

Dinamika Perubahan Dasar dan Tebing Sungai Jambu: Studi Kasus pada Sekitar Jembatan Cikuya

Dynamic Analysis Of Changes In Jambu Riverbed And Banks: Case Study Around Cikuya Bridge

Humam Aulia^{1)*} Dr. Eng. Eka Oktariyanto Nugroho, S.T, M.T.²⁾
Sri Legowo Wignyo Darsono³⁾ Agus Suprpto Kusmulyono⁴⁾

¹⁾ Mahasiswa Magister Pengelolaan Sumber Daya Air, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Bandung, Jawa Barat

^{2,3)} Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10 Bandung, Jawa Barat, Indonesia

⁴⁾ Balai Pengembangan Kompetensi PUPR Wilayah V Yogyakarta
Jl. Ngeksigondo No. 1-2, Yogyakarta, DI. Yogyakarta

*Corresponding email: humam.aulia@pu.go.id

Accepted: 26 February 2023; Revised: 19 June 2024; Approved: 28 June 2024

ABSTRACT

Several cross-sections of the Jambu River, particularly around the Cikuya Bridge, have experienced bank collapse phenomena. This paper interprets the issues related to bank collapse and its impact on the flow capacity of the Jambu River, especially around the Cikuya Bridge. Morphological changes were simulated using a sediment transport model implemented in the Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) 6.3.1, integrated with the ARS-USDA Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM). The simulation results indicate that over a period of 10 years, the thalweg elevation (the lowest point of a riverbed) of the Jambu River around the Cikuya Bridge is predicted to experience deposition in 17 cross-sections and erosion in 15 cross-sections. The highest deposition occurs at the cross-section below the Cikuya Bridge, with a thalweg elevation change of 0.59 m. This warrants attention as the storage capacity of the cross-section decreases by 7% from the initial condition. Predictions indicate that bank collapse will occur in 7 cross-sections over the next 10 years. This is attributed to the steep slopes of silt and clay banks, exceeding 45 degrees, and the reduced safety factor of bank stability due to groundwater pressure influenced by river discharge fluctuations and tidal effects reaching the Jambu River. Bank collapse impacts the elevation change of the riverbed and adds load to the sediment transport model from the collapsing cross-sections to the downstream sections.

Keywords: Jambu River, Cikuya Bridge, Cilacap, sediment transport, bank stability and toe erosion model

ABSTRAK

Beberapa lokasi penampang Sungai Jambu, terutama di sekitar Jembatan Cikuya, mengalami fenomena keruntuhan tebing. Makalah ini menginterpretasikan informasi permasalahan keruntuhan tebing serta dampaknya terhadap kapasitas tampungan aliran Sungai Jambu, terutama di sekitar Jembatan Cikuya. Perubahan morfologi disimulasikan dengan model angkutan sedimen menggunakan Software Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) 6.3.1 yang telah terintegrasi dengan ARS-USDA Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM). Hasil simulasi menunjukkan elevasi thalweg (titik terendah dasar sungai pada suatu penampang) Sungai Jambu di sekitar Jembatan Cikuya, selama 10 tahun, diprediksi akan mengalami pengendapan pada 17 penampang dan akan mengalami erosi pada 15 penampang. Pengendapan tertinggi terjadi pada penampang di bawah Jembatan Cikuya dengan perubahan elevasi thalweg sebesar 0,59 m. Hal tersebut perlu mendapat perhatian karena kapasitas tampungan penampang berkurang 7% dari kondisi awal. Prediksi menunjukkan keruntuhan tebing akan terjadi pada 7 penampang melintang dalam 10 tahun ke depan. Hal ini disebabkan oleh kemiringan tebing tanah lanau dan lempung yang cukup curam, yaitu lebih dari 45°, serta berkurangnya faktor keamanan stabilitas tebing sungai akibat tekanan air tanah yang dipengaruhi oleh fluktuasi debit sungai dan pasang-surut yang masih mencapai Sungai Jambu. Keruntuhan tebing sungai berdampak pada perubahan elevasi dasar dan menambah beban pada model angkutan sedimen dari bagian penampang yang mengalami keruntuhan hingga bagian hilir.

Kata Kunci: Sungai Jambu, Jembatan Cikuya, Cilacap, angkutan sedimen, model stabilitas tebing dan gerusan dasar

PENDAHULUAN

Sungai Jambu merupakan sungai orde-3 yang terletak di Daerah Aliran Sungai (DAS) Donan, Kabupaten Cilacap, Provinsi Jawa Tengah. Beberapa lokasi penampang Sungai Jambu, terutama di sekitar Jembatan Cikuya, mengalami fenomena keruntuhan tebing (Gambar 1). Pada beberapa kasus, keruntuhan tebing dapat mempengaruhi perubahan morfologi sungai baik secara vertikal maupun secara lateral dan berpotensi mengakibatkan berkurangnya kapasitas aliran sungai yang dapat meningkatkan risiko banjir. Namun, sebagian besar model angkutan sedimen satu dimensi yang diterapkan dalam perencanaan penanganan permasalahan perubahan morfologi sungai di Indonesia hanya memperhitungkan

perubahan secara vertikal. Model tersebut cenderung terfokus hanya pada erosi dan pengendapan dasar sungai, sementara perubahan morfologi sungai secara lateral akibat keruntuhan dan gerusan tebing tidak dipertimbangkan.

Penelitian ini bermaksud melakukan pemodelan perubahan morfologi Sungai Jambu, terutama di sekitar Jembatan Cikuya, secara vertikal dan lateral selama 10 tahun. Tujuannya adalah menginterpretasikan informasi permasalahan keruntuhan tebing Sungai Jambu di sekitar Jembatan Cikuya serta dampaknya terhadap kapasitas tampungan aliran sungai.



Gambar 1 Lokasi Penelitian, Sungai Jambu di Sekitar Jembatan Cikuya

METODOLOGI

Perubahan tebing secara lateral dan angkutan sedimen merupakan bagian penting dalam proyek restorasi sungai (Jacobson & Berkley, 2013). Pada penelitian ini, perubahan morfologi tersebut disimulasikan dengan model angkutan sedimen menggunakan *Software Hydrologic Engineering Center's River Analysis System* (HEC-RAS) 6.3.1 yang telah terintegrasi dengan *ARS-USDA Bank Stability and Toe Erosion Model* (BSTEM). Beberapa penelitian terkait erosi dan keruntuhan tebing sungai telah banyak menggunakan BSTEM, mulai dari pemodelan stabilitas tebing yang spesifik hingga mengevaluasi beberapa faktor yang mempengaruhi erosi dan keruntuhan seperti vegetasi, tekanan air pori, *seepage*, dan praktik stabilisasi tebing sungai (Klavon et al., 2017).

BSTEM skala lokal tidak mampu mensimulasikan pengaruh angkutan sedimen dalam arah aliran sungai (Simon et al., 2013). Mengintegrasikan BSTEM ke dalam model angkutan sedimen HEC-RAS memungkinkan pemodelan untuk menyimulasikan umpan balik antara erosi dasar, gerusan kaki, keruntuhan tebing, dan angkutan longitudinal (Gibson et al., 2017). BSTEM menyimulasikan dua proses utama, yaitu:

- 1) Keruntuhan tebing;
- 2) Gerusan kaki.

Kedua proses tersebut kemudian berinteraksi dengan model angkutan sedimen pada HEC-RAS untuk menyimulasikan fenomena erosi atau pengendapan secara vertikal. Hasil prediksi menggunakan HEC-RAS yang telah diintegrasikan dengan BSTEM menunjukkan volume perubahan geomorfologi yang jauh lebih besar dibandingkan hasil prediksi hanya menggunakan BSTEM. Model berbasis proses yang secara simultan memperhitungkan angkutan sedimen dan kemunduran tebing (keruntuhan tebing dan gerusan kaki) harus digunakan untuk menganalisis sungai dengan penampang yang sangat erosional (Kassa et al., 2023).

Keruntuhan Tebing

Mekanisme keruntuhan tebing sungai bergantung pada karakteristik tanah dan geometri tebing sungai (Thorne & Osman, 1988). BSTEM mengevaluasi stabilitas tebing dengan menghitung bidang-bidang keruntuhan tebing (Gambar 2) untuk menentukan apakah gaya penggerak (F_D) melebihi gaya penahan (F_R), dan menentukan bidang keruntuhan kritis dengan faktor keamanan terendah (Gibson et al., 2015). Perhitungan dilakukan terhadap gaya penggerak berupa

gravitasi, gaya penahan berupa gesekan tanah, serta interaksi tekanan air pori (USACE, 2015).

