menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE) antara perubahan elevasi dasar hasil simulasi dan pengukuran adalah 4.84 m dan untuk kriteria *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) menunjukkan bahwa model ini memiliki kinerja "Sangat Baik" dengan nilai NSE sebesar 0.89, sehingga metode Meyer-Peter-Müller (MPM) dianggap paling andal untuk analisis angkutan sedimen. Perhitungan dengan metode empiris (MPM) menunjukkan total angkutan sedimen kumulatif mencapai 160.744.185 ton, sementara simulasi HEC-RAS menghasilkan total angkutan sedimen sebesar 163.412.910.7 ton. Dari perbandingan hasil tersebut diperoleh nilai selisih dari kedua metode sebesar 1.66%. Angkutan sedimen yang terjadi menyebabkan perubahan morfologi dasar sungai, yang ditandai dengan proses aggradasi dan degradasi. Perubahan ini secara signifikan mengurangi kapasitas tampung sungai, yang dapat meningkatkan risiko banjir. Sebagai upaya mitigasi, diperlukan tindakan pengendalian seperti pengerukan (*dredging*), yang diusulkan untuk dilakukan di STA 1+790 hingga STA 8+400 guna meregulasi laju angkutan sedimen.

DAFTAR PUSTAKA

- Andriawati, I. D., Rispiningtati, & Juwono, P. T. (2015). Wonogiri Ditinjau Dari Nilai Ekonomi. *Jurnal O*, 6, 55–65.
- Army Corps of Engineering, U. (2016). HEC-RAS River Analysis System. *User's Manual, Version 4.1, November*, 1–790.
- Aviva, Y. N. (2018). *Studi Laju Sedimentasi Waduk Sampean Baru Menggunakan Program HEC-RAS 5.0.3*.
- Bari, F., Moh. Sholichin, & Dian Sisinggih. (2024). Studi Laju Angkutan Sedimen Sungai Brantas Hulu Bendungan Senggruh Menggunakan Program Aplikasi HEC-RAS. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 4(02), 1163–1174. <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2024.004.02.122>
- Dewi, N. (2018). *Digital Digital Repository Repository Universitas Universitas Jember Jember Digital Digital Repository Repository Universitas Universitas Jember Jember*.
- Erlina. (2018). *Analisis Banjir Dan Sedimentasi Wilayah Sungai Brantas (Tinjauan Terhadap Metode Pengendalian)* (p. 14). *jurnal Teknik Sipil UCY*. <https://doi.org/ISSN: 1907-2368>
- Iqbal, M., Zuhri, S., Sisinggih, D., & Asmaranto, R. (2022). Analisis Angkutan Sedimen Sungai Welang Pasuruan Menggunakan Aplikasi HEC-RAS. In *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air* (Vol. 3, Issue 1). <https://jtresda.ub.ac.id/>
- Istiarto. (2019). *Pengukuran Transpor Sedimen*. 1–19.
- Kasyful Haq, M. F., Sholichin, M., & Asmaranto, R. (2021). Analisa Pendugaan Laju Erosi Dengan Menggunakan Model Agricultural Non Point Source Pollution (AGNPS) di Sub Das Lesti Kabupaten Malang. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 1(1), 180–191. <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2021.001.01.16>
- Moriasi, D. N. (2007). Model Evaluation Guidelines For Systematic Quantification Of Accuracy In Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.25100/cm.v39i3.590>
- PSDA WS Brantas. (2021). *Pengelolaan sumber daya air wilayah sungai brantas*.
- Suroso, S., & Widiyanto, W. (2009). Model Pengendalian Sedimentasi Waduk Mrica dengan Fluidisasi. *Dinamika Rekayasa*, 5(2), 1–10.
- Wardhana, P. N. (2015). Analisis Transpor Sedimen sungai Opak dengan Menggunakan Program HEC-RAS 4.1.0. *Jurnal Teknisia*, XX(1), 22–31.