

Pemodelan Perubahan Morfologi Sungai Akibat Pembuangan Lumpur Sidoarjo Pada Kali Porong

Rizki Robbi Rahman Alam^{1*}, Ismail Saud¹, Fakhrudin Naufal Ansori¹, Deris Faisa R¹, A. Faiz Hadi P¹

Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya¹

Koresponden*, rizki_robbi@its.ac.id

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	26 Desember 2023	<i>The continuous discharge of mud into Porong River can affect the river's capacity. Therefore, this research aims to understand Porong's River capacity after becoming a disposal site for Sidoarjo mud and to analyze its effects over the next 10 years. The methods used include the application of the Thomas Fiering method to generate rainfall data during that period. This rainfall data is then processed using FJ Mock calculations to obtain Kali Porong's discharge data. Subsequently, this river discharge data is input into the MIKE 21 application to simulate the water surface elevation in Kali Porong. The results of this study include modeling of water surface elevations that reveal the distribution of sediment deposited at various locations based on U*. An important implication of this research is that the modeling results can be used by relevant parties in managing Kali Porong's capacity as a disposal site for Sidoarjo mud until 2032. A critical finding from this study is the presence of sections with overtopping conditions on both the right and left sides of line 5, suggesting the need to raise the embankment by 2 meters on the right side and 0.5 meters on the left side to maintain the capacity and sustainability of the river.</i>
Diperbaiki	30 Januari 2024	
Disetujui	31 Mei 2024	

Keywords: porong river, thomas fiering, fj mock, mike 21, overtopping.

Abstrak
Pembuangan lumpur yang terus-menerus ke Kali Porong dapat mempengaruhi kapasitas sungai. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memahami kapasitas Kali Porong setelah menjadi tempat pembuangan lumpur Sidoarjo serta menganalisis pengaruhnya dalam jangka waktu 10 tahun ke depan. Metode yang digunakan meliputi penggunaan metode Thomas Fiering untuk membangkitkan data curah hujan selama periode tersebut. Data curah hujan tersebut kemudian diolah menggunakan perhitungan FJ Mock untuk mendapatkan data debit Kali Porong. Selanjutnya, data debit sungai ini dimasukkan ke dalam aplikasi MIKE 21 untuk melakukan simulasi ketinggian permukaan air di Kali Porong. Hasil penelitian ini meliputi pemodelan tinggi permukaan air yang mengungkapkan penyebaran sedimen yang terendap di beberapa lokasi berdasarkan U*. Implikasi penting dari penelitian ini adalah hasil pemodelan dapat digunakan oleh pihak terkait dalam pengelolaan kapasitas Kali Porong setelah menjadi tempat pembuangan lumpur Sidoarjo hingga tahun 2032. Temuan kritis dari penelitian ini adalah adanya penampang dengan kondisi overtopping pada line 5 sisi kanan dan sisi kiri, yang menyarankan perlunya meninggikan tanggul setinggi 2 meter pada sisi kanan dan 0,5 meter pada sisi kiri untuk menjaga kapasitas dan keberlanjutan sungai tersebut.

Kata kunci: kali porong, thomas fiering, fj mock, mike 21, overtopping.

1. Pendahuluan

Peristiwa tragis Lumpur Sidoarjo telah melanda Kabupaten Sidoarjo sejak tahun 2006. Bencana tersebut berawal dari semburan lumpur panas yang muncul tiba-tiba pada lokasi pengeboran di Dusun Balongnongo, Desa Renokenongo, Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo. Semburan lumpur yang mempunyai suhu tinggi ini menyebabkan korban materi berupa 16 desa di tiga kecamatan yang tenggelam dalam lumpur setinggi enam meter. Lebih dari 25.000 jiwa harus diungsikan, sementara 15 pabrik, 18 sekolah, 1810 rumah, dua kantor, serta 15 masjid dan musholla tenggelam akibat peristiwa tragis Lumpur Sidoarjo tersebut.

Tidak lama setelah semburan terjadi, pemerintah melakukan upaya untuk menanggulangi bencana tersebut dengan melakukan metode side tracking, snubbing unit, relief well, dan Inseri High

Density Chained Ball. Namun, upaya tersebut tidak membuahkan hasil. Upaya lain terus dilakukan dengan membangun tanggul dan kolam penampungan lumpur yang kemudian lumpur tersebut akan dibuang ke laut.

Setelah tragedi Lumpur Sidoarjo, penanganan lumpur panas ini menjadi semakin kompleks dan berat. Volume lumpur yang disemburkan ke wilayah sekitar meningkat secara signifikan, mencapai 126.000 m³ per hari [1]. Pada bulan September 2006, pemerintah memutuskan untuk mengalirkan lumpur panas tersebut ke Kali Porong sebagai upaya untuk mengalirkannya menuju laut. Kali Porong adalah aliran sungai yang merupakan saluran pembuangan lumpur Sidoarjo dengan volume buangan yang cukup besar mencapai 60.000 m³ per hari.

Keputusan ini ternyata membawa dampak lain yang cukup serius. Volume sedimen lumpur yang dialirkan ke Kali Porong

menyebabkan adanya perubahan morfologi sungai dan pendangkalan di sungai tersebut. Jika masalah ini tidak ditangani dengan tepat, dapat berpotensi menyebabkan banjir ketika musim hujan tiba, terutama jika upaya-upaya penanggulangan banjir tidak dilakukan dengan baik. Oleh karena itu, penelitian ini menghitung kapasitas Kali Porong sebagai akibat dari tambahan sedimen yang berasal dari Lumpur Sidoarjo. Selain itu, dilakukan juga prediksi peningkatan sedimentasi untuk memahami bagaimana kondisi sedimen yang ada pada Kali Porong sebagai langkah dalam menghadapi masalah potensi pendangkalan tersebut. Untuk mengatasi permasalahan yang terjadi akibat sedimen, dilakukan pemberian saran penanganan sebagai masukan pada instansi pengelola.