Jika faktor keamanan kritis (FS) kurang dari satu (<1) maka tebing akan runtuh, mengubah penampang melintang, dan menjadi suplai sedimen pada aliran sungai. Stabilitas tebing sungai sedikit terpengaruh oleh durasi waktu aliran puncak (Mohammed-Ali et al., 2020). Nilai faktor keamanan berubah seiring dengan fluktuasi aliran, namun hubungannya dengan aliran sungai tidak linear. Faktor keamanan meningkat ketika aliran sungai meningkat dan akan menurun jika sebaliknya. Penurunan aliran sungai menyebabkan elevasi muka air sungai lebih rendah dari elevasi muka air tanah tebing sungai. Hal tersebut mempengaruhi keseimbangan antara gaya yang menahan dari tekanan hidrostatik air di sungai dan gaya yang mendorong dari tekanan air tanah tebing sungai yang menyebabkan tebing menjadi kurang stabil. Perubahan faktor keamanan masih dapat terjadi meskipun puncak aliran hidrograf dipertahankan karena aliran menyebabkan erosi dan pengendapan pada saluran utama (Mohammed-Ali et al., 2021).



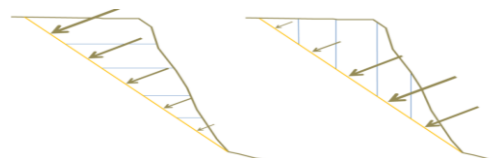
Gambar 2 Keruntuhan Tebing (Sumber: Gibson et al., 2015)

$$FS = F_D / F_R \quad \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

- FS : faktor keamanan
 F_D : gaya pendorong
 F_R : gaya penahan

BSTEM menghitung faktor keamanan dari bidang keruntuhan tebing berdasarkan dua pendekatan perhitungan, metode irisan (Langendoen & Simon, 2008) atau metode lapisan horizontal (Simon et al., 2000). Perbedaan tegangan normal pada kedua metode tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Tegangan normal pada Metode Lapisan (kiri) dan Metode Irisan (kanan) (Sumber: USACE, 2020)

Metode irisan menghitung faktor keamanan tebing berdasarkan keseimbangan gaya penggerak (warna kuning) dan gaya penahan (warna hijau)

dengan persamaan di bawah ini. Pada persamaan tersebut, fon berwarna merah dikategorikan sebagai gaya tanah (berat tanah, kohesi) dan fon berwarna hitam merupakan gaya hidrolik (gaya konfining hidrostatik, tekanan air pori).

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^I (c_i L_i + S_i \tan \phi_i^b + [W_i \cos \beta - U_i + P_i \cos (\alpha - \beta)] \tan \phi_i')}{\sum_{i=1}^I (W_i \sin \beta - P_i \sin [\alpha - \beta])} \quad (2)$$

Dimana:

- FS : faktor keamanan
 i : lapisan
 L : panjang bidang keruntuhan
 S : matriks gaya hisap
 U : gaya angkat hidrostatik
 P : gaya hidrostatik penahan
 ϕ' : sudut gesek
 ϕ^b : hubungan antara matriks gaya hisap dan kohesi
 c' : kohesi efektif
 b : sudut bidang keruntuhan

Pada metode lapisan horizontal, faktor keamanan dihitung dengan menjumlahkan gaya-gaya yang bekerja sepanjang bidang kegagalan untuk seluruh irisan dengan persamaan di bawah ini. Persamaan untuk menghitung faktor keamanan sepanjang bidang keruntuhan adalah kombinasi dari gaya penggerak (kuning) dan gaya tahanan (hijau), gaya tanah (fon merah), dan gaya hidrolik (fon hitam).

$$FS = \frac{\sec \beta \sum_{j=1}^J (L_j c_j' + N_j \tan \phi_j' - U_j \tan \phi_j^b)}{\tan \beta \sum_{j=1}^J W_j - F_w} \quad (3)$$

Dimana:

- FS : faktor keamanan
 i : lapisan
 L : panjang bidang keruntuhan
 S : matriks gaya hisap
 U : lapisan
 P : gaya hidrostatik penahan
 ϕ' : sudut gesek
 ϕ^b : hubungan antara matriks gaya hisap dan kohesi
 W : berat tanah
 Fw : gaya hidrostatik penahan

Keruntuhan kantilever, yaitu longsor massa bagian tanah yang menjorok, merupakan kasus khusus dari Metode Irisan. HEC-RAS hanya dapat menerapkan Metode Irisan pada konfigurasi tebing yang menjorok, dan oleh karena itu hanya dapat menyimulasikan mekanisme kantilever ke-1 (geser). HEC-RAS memeriksa apakah sudut maksimum bidang keruntuhan yang sepenuhnya tercakup dalam tanah tebing pada setiap titik evaluasi lebih besar atau sama dengan sembilan puluh derajat. Hal ini menunjukkan adanya tebing yang menjorok dan Metode Irisan digunakan untuk evaluasi pada titik tersebut bahkan jika Metode Lapisan digunakan.

Gerusan Kaki

Perubahan lateral penampang sungai (Δx) akibat gerusan kaki tebing sungai (Gambar 4) merupakan fungsi dari tegangan geser (τ), tegangan geser kritis (τ_c), serta erodibilitas (M) pada kaki tebing sungai. Model erosi lateral mengestimasi distribusi pergerakan lateral antara permukaan air dan kaki tebing, serta memodelkan gerusan hidrolik lateral yang terjadi di area tersebut (Gibson et al., 2015). Saat terjadi gerusan kaki, tebing sungai menjadi kurang stabil sehingga gerusan dapat memicu keruntuhan tebing (USACE, 2015).

Model gerusan kaki BSTEM (Simon et al., 2011) memindahkan titik penampang melintang secara normal ke permukaan tebing sungai. HEC-RAS memindahkan titik secara lateral agar tidak tergerus di bawah elevasi dasar. Metode gerusan kaki menggunakan persamaan kohesif jika kandungan partikel lanau dan lempung pada lapisan tanah lebih dari sama dengan ambang batas yang ditetapkan, begitu sebaliknya untuk metode non-kohesif. Gerusan kohesif menggunakan persamaan gesekan yang menekankan parameter tanah yaitu tegangan geser kritis dan erodibilitas. Sulit untuk mengetahui erodibilitas non-kohesif, sehingga metode non-kohesif menerapkan persamaan angkutan sedimen. Menerapkan persamaan angkutan sedimen dasar pada tebing sungai yang memiliki ukuran butiran tanah yang berbeda-beda, terutama dengan kandungan lanau atau lempung yang substansial, namun tidak cukup untuk memicu persamaan kohesif, dapat menimbulkan masalah saat mengurutkan partikel tanah pada suatu lapisan tebing atau endapan dan sering memprediksi gerusan yang berlebihan (Gibson et al., 2015).

Model satu dimensi HEC-RAS menghitung rata-rata gesekan dasar penampang melintang sepanjang waktu pemodelan. Tegangan geser maksimum berada pada dasar tebing sungai, semakin ke atas tebing menuju permukaan air tegangan geser semakin menurun. Jika menerapkan

rata-rata gesekan dasar pada seluruh titik tebing akan menghasilkan prediksi erosi yang berlebihan. BSTEM mempertimbangkan hal tersebut, menghitung gesekan pada setiap titik tebing yang tergenang dengan distribusi gesekan radial, berdasarkan rasio jari-jari hidrolik dari zona aliran terhadap jari-jari hidrolik tebing (Simon et al., 2011).



Gambar 4 Gerusan Kaki (Sumber: Gibson et al., 2015)

$$\Delta x \sim M(\tau - \tau_c) \quad (4)$$

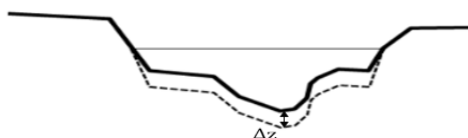
Dimana:

- Δx : perubahan lateral tebing
- M : erodibilitas
- τ : tegangan geser
- τ_c : tegangan geser kritis

Perubahan Vertikal

Perubahan vertikal (Δz) pada dasar sungai (Gambar 5) merupakan akibat dari erosi atau pengendapan. Pada HEC-RAS, jika kapasitas sedimen (G_s) lebih besar dari pada suplai sedimen (Q_s) maka akan terjadi erosi namun jika suplai sedimen (Q_s) melebihi kapasitas sedimen (G_s) maka akan terjadi pengendapan (USACE, 2020).

Perubahan vertikal dapat menstabilkan kaki tebing atau membuat tebing lebih curam, mempercepat atau mencegah keruntuhan tebing. Gerusan dan keruntuhan tebing menambah sedimentasi pada aliran, mempengaruhi kontinuitas sedimentasi dengan pengendapan atau erosi pada bagian hilir serta menurunkan tegangan geser. Untuk mensimulasikan proses ini secara simultan, dan untuk mengetahui interaksi dan umpan balik antar proses, algoritma USDA-ARS BSTEM diintegrasikan ke dalam algoritma angkutan sedimen HEC-RAS (Gibson et al., 2015).