2. Metode

Banyak metode yang bisa dilakukan dalam penelitian ini. Pada penelitian ini menggunakan metode mika 21. Pada penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk mempelajari terkait teori yang dibutuhkan dalam pengerjaan penelitian ini. Data – data yang dibutuhkan untuk penelitian ini antara lain Volume lumpur yang terbuang ke Kali Porong, Bathimetri kali porong, Pasang surut Kali Porong, Debit AWLR Kali Porong, dan curah hujan daerah tahun 2013-2022 yang didapat dengan metode polygon thiessen.

Analisis awal yang dilakukan adalah analisis hidrologi dengan melakukan pembobotan curah hujan berdasarkan luas daerah pengaruh dengan metode polygon thiessen. Setelah didapatkan curah hujan yang sudah dibobot, dilakukan pembangkitan data curah hujan untuk 10 tahun kedepan. Metode yang digunakan untuk membangkitkan data curah hujan adalah Thomas Fiering.

2.1. Thomas Fiering

Thomas Fiering merupakan nilai rerata, standar deviasi, koefisien korelasi, dan bilangan acak [2]. Metode Thomas Fiering umumnya digunakan dan dianggap sebagai pendekatan stokastik yang khas untuk peramalan dalam hidrologi [3]. Model Thomas Fiering memungkinkan pembangkitan data nilai curah hujan, pendekatan persamaan bangkitan menggunakan persamaan (1).

$$R_j = X_b + rx (R_{j-1} - R_{j-1}) + t_i S_d (1 - k_x^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Keterangan:

- Rj = Hujan Hasil Pembangkitan untuk hari j (mm)
- Ri j-1 = Curah Hujan pada Tahun ke I, hari sebelumnya
- kx = Korelasi antara curah hujan hari sebelumnya
- rx = Koefisien regresi antara curah hujan j dan j-1
- ti = Bilangan Random Normal

Untuk menguji data hasil perhitungan Thomas Fiering diperlukan Uji T dan Uji F :

2.2. Uji T

Uji T biasanya digunakan untuk menguji sampel berukuran kecil seperti menguji nilai rata-rata dua kelompok sampel, menguji nilai rata-rata terhadap rata-rata populasi, menguji data yang berpasangan, dan menguji koefisien korelasi. Pengujian distribusi T dapat

dilakukan dengan persamaan (2) dengan hasil nilai persamaan (2) dibandingkan dengan nilai kritis persamaan (3).

$$t = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sigma \sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}} \quad (2)$$

Keterangan :

- T = Variabel t terhitung
- \bar{X}_1 = Rata rata hitung sampel set ke 1
- \bar{X}_2 = Rata rata hitung sampel set ke 1
- N1 = Jumlah sampel set ke-1
- N2 = Jumlah sampel set ke-2

$$\sigma = \sqrt{\frac{N_1 S_1^2 + N_2 S_2^2}{N_1 + N_2 - 2}} \quad (3)$$

Keterangan:

- S_1^2, S_2^2 = Varian sampel set ke 1 dan ke 2
- $dk = N_1 + N_2 - 2$ = Derajat kebebasan

Keputusan

Apabila t terhitung > nilai kritis t_c , maka kedua sampel yang diuji tidak berasal dari populasi yang sama

Apabila t terhitung < t_c maka kedua sampel berasal dari populasi yang sama.

2.3. Uji F

Uji kestabilan varian (Uji F) dimaksudkan untuk memastikan bahwa nilai varian dan/atau rata-rata adalah homogen [4]. Pendekatan persamaan Uji F menggunakan persamaan (4) dengan setiap variable persamaan (4) diuraikan pada persamaan (5) untuk nilai c, dan nilai perbandingan F pada persamaan (6). Nilai variable derajat kebebasan dk_1 menggunakan pendekatan persamaan (7) dan dk_2 menggunakan pendekatan persamaan (8).

$$f(F) = c \left\{ \frac{F^{\frac{(dk_1)}{2-1}}}{(dk_2 + dk_1 F)^{\frac{(dk_1 + dk_2)}{2}}} \right\} \quad (4)$$

Keterangan:

$$c = \frac{(dk_1)^{dk_1/2} (dk_2)^{dk_2/2} r^{\frac{(dk_1 + dk_2)}{2}}}{r^{\frac{(dk_1)}{2}} r^{\frac{(dk_2)}{2}}} \quad (5)$$

$$F = \frac{N_1 S_1^2 (N_2 - 1)}{N_2 S_2^2 (N_1 - 1)} \quad (6)$$

$$dk_1 = N_1 - 1 \quad (7)$$

$$dk_2 = N_2 - 1 \quad (8)$$

Keterangan:

- f(F) = Fungsi distribusi F
- F = Perbandingan F
- dk1 = Derajat kebebasan kelompok sampel ke 1
- dk2 = Derajat kebebasan kelompok sampel ke 2

- r = Fungsi gamma
 N1 = Jumlah sampel kelompok sampel ke 1
 N2 = Jumlah sampel kelompok sampel ke 2
 S1 = Deviasi standar kelompok sampel ke 1
 S2 = Deviasi standar kelompok sampel ke 2

Keputusan Penggunaan distribusi F sama dengan distribusi T. Dalam hal ini hipotesis nol ditolak apabila S_1^2 lebih besar pengujian dua sisi yang dapat dilihat pada tabel Nilai Kritis Fe Distribusi F.

Untuk mendapatkan debit tahun 2023-2032, digunakan metode FJ Mock dengan parameter evapotranspirasi, permukaan lahan terbuka, koefisien infiltrasi, volume penyimpanan awal. Setelah didapatkan debit perhitungan FJ Mock tahun 2022, dibandingkan dengan debit AWLR. Untuk menguji keabsahan data debit, dilakukan uji NSE, koefisien korelasi, kesalahan relatif.

2.4. FJ Mock

Model hidrologi FJ.Mock menghitung curah hujan dan data evapotranspirasi aktual dari daerah aliran sungai [5]. Metode Mock dikembangkan oleh Dr. F.J.Mock. Metode Mock untuk memperkirakan besarnya debit suatu daerah aliran sungai berdasarkan konsep water balance. Air hujan yang jatuh (presipitasi) akan mengalami evapotranspirasi sesuai dengan vegetasi yang menutupi daerah tangkapan hujan.

Berikut merupakan Langkah-langkah yang dilakukan untuk menghitung debit dengan Metode F.J. Mock :

- Mempersiapkan data-data yang dibutuhkan antara lain: rerata hujan daerah (P), evapotranspirasi potensial (Eto), jumlah hari hujan (n), faktor resesi aliran air tanah (k), dan angka koefisien infiltrasi (i).
- Menentukan evapotranspirasi terbatas seperti persamaan (9) dan (10).

$$E_a = E_{T_o} - \Delta E \Rightarrow (E_a = E_t) \quad (9)$$

$$\Delta E = E_{T_o} \times (m/20) \times (18-n) \Rightarrow (E = \Delta E) \quad (10)$$

Keterangan:

- E_a = Evapotranspirasi actual (mm/hari)
 E_t = Evapotranspirasi terbatas (mm/hari)
 E_{T_o} = Evaporasi Potensial metode Penman (mm/hari)
 M = Prosentase lahan yang tidak tertutup tanaman,
 m = 0 untuk lahan dengan hujan lebat
 m = 0 untuk lahan dengan hutan sekunder musim hujan
 m = 10-40% untuk lahan yang tererosi
 m = 30-50% untuk lahan pertanian yang diolah
 n = Jumlah hari hujan dalam sebulan

- Menentukan besar hujan di permukaan tanah (D_s) seperti persamaan (11).

$$D_s = P - E_t \quad (11)$$

Keterangan:

- D_s = Air hujan di permukaan tanah (mm/hari)
 P = Curah Hujan (mm/hari)
 E_t = Evapotranspirasi terbatas (mm/hari)

- Menentukan harga kelembaban tanah (SMC)
- Menentukan infiltrasi (i) dengan koefisien antara 0-1
- Menentukan air lebihan tanah (water surplus)
- Menentukan kandungan air bawah tanah (V_n) seperti persamaan (12).

$$V_n = k \cdot V_{n-1} + \frac{1}{2} (1+k) \cdot I_n \quad (12)$$

Dimana :

- V_n = Volume air tanah bulan ke n
 V_{n-1} = Volume air tanah bulan ke (n-1)
 k = qt/q_o = Faktor resesi aliran tanah
 qt = Aliran air tanah pada waktu t (bulan ke t)
 q_o = Aliran air tanah pada awal (bulan ke 0)
 I_n = Infiltrasi bulan ke-n

- Menentukan perubahan kandungan air bawah tanah (DV_n) seperti persamaan (13).

$$DV_{n-1} = V_n - V_{n-1} \quad (13)$$

Dimana :

- V_n = Volume air tanah bulan ke n
 V_{n-1} = Volume air tanah bulan ke (n-1)
 DV_{n-1} = Perubahan volume aliran air tanah

- Menentukan aliran dasar dan aliran langsung
- Menentukan debit yang tersedia di sungai

2.5. Uji Nash Sutcliffe Efficiency (NSE)

Metode uji ini memperlihatkan seberapa baik plot nilai observasi dibanding dengan nilai prediksi dan simulasi dengan rentang nilai hingga satu. Apabila nilai NSE yang dihasilkan mendekati 1 maka hasil semakin baik. Nilai NSE memberikan gambaran mengenai kedekatan - kedekatan masing-masing data per waktu kejadian [6]. Nilai NSE menggunakan pendekatan persamaan (14).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (X_i - Y_i)^2}{(X_i - \bar{X}_i)^2} \quad (14)$$

Dimana :

- X_i = Data Observasi (Data Aktual)
 Y_i = Hasil Simulasi Data
 \bar{X}_i = Rata-rata data Observasi
 N = Jumlah Data

2.6. Uji Kesalahan Relatif (Kr)

Analisis yang digunakan untuk mengevaluasi besaran persentase kesalahan relatif antara nilai hasil pemodelan dengan hasil pengamatan disebut kesalahan relatif (Kr) [7]. Persamaan (15) digunakan untuk menentukan kesalahan relatif.

$$K_r = \left(\frac{X_a - X_b}{X_a} \right) \times 100\% \quad (15)$$

Dengan :

Kr	= Kesalahan Relatif (%)
Xa	= Nilai Pengamatan (m ³ /s)
Xb	= Nilai Hasil Pemodelan (m ³ /s)