Gambar 5 Perubahan Vertikal Dasar Sungai (Sumber: Gibson et al., 2015)

$$\Delta z \sim Q_s - G_s \quad (5)$$

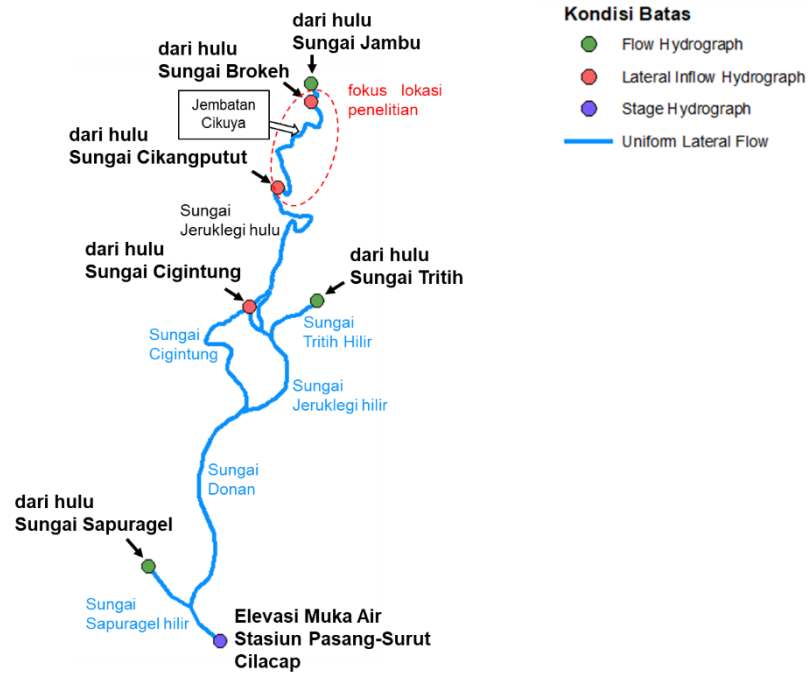
Dimana:

- Δz : perubahan vertikal dasar sungai
- Q_s : suplai sedimen
- G_s : kapasitas sedimen

Model 1D memiliki keterbatasan dalam hal aliran tidak memperhitungkan erosi di luar penampang sungai. Metode *veneer* memberikan hasil perubahan penampang basah batas dasar sungai yang dapat digerakkan dengan jarak vertikal yang sama (Ducioame, 2018), namun pada HEC-RAS versi terbaru ada dua metode pengendapan lain yang dapat digunakan oleh pengguna untuk aplikasi yang sesuai, yaitu Metode Reservoir (Pengendapan Bergantung Kedalaman) (saluran atau lembah banjir) dan Metode Penurunan Jarak (hanya di dataran banjir). HEC-RAS menyertakan alternatif metode erosi saluran yaitu Metode *Channel Evolution Model* (CEM) yang disederhanakan. Model tersebut dirancang untuk aplikasi waduk, khususnya untuk kasus pembongkaran bendungan dan pembuangan air pada waduk (USACE, 2020).

Penerapan di Sungai Jambu

Penelitian ini memprediksi perubahan morfologi Sungai Jambu secara vertikal dan lateral di sekitar Jembatan Cikuya selama 10 tahun (2021 hingga 2030), dengan menggunakan data pengukuran topografi sungai yang diperoleh pada tanggal 5 Februari 2021 sebagai kondisi awal. Untuk mengevaluasi keakuratan prediksi, hasil prediksi perubahan dasar sungai secara vertikal pada tahun ke-2 (2022) dibandingkan dengan data penampang melintang yang diukur pada tanggal 7 April 2022. Namun, karena lokasi pengukuran penampang melintang sungai pada tanggal 5 Februari 2021 dan 7 April 2022 tidak sama persis, hanya data penampang melintang yang memiliki perbedaan jarak lokasi kurang dari 5 m, dengan titik acuan jarak pada *benchmark* di Jembatan Cikuya, yang digunakan untuk perbandingan. Prediksi perubahan penampang sungai secara lateral hanya divalidasi dengan foto kondisi penampang sungai yang diambil pada tahun 2022. Skema pemodelan (Gambar 6) melibatkan aliran sungai orde-1 hingga orde-3 dari hulu Jembatan Cikuya hingga Stasiun Pasang-Surut Cilacap (CCAP).

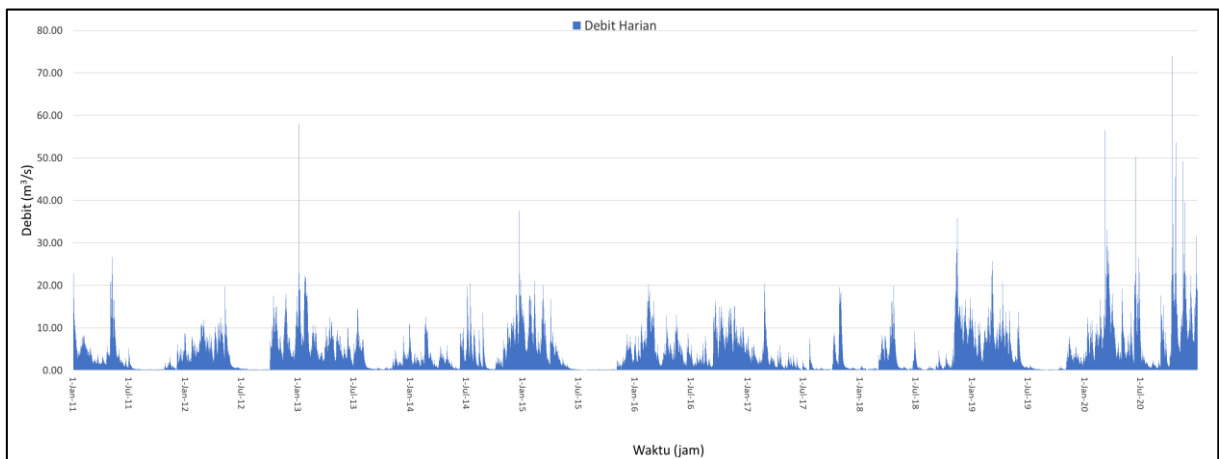


Gambar 6 Skema Pemodelan

Pada lokasi penelitian tidak terdapat stasiun pengukuran debit sungai, sehingga kondisi batas hulu menggunakan debit harian sintetis yang dibangkitkan dari data hujan dan data klimatologi menggunakan Model Sacramento. Data hujan dan data klimatologi yang tersedia pada lokasi penelitian juga terbatas dari tahun 2011 hingga 2020. Parameter Model Sacramento yang digunakan untuk transformasi hujan-debit pada lokasi penelitian menggunakan parameter dari hasil perhitungan dan validasi transformasi hujan-debit harian DAS terdekat dari lokasi penelitian yang memiliki stasiun pengukuran debit, yaitu DAS Citanduy dengan titik *outlet* Pos TMA (Tinggi Muka Air) Manganti. Lokasi titik outlet Pos TMA Manganti berjarak kurang lebih 40 km dari lokasi penelitian dengan koefisien korelasi antara hasil transformasi

hujan-debit harian dan debit observasi sebesar 71,21%. Karena keterbatasan data hidrologi di lokasi penelitian, hasil transformasi hujan-debit harian (Gambar 7), diasumsikan menyerupai debit rata-rata yang akan terjadi pada tahun 2021 hingga 2030 untuk memprediksi perubahan morfologi lokasi penelitian dalam 10 tahun ke depan (Tabel 1).

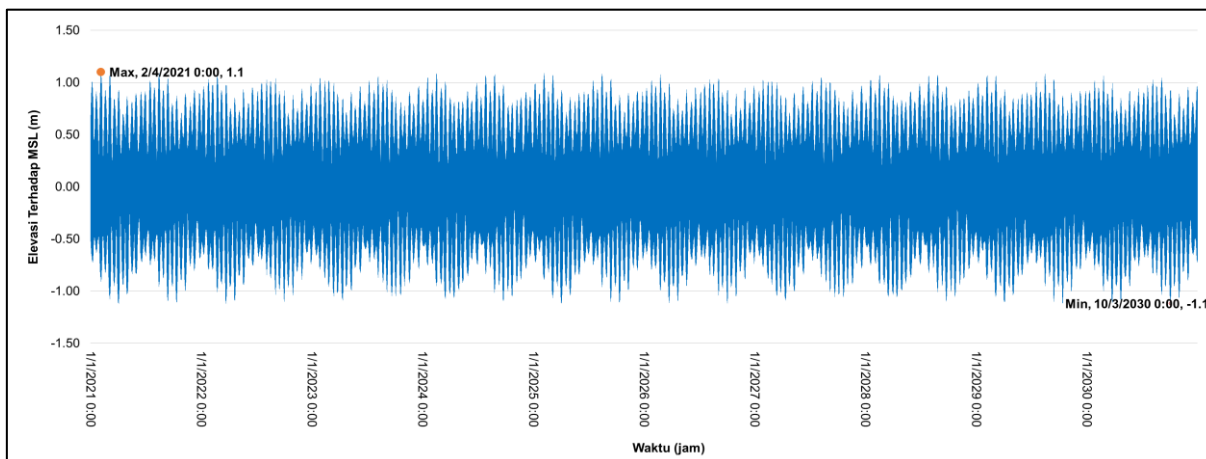
Elevasi muka air sungai di sekitar Jembatan Cikuya masih dipengaruhi oleh pasang-surut meskipun lokasinya berjarak sekitar 20 km dari muara pantai. Sehingga, kondisi batas hilir menggunakan data elevasi muka air pasang-surut dengan interval waktu 1 jam, diprediksi selama 18 tahun dari tahun 2021 hingga 2039 (Gambar 8) dari data pengamatan Stasiun Pasang-Surut Cilacap (CCAP).