2.7. Uji Koefisien Korelasi (R)

Koefisien korelasi memberikan gambaran tentang tingkat korelasi antara kedua jenis debit tersebut. Jika nilai koefisien korelasi mendekati 1, itu menunjukkan adanya hubungan erat yang bersifat positif antara kedua variabel. Artinya, jika nilai variabel pertama meningkat, nilai variabel kedua cenderung meningkat juga pada objek yang sama. Besarnya nilai koefisien korelasi menggunakan pendekatan persamaan (16).

$$r = \frac{\sqrt{\sum(Q_{obs} - Q)^2 - \sum(Q_{obs} - Q_{cal})^2}}{\sum(Q_{obs} - Q)^2} \quad (16)$$

Dengan :

R	= Koefisien Korelasi
Q _{cal}	= Debit terhitung (m ³ /s)
Q _{obs}	= Debit terukur (m ³ /s)
Q	= Debit terukur rerata (m ³ /s)

2.8. Sedimen

Sedimen di sungai dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu sedimen melayang (suspended load) dan sedimen merayap (bed load). Sedimen melayang akan dialirkan lebih jauh dibandingkan dengan sedimen merayap. Disamping itu sedimen melayang biasanya juga mengandung partikel-partikel lain seperti zat hara atau bahan lain yang dapat mencemari air. Oleh karena itu penetapan hasil sedimen melayang lebih sering dilakukan dibandingkan sedimen merayap [8]. Hermawan [9] memetakan sebaran sedimen Lumpur Sidoarjo mulai dari outlet pembuangan lumpur hingga muara Kali Porong. Butiran *gravel* mayoritas mengendap pada lokasi yang jaraknya dekat dengan outlet pembuangan lumpur. Sedangkan material pasir banyak ditemukan pada muara dan material lanau serta lempung banyak ditemukan pada lokasi yang berjarak 15 km sampai 12 km dari outlet pembuangan lumpur.

2.9. MIKE 21

Pada studi sebelumnya banyak penelitian yang menggunakan software ini untuk analisis sungai. Simulasi genangan air di Sungai Ajoy [10], selain itu juga Penerapan Model Numerik Angkutan Sedimen Tersuspensi di Sepanjang Kerala Tengah, Pesisir Barat India [11]. Software ini memiliki berbagai fitur pemodelan, termasuk pemodelan aliran, prediksi ketinggian air, pemodelan gelombang, pemodelan sedimen, transportasi sedimen, dan pemodelan kualitas air. Pengembangan software ini dilakukan oleh DHI Water and Environment [12].

MIKE 21 Hydrodynamic Module (HD Module) merupakan model matematika yang digunakan untuk menghitung perilaku hidrodinamika air yang dipengaruhi berbagai macam gaya. Salah satu yang mempengaruhi sebagai contoh kondisi angin dan muka air

tertentu yang sejak awal ditentukan pada *open model boundary*. Efek yang bisa disimulasikan dengan modul ini antara lain:

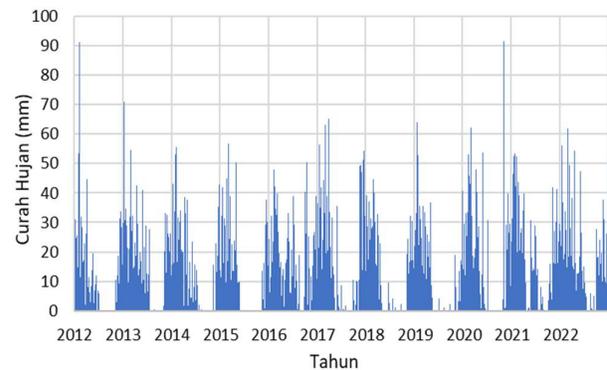
1. *Bottom Shear Stress*
2. *Wind shear stress*
3. *Barometric pressure gradients*
4. *Coriolis force*
5. *Momentum dispersion*
6. *Sources and sinks*
7. *Evaporation*
8. *Flooding and drying*
9. *Wave radiation stress*

Pemodelan sungai menggunakan *software MIKE 21* dengan input mesh, debit sungai, dan data pasang surut. Peningkatan dianalisis berdasarkan U_c. Daerah yang memiliki U* dibawah U_c, dianggap terjadi pengendapan sedimen. Peningkatan sedimen dihitung dengan membagi antara volume dengan luasan daerah dengan U* dibawah U_c. Pemodelan sungai dilakukan selama 10 tahun yang dimulai dari tahun 2023 hingga tahun 2032. Hasil ketinggian muka air yang ada pada *software* diplot pada cross section Kali Porong. Dari gambar yang sudah diplot, dianalisis penampang mana yang mengalami overtopping. Dari hasil analisis penampang, disarankan penanganan penampang yang mengalami overtopping.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Poligon Thiessen

Poligon Thiessen digunakan untuk pembobotan hujan dengan luas pengaruh stasiun hujan yang didapatkan dari aplikasi Arc-GIS sebesar 1404.851 km². Luas sudah mencakup beberapa stasiun hujan yang berpengaruh dalam aliran Kali Porong. Berikut merupakan hasil hujan harian daerah berdasarkan pembobotan luas pengaruh stasiun hujan yang tersaji pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Grafik Hujan Harian Daerah Tahun 2012 -Tahun 2022

Hujan harian daerah maksimum selama 10 tahun terjadi pada tanggal 1 November sebesar 91.356 mm. Rerata hujan harian selama 10 tahun sebesar 11.770 mm.

3.2. Pembangkitan Data Curah Hujan

Pembangkitan data curah hujan menggunakan data pada gambar 1. Bangkitan data dilakukan selama 10 tahun, dimulai dari tahun

2023 sampai dengan tahun 2032. Berikut hasil bangkitan hujan rerata bulanan yang tersaji pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Curah Hujan Bangkitan Bulan Januari Tahun 2023 - Tahun 2032

2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
27.1	12.1	18.2	0.23	18.3	7.89	7.72	3.77	34.6	27.6
8.84	13.9	6.53	21.7	0.64	22.2	4.12	32.5	2.26	29.4
11.7	1.28	14.2	8.89	10.9	7.33	20.6	13.4	38.6	6.31
6.31	6.59	13	13.1	0.96	10.6	3.61	7.06	5.93	3.3
39.2	32.2	0.45	2.7	24.4	3.71	14.6	13.5	5.1	24
31.3	21	15.9	5.62	3.25	36.4	7.18	28.1	4.63	15.2
18.7	19.8	18.6	17.9	9.34	18.6	32.5	17.5	15.4	18.7
7.36	5.14	10.4	5.82	16.2	22.6	3.54	13.5	2.6	8.62
1.03	18.4	10.3	6.08	17.7	27.2	11.7	8.51	6.56	6.58
2.73	22.8	5.84	6.24	2.35	15.5	13.6	11.4	9.16	28
11	14	21.5	2.84	1.97	2.55	15.2	8.32	21.5	12.3
28	19.6	28.5	17.8	6.4	12.1	0.99	8.4	35.9	14.9
27.1	23.7	7.92	14.1	19.5	14.3	9.78	3.76	26.3	38.5
8.01	13.4	3.64	9.33	5.52	6.45	1.51	9.95	7.55	13.1
28.8	9.58	23.9	9.57	1.41	2.42	2.03	3.49	14.6	9.12

3.3. Pengujian Data Hujan Bangkitan

3.3.1. Uji T

Uji ini dilakukan untuk membandingkan data asli dengan data hasil bangkitan. Dua data tersebut dibandingkan apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara data bangkitan dengan data asli.

Nilai T Tabel = 1.812

Nilai T Hitung = 0.236

Karena nilai T Hitung < T Tabel maka hasil pembangkitan data diterima.

3.3.2. Uji F

Uji ini dilakukan untuk mengetahui perbedaan variansi antara data hasil bangkitan dengan data asli.

Nilai F Tabel = 3.180

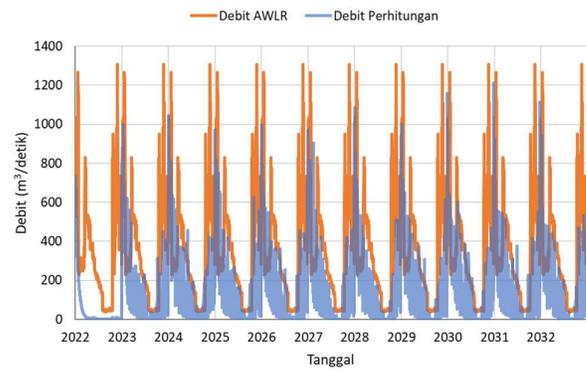
Nilai F Hitung = 0.148

Karena nilai F Hitung < F Tabel maka hasil pembangkitan data diterima.

3.4. Debit FJ Mock

FJ Mock digunakan untuk menghitung debit yang ada pada Kali Porong selama rentang waktu 2023 – 2032. Dilakukan perhitungan debit tahun 2022 terlebih dahulu untuk membandingkan debit perhitungan dengan Debit AWLR Porong. Berikut merupakan hasil perhitungan debit bulan Januari 2022 yang tersaji pada **Gambar 2**.

Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan debit maksimum sebesar 1212.16 m³/detik yang terjadi pada 1 Januari 2031, sedangkan pada AWLR terjadi debit maksimum sebesar 1307.49 m³/detik pada 25 November 2023.



Gambar 2. Grafik Perbandingan Debit Perhitungan dan AWL Tahun 2022 – Tahun 2032

3.5. Pengujian Data Debit FJ Mock

Untuk menguji hasil debit FJ Mock maka dibutuhkan uji data untuk mengetahui keabsahan data. Digunakan beberapa uji untuk mengetahui hasil keakuratan data. Beberapa uji tersebut antara lain:

3.5.1. Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

Apabila nilai NSE yang dihasilkan mendekati 1 maka hasil tersebut semakin baik.

$$NSE = 1 - \frac{(126930 - 53232.37)^2}{(126424.3 - 346.367)^2}$$

NSE = 0.661

Dari hasil perhitungan NSE didapatkan nilai 0.661 yang menandakan hasil nilai debit yang didapatkan dari perhitungan termasuk kategori “Qualified”.

3.5.2. Kesalahan Relatif (KR)

Analisis yang digunakan untuk mengevaluasi besaran persentase kesalahan relatif antara nilai hasil pemodelan dengan hasil pengamatan.

$$K_r = \left(\frac{126930 - 53232.37}{126930} \right) \times 100\%$$

K_r = 58.06%

Dari hasil perhitungan KR didapatkan nilai 58.06% yang menandakan hasil nilai debit yang didapatkan dari perhitungan termasuk kategori “Diterima”.

3.5.3. Koefisien Korelasi (R)

Koefisien korelasi memberikan gambaran tentang tingkat korelasi antara kedua jenis debit tersebut.