Gambar 7 Hasil transformasi hujan-debit harian pada lokasi penelitian dari tahun 2011 hingga 2020

Tabel 1 Asumsi debit harian rata-rata yang akan terjadi dalam 10 tahun ke depan pada lokasi penelitian

Tahun	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Debit harian rata-rata tahunan (m^3/s)	2,93	4,58	4,79	4,34	3,32	6,07	2,34	3,79	4,05	9,57



Gambar 8 Prediksi kejadian pasang-surut 2021 hingga 2030 dari data pengukuran Stasiun Pasang-Surut Cilacap (CCAP)

Parameter tanah tebing sungai (Tabel 2) diasumsikan homogen berdasarkan hasil pengujian laboratorium dari 2 lokasi pengambilan sampel, namun laboratorium pengujian tidak dapat memberikan parameter tegangan geser kritis dan erodibilitas tanah pada tebing saat terjadi erosi. Beberapa parameter tanah yang tidak diperoleh

dari pengujian data primer, termasuk parameter tegangan geser kritis dan erodibilitas untuk jenis lanau sedang, diambil dari beberapa asumsi USACE, 2020. Asumsi-asumsi ini dipilih berdasarkan hasil pengujian data primer yang menunjukkan jenis tanah tebing Sungai Jambu adalah lanau dan kondisi keruntuhan yang sering terjadi di lapangan.

Tabel 2 Parameter tanah yang digunakan pada Model Angkutan Sedimen dan BSTEM

Parameter Tanah Dasar Sungai		
Gradasi	Kerikil 64,53 %, Pasir 34,97 %, dan Lanau/Lempung 0,50 %	Hasil pengujian data primer
Sedimen Layang	5,41 mg/L	Hasil pengujian data primer
Parameter Tanah Tebing Sungai		
Berat Unit Tanah Kondisi Jenuh (kg/m^3)	1.720 s.d 1.780	Hasil pengujian data primer
Sudut Gesek (ϕ)	5,17	Hasil pengujian data primer
Kohesi (kPa)	4,90	Hasil pengujian data primer
Phi b (ϕ)	15	Asumsi dari USACE, 2020
Gradasi	Kerikil 0 %, Pasir 9,22 %, Lanau 79,23 %, dan Lempung 11,55 %	Hasil pengujian data primer
Tegangan Geser Kritis (Pa)	5	Asumsi dari USACE, 2020
Erodibilitas ($\text{m}^3/\text{N}\cdot\text{s}$)	4,50E-08	Asumsi dari USACE, 2020
Parameter Kohesif		
Ambang Batas Geser (Pa)	0,35	Asumsi
Tingkat Erosi (M) ($\text{N}/\text{M}^2 \cdot \text{hr}$)	0,06	Asumsi
Ambang Batas Erosi Massa (Pa)	0,76	Asumsi
Tingkat Erosi Massa (Mmw) ($\text{N}/\text{M}^2 \cdot \text{hr}$)	0,86	Asumsi

Pengaturan model (Tabel 3) untuk perhitungan stabilitas lereng menggunakan Metode Irisan/*Slice*

Method karena memberikan hasil distribusi tegangan normal yang lebih realistis sepanjang

bidang kegagalan menurut USACE, 2015. Untuk perhitungan angkutan sedimen, Metode Laursen (Copeland) dipilih karena diameter rata-rata butiran dasar (0,049 mm) dan tebing (9,520 mm) Sungai Jambu berada dalam rentang kegunaan Metode Laursen (Copeland) yaitu 0,011 hingga 29 mm (USACE, 2020). Sedangkan untuk perhitungan gerusan kohesi, digunakan metode Wilcock dan

Crowe (2003) yang merupakan metode berbasis permukaan, ditujukan untuk campuran tanah heterogen dengan komponen pasir dan kerikil. Metode kecepatan jatuh menggunakan metode Rubey, dan untuk perhitungan pergerakan air tanah keluar dari atau masuk ke tebing sungai, digunakan Metode *Saturated Groundwater Lag*.

Tabel 3 Pengaturan Model Angkutan Sedimen dan BSTEM

Pengaturan Model	
Fungsi Angkutan Sedimen	Laursen (Copeland)
Metode penyortiran	Copeland (Ex7)
Metode Kecepatan Jatuh	Rubey
Metode Perubahan Pengendapan Dasar Sungai	Reservoir
Metode Perubahan Pengendapan Bantaran	Reservoir
Metode Perubahan Gerusan Dasar Sungai	Veneer
Ambang Batas Algoritma Gerusan Kaki Kohesif (%)	20
Fungsi Gerusan Kaki Non-Kohesif	Wilcock dan Crowe
Metode Keruntuhan Tebing	Metode Irisan
Metode Air Tanah	<i>Saturated Groundwater Lag</i>

HASIL DAN PEMBAHASAN

Prediksi perubahan morfologi Sungai Jambu di sekitar Jembatan Cikuya menggunakan data asumsi debit harian dan data prediksi pasang-surut selama

10 tahun (2021 hingga 2030) menunjukkan adanya beberapa lokasi penampang sungai yang mengalami erosi, pengendapan, dan keruntuhan tebing (Gambar 9).



Gambar 9 Prediksi lokasi penampang melintang yang akan mengalami pengendapan, erosi, dan keruntuhan tebing dalam 10 tahun

Perubahan Vertikal Dasar Sungai Jambu

Hasil simulasi (Tabel 4) menunjukkan adanya perubahan elevasi *thalweg* (titik terendah dasar

sungai pada suatu penampang) dari tahun sebelumnya, dengan dominasi terjadinya pengendapan pada akhir tahun pertama simulasi, tahun ke-7, dan tahun ke-9, dan dominasi terjadinya

erosi pada tahun ke-2 hingga ke-6, ke-8, dan ke-10. Namun hasil secara keseluruhan (Tabel 5 dan Gambar 10), jika elevasi *thalweg* pada awal simulasi (yang diukur pada tanggal 5 Februari 2021) dibandingkan dengan elevasi *thalweg* pada akhir simulasi, jumlah penampang melintang yang

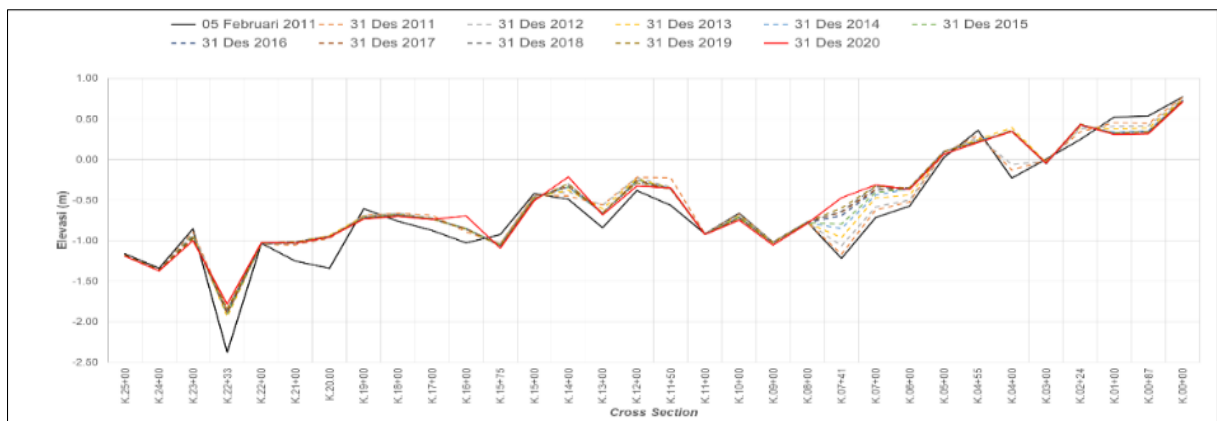
mengalami pengendapan sedikit lebih banyak daripada yang mengalami erosi. Sebanyak 17 penampang melintang diprediksi mengalami pengendapan, sementara 15 penampang melintang diprediksi mengalami erosi.

Tabel 4 Jumlah penampang yang mengalami pengendapan dan penampang yang mengalami erosi dari tahun sebelumnya

	Jumlah Penampang yang mengalami Pengendapan dan Erosi dari Tahun Sebelumnya									
	31/12/ 21	31/12/ 22	31/12/23	31/12/24	31/12/ 25	31/12/ 26	31/12/ 27	31/12/ 28	31/12/ 29	31/12/ 30
Jumlah penampang melintang mengalami pengendapan dari tahun sebelumnya	17	14	12	9	15	14	20	11	17	8
Jumlah penampang melintang mengalami erosi dari tahun sebelumnya	15	18	20	23	17	18	12	21	15	24

Tabel 5 Perbandingan elevasi *thalweg* sebelum dan akhir pemodelan

Penampang Melintang	Jarak ke Hilir (Km)	Elevasi <i>Thalweg</i> (m)		Perubahan Penampang	Penampang Melintang	Jarak ke Hilir (Km)	Elevasi <i>Thalweg</i> (m)		Perubahan Penampang
		05/02/ 21	31/12/ 30				05/02/ 21	31/12/ 30	
K.25+00	19,64	-1,16	-1,19	Erosi	K.09+00	21,24	-1,02	-1,05	Erosi
K.24+00	19,74	-1,34	-1,37	Erosi	K.08+00	21,33	-0,77	-0,79	Erosi
K.23+00	19,85	-0,85	-1,00	Erosi	K.07+41	21,39	-1,22	-0,47	Pengendapan
K.22+33	19,91	-2,38	-1,78	Pengendapan	K.07+00	21,42	-0,72	-0,31	Pengendapan
K.22+00	19,95	-1,03	-1,02	Pengendapan	K.06+00	21,51	-0,57	-0,37	Pengendapan
K.21+00	20,05	-1,25	-1,03	Pengendapan	K.05+00	21,61	0,02	0,06	Pengendapan
K.20+00	20,15	-1,34	-0,96	Pengendapan	K.04+55	21,67	0,36	0,21	Erosi
K.19+00	20,22	-0,61	-0,73	Erosi	K.04+00	21,74	-0,23	0,35	Pengendapan
K.18+00	20,31	-0,76	-0,70	Pengendapan	K.03+00	21,83	0,01	-0,05	Erosi
K.17+00	20,41	-0,87	-0,74	Pengendapan	K.02+24	21,91	0,25	0,43	Pengendapan
K.16+00	20,51	-1,03	-0,70	Pengendapan	K.01+00	22,03	0,52	0,31	Erosi
K.15+75	20,53	-0,92	-1,09	Erosi	K.00+87	22,04	0,53	0,32	Erosi
K.15+00	20,63	-0,42	-0,51	Erosi	K.00+00	22,15	0,77	0,71	Erosi
K.14+00	20,73	-0,49	-0,22	Pengendapan	Jumlah penampang melintang mengalami pengendapan				17
K.13+00	20,84	-0,84	-0,68	Pengendapan	Jumlah penampang melintang mengalami erosi				15
K.12+00	20,94	-0,38	-0,33	Pengendapan					
K.11+50	20,99	-0,56	-0,35	Pengendapan					
K.11+00	21,04	-0,92	-0,92	Erosi					
K.10+00	21,15	-0,66	-0,75	Erosi					



Gambar 10 Perubahan elevasi *thalweg* selama 10 tahun dilihat secara memanjang sungai

Pembulatan dua angka di belakang koma digunakan untuk nilai perubahan elevasi *thalweg* yang tertera dalam tabel di atas. Namun, jika terdapat nilai yang sama pada tabel namun keterangan atau warna menunjukkan adanya perubahan erosi atau pengendapan, maka perubahan tersebut dapat lebih kecil dari dua desimal (kurang dari 0,01 m atau dalam satuan milimeter).

Dalam simulasi ini, pengendapan tertinggi terjadi pada penampang K.22+33 (Tabel 6) dengan perubahan elevasi *thalweg* sebesar 0,59 m (dari -2,38 m menjadi -1,78 m pada akhir simulasi), sedangkan erosi tertinggi terjadi pada penampang K.00+87 (Tabel 7) dengan perubahan elevasi *thalweg* sebesar -0,22 m (dari +0,53 m menjadi +0,32 m pada akhir simulasi).

Tabel 6 Perubahan pengendapan elevasi *thalweg* di penampang K.22+33

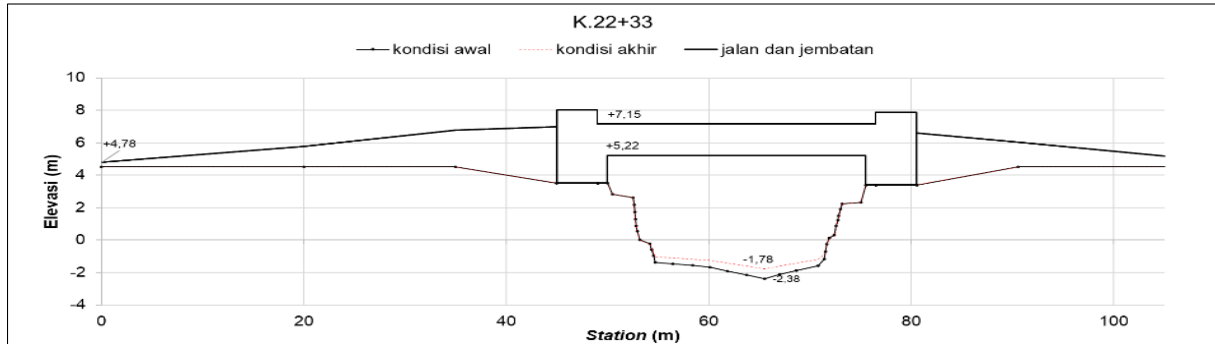
Penampang Melintang	Jarak ke hilir (Km)	Elevasi <i>Thalweg</i> (m)										
		05/02/21	31/12/21	31/12/22	31/12/23	31/12/24	31/12/25	31/12/26	31/12/27	31/12/28	31/12/29	31/12/30
K.22+33	19,91	-2,38	-1,86	-1,86	-1,94	-1,90	-1,90	-1,89	-1,89	-1,85	-1,84	-1,78

Tabel 7 Perubahan erosi elevasi *thalweg* di penampang K.00+87

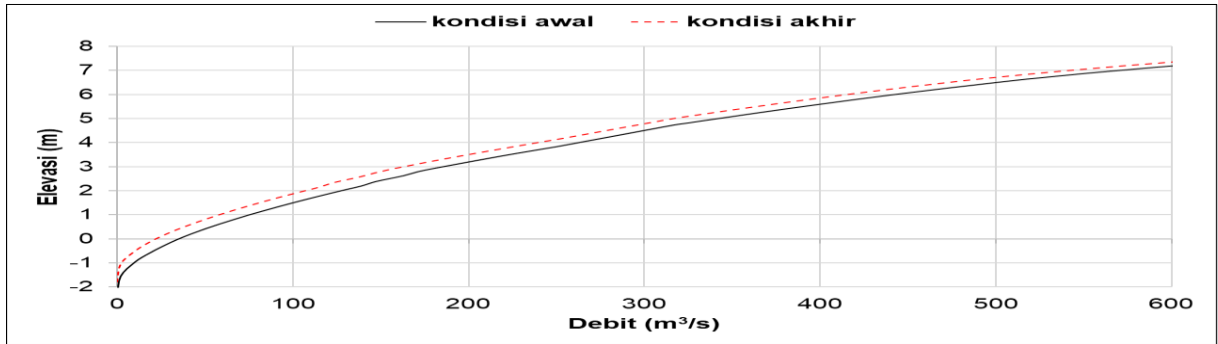
Penampang Melintang	Jarak ke hilir (Km)	Elevasi <i>Thalweg</i> (m)										
		05/02/21	31/12/21	31/12/22	31/12/23	31/12/24	31/12/25	31/12/26	31/12/27	31/12/28	31/12/29	31/12/30
K.00+87	22,04	0,53	0,44	0,42	0,38	0,35	0,35	0,34	0,34	0,34	0,33	0,32

Pengendapan di penampang K.22+33 yang berada di bawah Jembatan Cikuya (Gambar 11) perlu mendapat perhatian karena mengurangi kapasitas tampungan sungai di bawah jembatan tersebut. Hal ini dapat meningkatkan risiko banjir yang dapat menggenangi tempat wisata, permukiman, sawah, dan perkebunan di sekitar Jembatan Cikuya, serta jalan lintas yang menghubungkan Kecamatan Jeruklegi dan Kecamatan Kawungaten. Pada tanggal 05 Februari

2021, debit yang mencapai elevasi dasar balok Jembatan Cikuya +5,22 m sebesar 417,18 m³/s, sedangkan pada tanggal 31 Desember 2030 diprediksi debit yang mencapai elevasi tersebut sebesar 387,08 m³/s. Hal ini mengindikasikan adanya pengurangan kapasitas tampungan aliran sebesar 30,86 m³/s atau sekitar 7% dari kapasitas tampungan aliran pada kondisi awal. Perubahan *rating curve* (debit-elevasi muka air) di bawah Jembatan Cikuya dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 11 Pengendapan penampang K.22+33 yang berada di bawah Jembatan Cikuya