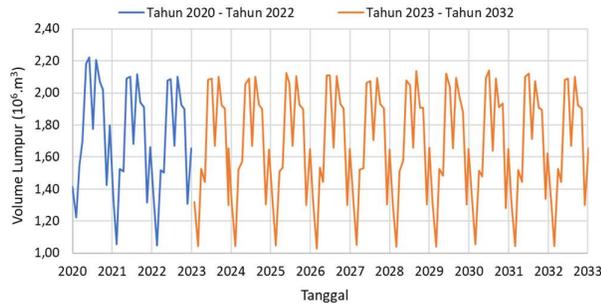
$$r = \sqrt{\frac{(126930 - 347.754)^2 - (126930 - 53232.37)^2}{(126930 - 347.754)^2}}$$

r = 0.813

Dari hasil perhitungan R didapatkan nilai 0.813 yang menandakan hasil nilai debit yang didapatkan dari perhitungan termasuk kategori “Korelasi Sangat Kuat”.

3.6. Volume Lumpur

Untuk menguji olume lumpur yang digunakan untuk perhitungan ini adalah volume lumpur tahun 2020 hingga 2022 yang didapatkan dari PPLS. Dari data yang didapatkan, dilakukan pembangkitan data volume lumpur untuk tahun-tahun berikutnya. Metode yang digunakan untuk membangkitkan data volume lumpur adalah Metode Thomas Fiering. Berikut merupakan hasil volume lumpur tahun 2023-2032 yang tersaji pada **Gambar 3**.



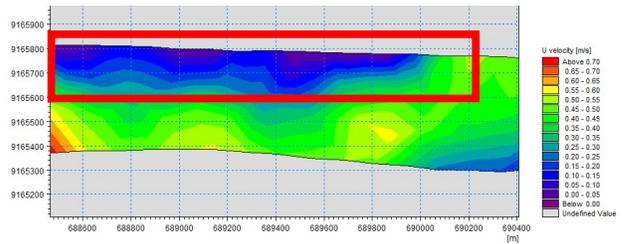
Gambar 3. Grafik Bangkitan Volume Lumpur Tahun 2023-2032

Berdasarkan hasil bangkitan **Gambar 3** didapatkan jumlah volume lumpur yang paling banyak dalam satu tahun sebesar $2.014 \times 10^7 \text{ m}^3$ terjadi pada tahun 2024. Namun, dari data bangkitan 10 tahun tersebut volume lumpur terbesar terdapat pada bulan Agustus 2028 sebesar $2.13 \times 10^6 \text{ m}^3$.

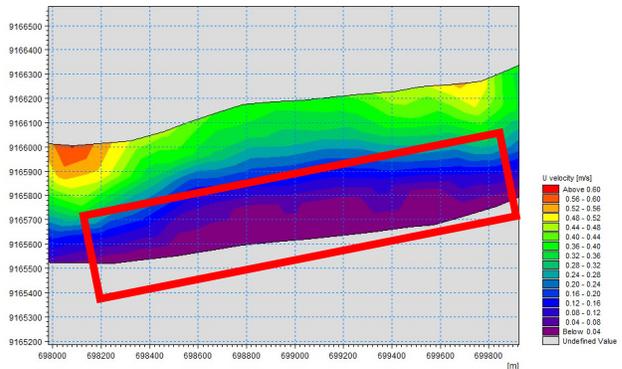
3.7. Pemodelan Sungai Eksisting 2022

Skenario model sungai menggunakan software MIKE 21 menggunakan kondisi pada bulan Januari 2022 dengan waktu simulasi mulai tanggal 7 Januari hingga 21 Januari 2022. Pada bulan Januari terjadi debit yang tinggi dan berada pada musim hujan. Pengamatan terkait potensi gerusan dan pengendapan berdasarkan parameter kecepatan aliran. Kecepatan aliran tersebut dibandingkan dengan nilai kecepatan minimal yang dapat mengangkat butiran sedimen. Lokasi yang memiliki kecepatan aliran nya lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan angkut sedimen maka berpotensi terjadi gerakan butiran sedimen, dan jika terjadi kecepatan yang lebih rendah maka berpotensi terjadi pengendapan.

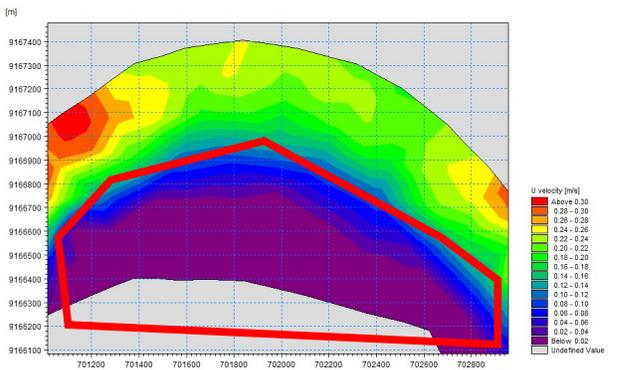
Pengamatan digunakan ukuran butiran sedimen D50 sebagai acuan yaitu 0.3 mm. Nilai kecepatan angkat (Ucr) yang didapatkan adalah 0.015 m/s [13]. Maka jika didapati lokasi yang memiliki kecepatan dibawah 0.015 m/s maka dapat dikatakan butiran pada lokasi tersebut tidak bergerak atau mengalami pengendapan. Berikut merupakan lokasi dengan Ucr dibawah 0.015 m/s yang tersaji pada **Gambar 4** untuk lokasi 1. Lokasi 1 terlihat terjadi kecepatan aliran yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai kecepatan angkat (Ucr) pada sisi atas. Pada **Gambar 5** terlihat nilai kecepatan aliran lebih rendah kecepatan angkat terjadi pada sisi bawah. **Gambar 6** menunjukkan kecepatan rendah dibandingkan kecepatan angkat pada lokasi 3 terjadi pada sisi dalam belokan (meandering). Potensi pengendapan pada lokasi 4 merata pada bagian trnsisi belokan (meandering) dengan detail lokasi tersaji pada **Gambar 7**.