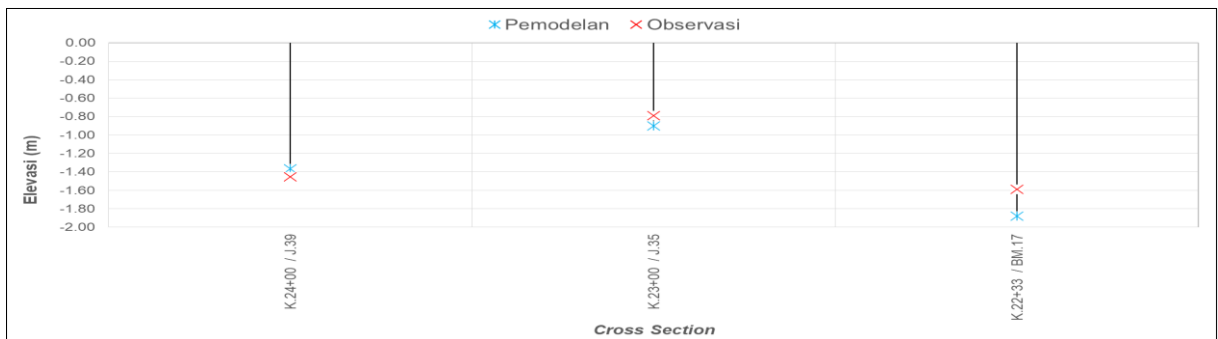


Gambar 12 Perubahan rating curve (debit-elevasi muka air) di bawah Jembatan Cikuya

Validasi Hasil Simulasi Perubahan Vertikal

Perbandingan elevasi *thalweg* data pengukuran topografi sungai tanggal 07 April 2020 dengan hasil simulasi angkutan sedimen dan BSTEM di waktu yang sama pada lokasi yang memiliki perbedaan jarak kurang dari 5 m (Gambar 13) memberikan

nilai *Nash Sutcliffe Efficiency* (NSE) 0,71 (Tabel 8). Hal ini menunjukkan bahwa model memiliki kinerja yang baik dalam memprediksi data yang diobservasi, tetapi masih terdapat beberapa perbedaan antara nilai prediksi dan nilai observasi yang sebenarnya.



Gambar 13 Perbandingan elevasi *thalweg* hasil pemodelan dengan data observasi

Tabel 8 NSE hasil pemodelan dengan data pengukuran

Pemodelan		Data Pengukuran Topografi Sungai 07/04/2022		Perbedaan Jarak Lokasi Penampang Melintang (m)	(Model-Observasi) ²	(Observasi – Rata - Rata Observasi) ²
Penampang Melintang	Prediksi Elevasi Thalweg 07/04/2022 (m)	Penampang Melintang	Elevasi Thalweg (m)			
K.22+33	-1,88	BM.17	-1,59	0,00	0,08	0,10
K.23+00	-0,90	J.35	-0,79	4,20	0,01	0,24
K.24+00	-1,37	J.39	-1,45	4,37	0,01	0,03
Rata - Rata			-1,28	Jumlah	0,10	0,36
					NSE	0,71

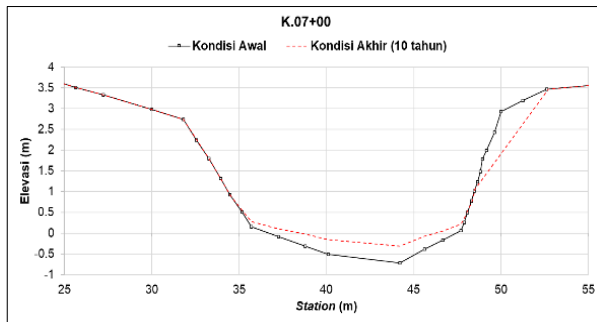
Perubahan Lateral Sungai Jambu

Hasil simulasi BSTEM terhadap penampang K.12+00 (Gambar 16), K.16+00 (Gambar 17), K.19+00 (Gambar 19), dan K.22+00 (Gambar 20) menunjukkan bentuk dan lokasi keruntuhan tebing yang sama dengan foto dokumentasi di lapangan pada tanggal 8 Agustus 2022. Namun, beberapa lokasi yaitu pada penampang K.07+00 (Gambar 14), K.11+00 (Gambar 15), dan K.17+00 (Gambar 18)

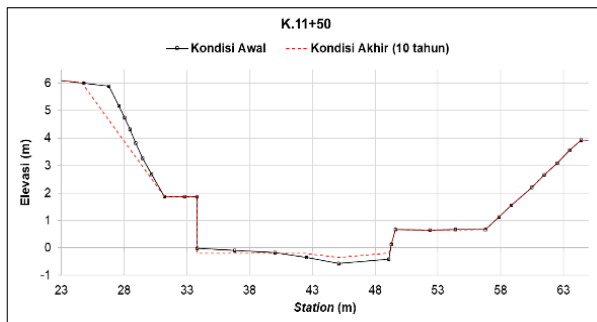
menunjukkan bahwa hasil simulasi memprediksi keruntuhan tebing yang lebih cepat dari pada foto dokumentasi tanggal 8 Agustus 2022. Hal ini mungkin disebabkan oleh faktor lapangan yang sulit diterapkan dalam model, seperti vegetasi yang dapat memperkuat tebing sungai. Fitur yang dapat secara persis menyimulasikan faktor vegetasi belum tersedia pada HEC-RAS. HEC-RAS merekomendasikan peningkatan nilai kohesi pada

tebing yang ditumbuhi vegetasi, tetapi hal ini sulit diasumsikan tanpa penelitian yang lebih mendalam. Selain itu, parameter tanah tebing sungai yang diasumsikan homogen dalam model penelitian ini

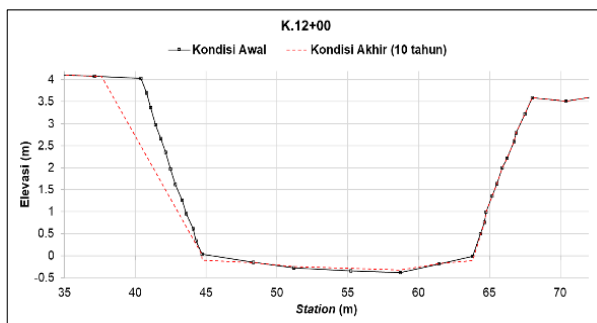
dapat menyebabkan perbedaan prediksi keruntuhan karena biasanya pada kondisi lapangan, parameter tanah memiliki karakteristik yang berbeda pada setiap lapisan dan jarak penampang.



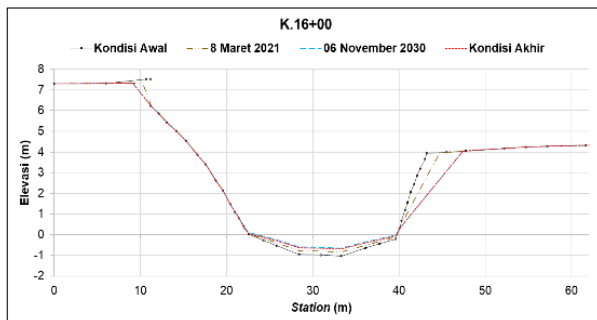
Gambar 14 Prediksi keruntuhan penampang K.07+00 pada 05/02/2021, namun pada dokumentasi 08/08/2022 tebing belum mengalami keruntuhan



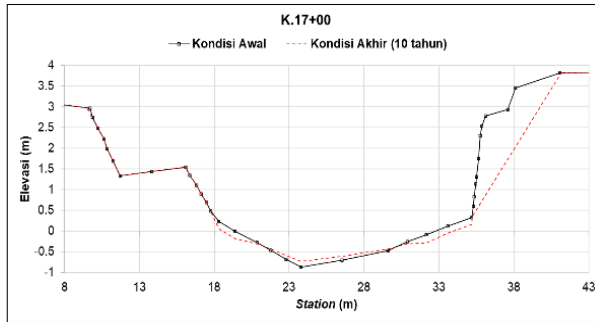
Gambar 15 Prediksi keruntuhan penampang K.11+00 pada 19/07/2021, namun pada dokumentasi 08/08/2022 tebing belum mengalami keruntuhan



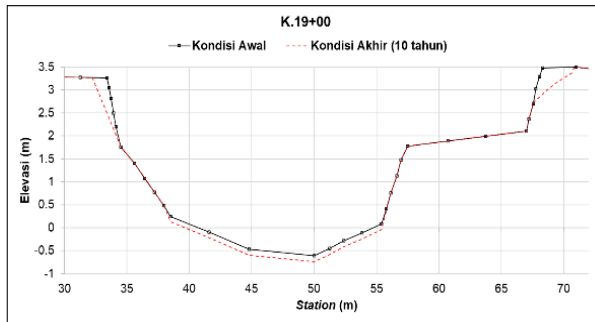
Gambar 16 Prediksi keruntuhan penampang K.12+00 pada 15/06/2021 sama dengan kondisi pada dokumentasi 08/08/2022



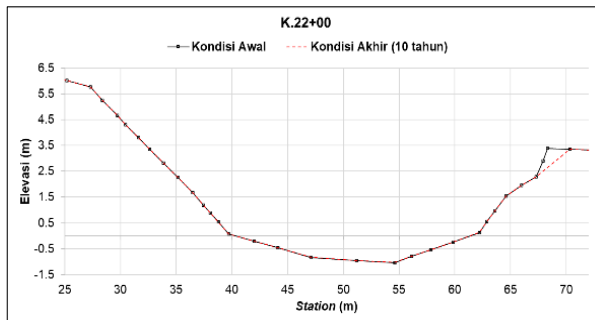
Gambar 17 Prediksi keruntuhan penampang K.16+00 pada 08/03/2021 dan 06/11/2030 sama dengan kondisi pada dokumentasi 08/08/2022



Gambar 18 Prediksi keruntuhan penampang K.17+00 pada 08/03/2021, namun pada dokumentasi 08/08/2022 tebing belum mengalami keruntuhan



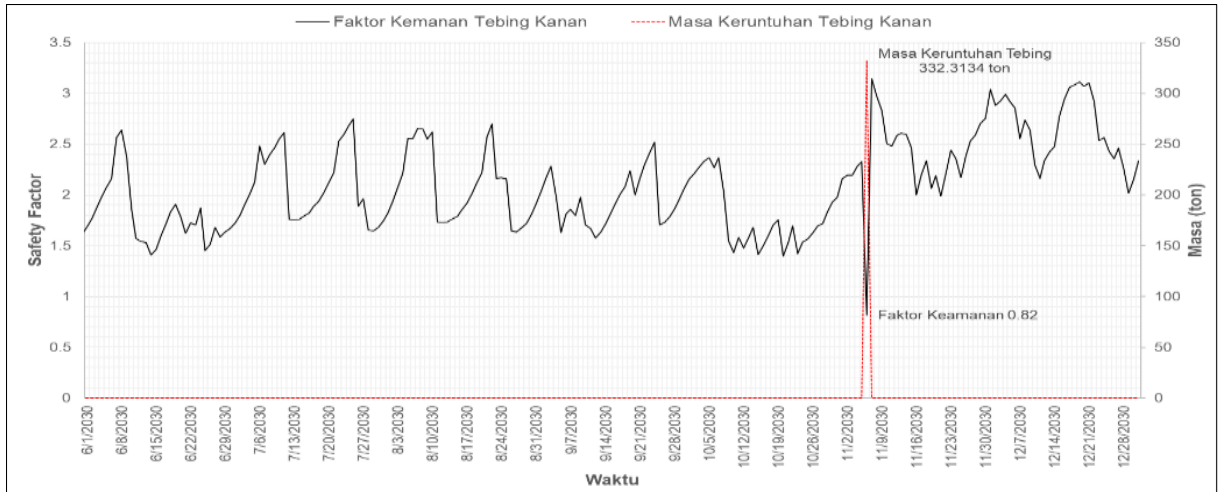
Gambar 19 Prediksi keruntuhan penampang K.19+00 terjadi bertahap sepanjang simulasi sama dengan kondisi pada dokumentasi 08/08/2022



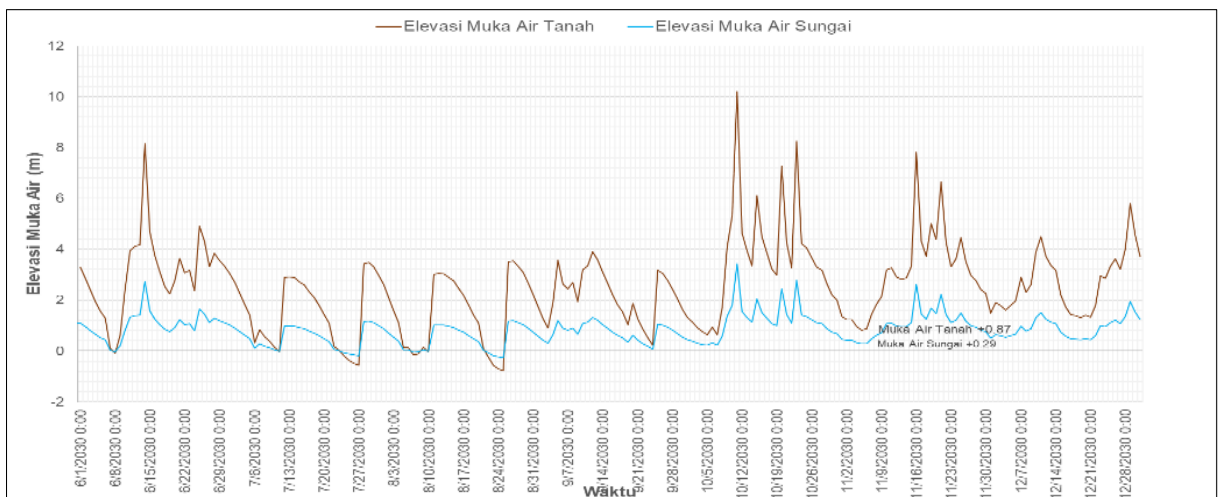
Gambar 20 Prediksi keruntuhan penampang K.22+00 terjadi bertahap sepanjang simulasi sama dengan kondisi pada dokumentasi 08/08/2022

Keruntuhan tebing sungai berdampak pada perubahan elevasi dasar dan menambah beban pada model angkutan sedimen dari bagian penampang yang mengalami keruntuhan hingga bagian hilir. Sebagai contoh, pada tahun ke-10, debit harian rata-rata sungai ($9,57 \text{ m}^3/\text{s}$) lebih tinggi dibandingkan dengan tahun ke-9 ($4,05 \text{ m}^3/\text{s}$). Secara umum, debit yang lebih tinggi akan menyebabkan erosi, tetapi pada penampang K.16+00, terjadi pengendapan sebesar 0,16 m (perbedaan elevasi *thalweg* tahun ke-10 dengan tahun ke-9). Hal ini disebabkan oleh keruntuhan tebing di sisi kanan penampang K.16+00 pada saat simulasi 6 November 2030, yang menyebabkan material tebing jatuh ke dasar sungai pada penampang tersebut.

Penampang K.16+00 mengalami dua kali keruntuhan selama simulasi selama 10 tahun. Keruntuhan pertama terjadi pada saat simulasi tanggal 8 Maret 2021, sedangkan keruntuhan kedua terjadi pada tanggal 6 November 2030 karena faktor keamanan menurun menjadi 0,82, yang mengakibatkan stabilitas tebing sungai berkurang (Gambar 21). Sebelum terjadinya keruntuhan pada tanggal 6 November 2030, elevasi muka air tanah di tebing sungai cukup tinggi dibandingkan elevasi muka air di sungai. Keruntuhan terjadi ketika elevasi muka air di kedua tempat tersebut turun secara bersamaan (Gambar 22).



Gambar 21 Hubungan kejadian keruntuhan dengan penurunan faktor keamanan tebing penampang K.16+00 pada waktu simulasi 06/11/2030



Gambar 22 Kondisi muka air tanah dan muka air sungai saat keruntuhan tebing penampang K.16+00 pada waktu simulasi 06/11/2030

Butiran lanau kasar dengan total massa 152,28 ton dan pasir sangat halus dengan total massa 102,50 ton merupakan butiran dominan yang jatuh pada penampang K.16+00. Jumlah massa butiran lanau kasar yang masuk ke volume kontrol penampang tersebut adalah 0,01 ton, sedangkan yang keluar menuju hilir adalah 152,29 ton. Oleh karena itu, tidak ada butiran lanau kasar yang mengendap pada dasar penampang K.16+00, karena seluruhnya terbawa oleh aliran (masa keruntuhan + masa masuk - masa keluar = 0). Namun, jumlah massa butiran pasir sangat halus yang masuk ke volume kontrol penampang K.16+00 adalah 0,01 ton, sedangkan yang keluar menuju hilir adalah 0,03 ton. Sebagian besar butiran pasir halus dari keruntuhan tebing tersebut mengendap pada dasar penampang K.16+00 sebanyak 102,48 ton (masa keruntuhan + masa masuk - masa keluar > 0, mengakibatkan pengendapan). Meskipun jumlahnya terus berkurang karena aliran air,

namun butiran pasir tersebut masih memiliki persentase yang cukup besar (15%) dari total massa yang mengendap pada dasar penampang K.16+00 sebesar 61,35 ton pada akhir pemodelan. Nilai massa yang dihitung di atas terlalu besar karena HEC-RAS menghitung perubahan massa atau volume penampang berdasarkan volume kontrol dari titik tengah penampang hulu (K.15+75) pada jarak 98,22 m dan penampang hilir (K.17+00) pada jarak 21,8 m, sehingga panjang volume kontrol sekitar 60,01 m. Keruntuhan tebing yang terjadi di lapangan tidak terjadi di seluruh jarak tersebut, sehingga untuk memperkirakan massa atau volume keruntuhan yang lebih akurat, pengukuran topografi sungai harus dilakukan dengan jarak yang lebih dekat.