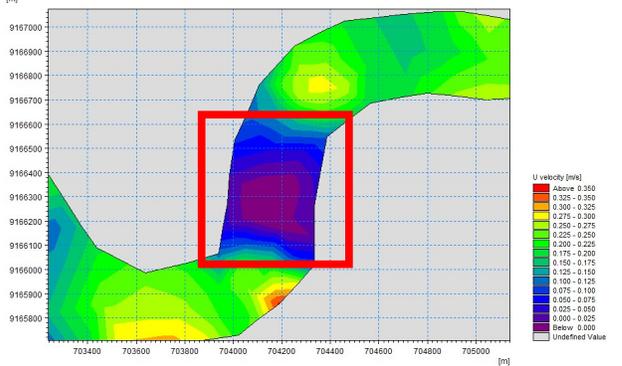
Gambar 4. Lokasi 1 Dengan Kecepatan Dibawah Ucr



Gambar 5. Lokasi 2 Dengan Kecepatan Dibawah Ucr



Gambar 6. Lokasi 3 Dengan Kecepatan Dibawah Ucr

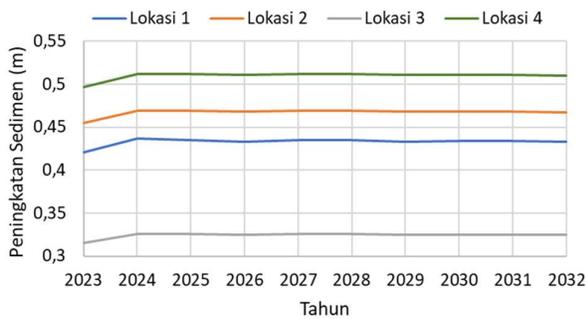


Gambar 7. Lokasi 4 Dengan Kecepatan Dibawah Ucr

Pada **Gambar 4** dan **Gambar 5**, teramati bahwa kecepatan yang

rendah terjadi di sepanjang sisi dalam dari belokan sungai, sebagaimana terlihat pada detail lokasi tesaji di **Gambar 9**. Kecepatan aliran cenderung lebih tinggi di sepanjang sisi luar belokan jika dibandingkan dengan sisi dalam belokan sungai [14]. Fenomena ini dapat diamati pada lokasi 5 (**Gambar 6**) dan lokasi 6 (**Gambar 7**).

Dalam penghitungan peningkatan sedimen yang terjadi pada lokasi-lokasi tersebut menggunakan pendekatan spasial, luasan dari setiap lokasi dihitung dengan membagi volume lumpur dengan luasan daerah di bawah Ucr. Berikut adalah hasil peningkatan sedimen setiap tahunnya, yang disajikan pada **Gambar 8**.

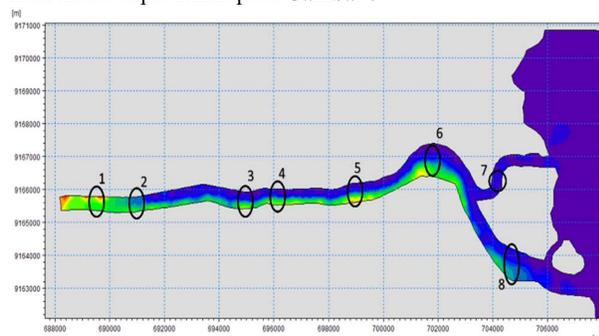


Gambar 8. Peningkatan Sedimen Tiap Tahun

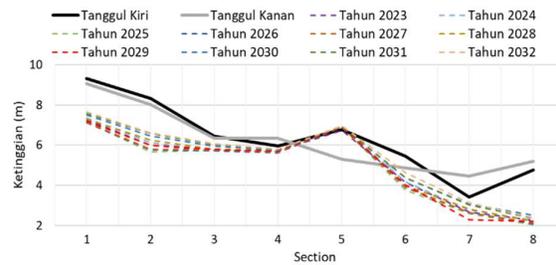
Lokasi 4 (**Gambar 7**) menunjukkan peningkatan sedimen rata-rata pertahun terbesar di antara ketiga lokasi lainnya, yakni sebesar 0.509 m. Pada tahun 2024, peningkatan sedimen rata-rata dari keempat lokasi mencapai angka tertinggi, yaitu sebesar 0.436 m. Fenomena ini sejalan dengan hasil bangkitan volume lumpur terbanyak, yang juga terjadi pada tahun 2024.