Penampang yang mengalami keruntuhan tebing memiliki sudut kemiringan lebih dari 45° (Tabel 9). Sudut kemiringan tebing kanan

penampang K.16+00, pada saat keruntuhan pertama tanggal 8 Maret 2021 menjadi 45,84°. Setelah itu, dasar sungai mengalami erosi sehingga elevasi kaki tebing turun dari -0,01 m menjadi -0,14 m pada waktu simulasi pada 5 November 2030, yang menyebabkan tebing menjadi lebih curam dengan sudut 46,17°. Hal ini menjadi salah satu faktor penyebab terjadinya keruntuhan kedua pada penampang K.16+00 pada

waktu simulasi 6 November 2030. Erosi dasar sungai dapat menyebabkan tebing sungai menjadi lebih curam sehingga mengurangi stabilitas dan menyebabkan keruntuhan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa sudut kemiringan maksimum untuk material tebing sungai yang terdiri dari lanau dan lempung biasanya berkisar antara 20° hingga 30°.

Tabel 9 Perubahan sudut kemiringan tebing yang mengalami keruntuhan

Penampang	Sudut Kemiringan Tebing Awal Simulasi 05/02/21 (°)	Kondisi Terakhir Sebelum Runtuh		Kondisi Setelah Runtuh		Sudut Kemiringan Tebing Akhir Simulasi 05/12/30 (°)	Keterangan
		Waktu	Sudut Kemiringan Tebing (°)	Waktu	Sudut Kemiringan Tebing (°)		
K.07+00	71,50	05/02/2021	71,50	06/02/2021	38,54	37,24	Tebing kanan
K.11+50	52,48	18/07/2021	52,48	19/07/2021	36,08	36,08	Tebing kiri
K.12+00	53,30	14/06/2021	53,43	15/06/2021	32,87	33,84	Tebing kiri
K.16+00	66,05	07/03/2021	66,05	08/03/2021	45,84	30,12	Tebing kanan
		05/11/2030	46,17	06/11/2030	29,75		
K.17+00	61,84	07/03/2021	61,84	08/03/2021	33,65	35,07	Tebing kanan
	78,13	Keruntuhan bertahap terjadi sepanjang simulasi				37,86	Tebing kiri
K.19+00	60,38	Keruntuhan bertahap terjadi sepanjang simulasi				19,91	Tebing kanan
K.22+00	61,88	Keruntuhan bertahap terjadi sepanjang simulasi				20,24	Tebing kanan

KESIMPULAN

Elevasi *thalweg* Sungai Jambu di sekitar Jembatan Cikuya, selama 10 tahun, diprediksi akan mengalami pengendapan pada 17 penampang dan akan mengalami erosi pada 15 penampang. Pengendapan tertinggi terjadi pada penampang di bawah Jembatan Cikuya dengan perubahan elevasi *thalweg* sebesar 0,59 m. Hal ini perlu mendapat perhatian karena kapasitas tampungan penampang berkurang 7% dari kondisi awal.

Prediksi menunjukkan keruntuhan tebing akan terjadi pada 7 penampang melintang dalam 10 tahun ke depan. Hal ini disebabkan oleh kemiringan tebing tanah lanau dan lempung yang cukup curam, yaitu lebih dari 45°, serta berkurangnya faktor keamanan stabilitas tebing sungai akibat tekanan air tanah yang dipengaruhi oleh fluktuasi debit sungai dan pasang-surut yang masih mencapai Sungai Jambu. Keruntuhan tebing sungai berdampak pada perubahan elevasi dasar dan menambah beban pada model angkutan sedimen dari bagian penampang yang mengalami keruntuhan hingga bagian hilir.

Kejadian aktual di masa depan dapat berbeda dari asumsi yang digunakan dalam simulasi. Beberapa hasil simulasi bahkan memperkirakan keruntuhan tebing yang lebih cepat daripada yang sebenarnya terjadi di lapangan. Oleh karena itu, diperlukan data pengukuran yang lebih detail, lokasi pengujian parameter tanah yang lebih banyak, data hidrologi dan hidraulika yang aktual, serta mempertimbangkan beberapa faktor kondisi lapangan seperti vegetasi, serta mengurangi penggunaan asumsi, untuk mendapatkan prediksi yang lebih akurat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan hasil kegiatan magang Program Pendidikan Magister Super Spesialis Bidang Studi Rekayasa dan Pengendalian Morfologi Sungai oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) dan Institut Teknologi Bandung (ITB). Kesimpulan dan rekomendasi sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis dan tidak selalu mencerminkan pandangan Kementerian PUPR dan ITB. Penulis berterima kasih kepada Kementerian PUPR atas beasiswa yang diberikan serta Balai Besar Wilayah Sungai Serayu-Opak atas bantuan dan dukungannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ducioame, A. R. (2018). *Evaluation of streambank stabilization options on the Tongue river in Cavalier, nd utilizing Hec-ras hydraulic and sediment transport simultions*. May, 24.
- Gibson, S., Sánchez, A., Piper, S., & Brunner, G. (2017). New One-Dimensional Sediment Features in HEC-RAS 5.0 and 5.1. *World Environmental and Water Resources Congress 2017: Hydraulics and Waterways and Water Distribution Systems Analysis - Selected Papers from the World Environmental and Water Resources Congress 2017*, 192–206. <https://doi.org/10.1061/9780784480625.018>
- Gibson, S., Simon, A., Langendoen, E., Bankhead, N., & Shelley, J. (2015). A physically-based channel-modeling framework integrating HEC-RAS sediment transport capabilities and the USDA-ARS Bank-Stability and Toe-Erosion Model (BSTEM). *5th Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference and the 10th Federal Interagency Sedimentation Conference*, 12.
- Jacobson, R. B., & Berkley, J. (2013). *Conceptualizing and Communicating Ecological River Restoration* (hlm. 9–27). <https://doi.org/10.1029/2010GM000967>
- Kassa, K., Castro-Bolinaga, C., Guertault, L., Fox, G. A., Russell, P., & Brown, E. D. (2023). Quantifying the Impact of Model Selection When Examining Bank Retreat and Sediment Transport in Stream Restoration. *Water (Switzerland)*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/w15081448>
- Klavon, K., Fox, G., Guertault, L., Langendoen, E., Enlow, H., Miller, R., & Khanal, A. (2017). Evaluating a process-based model for use in streambank stabilization: insights on the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM). *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(1), 191–213. <https://doi.org/10.1002/esp.4073>
- Langendoen, E. J., & Simon, A. (2008). Modeling the Evolution of Incised Streams. II: Streambank Erosion. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(7), 905–915. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2008\)134:7\(905\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2008)134:7(905))
- Mohammed-Ali, W., Mendoza, C., & Holmes, R. R. (2020). Influence of hydropower outflow characteristics on riverbank stability: case of the lower Osage River (Missouri, USA). *Hydrological Sciences Journal*, 65(10), 1784–1793. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1772974>
- Mohammed-Ali, W., Mendoza, C., & Holmes, R. R. (2021). Riverbank stability assessment during hydro-peak flow events: the lower Osage River case (Missouri, USA). *International Journal of River Basin Management*, 19(3), 335–343. <https://doi.org/10.1080/15715124.2020.1738446>
- Simon, A., Curini, A., Darby, S. E., & Langendoen, E. J. (2000). Bank and near-bank processes in an incised channel. *Geomorphology*, 35(3–4), 193–217. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00036-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00036-2)
- Simon, A., Pollen-Bankhead, N., & Thomas, R. E. (2011). Development and application of a deterministic bank stability and toe erosion model for stream restoration. *Geophysical Monograph Series*, 194, 453–474. <https://doi.org/10.1029/2010GM001006>
- Simon, A., Pollen-Bankhead, N., & Thomas, R. E. (2013). *Development and Application of a Deterministic Bank Stability and Toe Erosion Model for Stream Restoration* (hlm. 453–474). <https://doi.org/10.1029/2010GM001006>
- Thorne, C. R., & Osman, A. M. (1988). Riverbank Stability Analysis. II: Applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(2), 151–172. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:2\(151\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:2(151))
- USACE. (2015). *HEC-RAS USDA-ARS Bank Stability & Toe Erosion Model (BSTEM). Technical Reference & User's Manual*.
- USACE. (2020). *HEC-RAS Sediment Transport User's Manual*.