3.8. Pemodelan Sungai Tahun 2023 – Tahun 2032

Skenario pemodelan sungai untuk tahun 2023 dimulai pada tanggal 7 Januari hingga 21 Januari 2023, sementara untuk tahun 2024 hingga 2032 dilakukan mulai tanggal 1 Januari hingga 15 Januari setiap tahunnya. Keputusan ini diambil karena debit pada tanggal-tanggal tersebut cenderung tinggi dan berada dalam musim hujan. Setiap hasil model pada simulasi setiap tahunnya diplotkan untuk kenaikan dasar Sungai. Lokasi plot kenaikan dasar Sungai dan hasil model dapat dilihat pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Posisi Line Pengamatan Model



Gambar 10. Grafik Tinggi Tanggul & Muka Air Tahun 2023 - Tahun 2032

Berdasarkan grafik pada **Gambar 10**, dapat dilihat bahwa *Section 1* merupakan lokasi dengan muka air rata-rata tahunan tertinggi, mencapai 7.32 m. Pada *Section 5*, terlihat bahwa tinggi muka air melebihi tinggi tanggul. Overtopping pada tinggi muka air terjadi mulai tahun 2024 hingga tahun 2032.

Berdasarkan hasil pemodelan sungai, terdapat penampang yang mengalami overtopping, yaitu pada line 5 sisi kanan dan sisi kiri. Pada sisi kanan, overtopping terjadi dengan kisaran tinggi antara 1.45 hingga 1.67 m. Sementara itu, pada sisi kiri, overtopping terjadi dengan kisaran tinggi antara 0.126 hingga 0.180 m. Dengan mempertimbangkan kondisi tersebut, tindakan yang disarankan adalah melakukan penambahan tinggi tanggul sebesar 2 m pada sisi kanan dan 0.5 m pada sisi kiri guna menjaga kapasitas penampang di lokasi tersebut.

4. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, ditemukan bahwa debit air tertinggi terjadi pada bulan Januari setiap tahunnya, yang sesuai dengan musim hujan. Hasil pemodelan sungai menunjukkan bahwa terdapat overtopping pada penampang line 5, baik di sisi kanan maupun sisi kiri. Tinggi overtopping pada sisi kanan berkisar antara 1.45 hingga 1.67 m, sedangkan pada sisi kiri berkisar antara 0.126 hingga 0.180 m. Dengan mempertimbangkan kondisi ini, tindakan yang disarankan adalah menambah tinggi tanggul sebanyak 2 m pada sisi kanan dan 0.5 m pada sisi kiri untuk mengatasi masalah overtopping tersebut.

Daftar Pustaka

- [1] Wijaya, R. N. R. (2020). Dampak Lumpur Lapindo Di Wilayah Sekitar Pada Sektor Pertanian. *Jurnal Geografi*. e-ISSN : 2443-3977.
- [2] Fachrurrozi, M. (2017). Studi Optimasi Pemanfaatan Waduk Bagong di Kabupaten Trenggalek untuk Jaringan Irigasi, Kebutuhan Air Baku, dan Potensi PLTA (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- [3] Risdina, F. N., Atmodjo, P. S., & Sachro, S. S. (2020). Telaga Kenyamukan generating discharge analysis with Thomas-Fiering method for North Sangatta raw water needs. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 477(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/477/1/012029>
- [4] Arianto, D., Limantara, L. M., Wahyuni, S., & Email, K. (2023). Studi Perubahan Karakteristik Hidrologi (Debit Puncak dan Waktu Puncak) Akibat Perubahan Tata Guna

- Lahan di DAS Citanduy Study of Changes in Hydrological Characteristics (Peak Discharge and Peak Time) Due to Changes in Land Use in the Citanduy Watershed. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 04(01), 64–77. <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2024.004.01.006>
- [5] Setiadi, P. A., & dkk. (2022). FJ.Mock Method for Hydrological model in Water Reliability Study at Jatiluhur Estate Purwakarta. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- [6] Ariani, R., Rachman, A., Dariah, A., Yustika, R. D., & Marwanto, S. (2019). Validation of land management information system model (SILAHAN) on plot scale, case study in Citaman, Nagreg, West Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 393(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/393/1/012078>
- [7] Waasiu Widyarningsih, K., Harisuseno, D., Soetopo, W., & Mayjen Haryono, J. (2021). Perbandingan Metode FJ. Mock dan NRECA untuk Transformasi Hujan Menjadi Debit pada DAS Metro Kabupaten Malang, Jawa Timur. In *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air* (Vol. 1, Issue 1). <https://jtresda.ub.ac.id/>
- [8] Rahayu, S., & dkk. (2009). Monitoring Air d Daerah Aliran Sungai. Bogor: World Agroforestry Centre - Southeast Asia Regional Office. 104 p.
- [9] Hermawan, C. (2012). Debit Minimum Kali Porong Untuk Menjamin Angkutan Sedimen Sampai ke Muara Kali Porong (Minimum Flow Requirement for Transporting Sediments To The Estuary of Porong River).
- [10] Kadam, P., & D, Sen. (2011). Flood inundation simulation in Ajoy River using MIKE-FLOOD . *ISH Journal of Hydraulic Engineering* .
- [11] Sravanthi, N., Ramakrishnan, R., Rajawat, A. S., & Narayana, A. C. (2015). Application of Numerical Model in Suspended Sediment Transport Studies along the Central Kerala, West-coast of India. *Aquatic Procedia*, 4, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.016>
- [12] Warren, I. R., & Bach, H. (1992). MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas. *Environmental Software*, 7(4), 229-240.
- [13] Hydraulics of Sediment Transport, Yousef Hassanzadeh Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, 31 Oktober 2015
- [14] Pan, Y., Liu, X., & Yang, K. (2022). Effects of discharge on the velocity distribution and riverbed evolution in a meandering channel. *Journal of Hydrology*, 607. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127539>