

Evaluasi Kerusakan *Groundsill* dan Rekomendasi Mitigasi Awal Berdasarkan Survei Pesawat Udara Nirawak dan Analisis Model Elevasi Digital

Aqbil Fauzan^a, Muhammad Heru Sukoco^a dan Puji Harsanto^{a*}

^aProgram Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia 55183

* Corresponding author's e-mail: puji_hr@umy.ac.id

Received: 14 August 2026; revised: 28 August 2026; accepted: 28 August 2026

Abstract: The collapse of the Srandakan groundsill on the Progo River caused riverbed degradation and triggered headward erosion that potentially threatens the stability of the new Srandakan Bridge. Unstable post-collapse field conditions limited the use of conventional terrestrial surveys to obtain damage geometry data quickly and safely. This study evaluated damage to the Srandakan groundsill through the integration of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) surveys, GNSS control, and Digital Elevation Model (DEM) analysis, applying a relative risk classification among piers based on geometric indicators, given the unavailability of pier foundation depth data. Unlike previous UAV-DEM studies that focused on post-earthquake damage mapping or riverbank erosion characterization, this study represents one of the first applications of this approach specifically to post-collapse groundsill damage evaluation. Accuracy testing yielded a CE90 of 0.052 m and an LE90 of 0.066 m, meeting Class 1 standards of the Geospatial Information Agency Regulation. Results showed the lowest riverbed elevation reached 3.23 m, a decrease of 7.12 m from the reference elevation of 10.35 m, with headward erosion identified extending approximately 250 m toward the new Srandakan Bridge. The relative risk classification indicated that Pier 6 fell into the highest risk category, followed by Pier 7 (moderate) and Pier 8 (moderate-low), while Pier 5 could not be classified using the vertical indicator due to its position at the edge of the active channel. These findings form the basis for preliminary mitigation recommendations prioritizing high-risk piers, serving as an initial basis prior to further hydraulic studies and structural design.

Keywords: *groundsill, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Digital Elevation Model (DEM), headward erosion*

Abstrak: Keruntuhan groundsill Srandakan di Sungai Progo menyebabkan degradasi dasar sungai dan memicu rambatan erosi mudik yang berpotensi mengancam stabilitas Jembatan Srandakan Baru. Kondisi lapangan pascakeruntuhan yang belum stabil membatasi penerapan survei terestris konvensional untuk memperoleh data geometris kerusakan secara cepat dan aman. Penelitian ini mengevaluasi kerusakan groundsill Srandakan melalui integrasi survei Unmanned Aerial Vehicle (UAV), kontrol GNSS, dan analisis Digital Elevation Model (DEM), dengan pendekatan klasifikasi risiko relatif antarpilar berbasis indikator geometris karena data kedalaman fondasi pilar tidak tersedia. Berbeda dari studi UAV-DEM terdahulu yang berfokus pada pemetaan kerusakan pascagempa atau karakterisasi erosi tebing sungai, penelitian ini menjadi salah satu penerapan pertama pendekatan tersebut secara khusus pada evaluasi kerusakan struktur groundsill pascakeruntuhan. Uji akurasi menunjukkan nilai CE90 sebesar 0,052 m dan LE90 sebesar 0,066 m, memenuhi standar Kelas 1 Peraturan Badan Informasi Geospasial. Hasil analisis menunjukkan elevasi dasar sungai terendah mencapai 3,23 m, mengalami penurunan 7,12 m terhadap elevasi referensi 10,35 m, dengan rambatan erosi mudik teridentifikasi sejauh sekitar 250 m menuju Jembatan Srandakan Baru. Klasifikasi risiko relatif menunjukkan Pilar 6 berada pada kategori tertinggi, diikuti Pilar 7 (sedang) dan Pilar 8 (sedang-rendah), sementara Pilar 5 tidak dapat diklasifikasikan dengan indikator vertikal karena posisinya di tepi alur aktif. Temuan ini menjadi dasar rekomendasi mitigasi awal yang diprioritaskan pada pilar berisiko tinggi, sebagai basis awal sebelum kajian hidraulik dan desain struktur lanjutan.

Kata kunci: *groundsill, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Digital Elevation Model (DEM), erosi mudik*

1. Pendahuluan

Sungai Progo merupakan salah satu sistem sungai utama di Daerah Istimewa Yogyakarta yang memiliki karakteristik hidraulik dinamis dan transpor sedimen tinggi [1], [2]. Untuk menjaga stabilitas morfologi sungai dan mengendalikan degradasi dasar sungai, dibangun struktur pengontrol elevasi dasar sungai, salah satunya adalah *groundsill* Srandakan. Secara teknis, *groundsill* berfungsi menurunkan energi aliran, mempertahankan elevasi dasar sungai, serta mengurangi potensi gerusan lokal yang dapat mengancam infrastruktur melintang di sekitarnya, termasuk fondasi pilar jembatan [3].

Pascakeruntuhan *groundsill* Srandakan, morfologi dasar sungai di kawasan tersebut mengalami ketidakseimbangan. Hilangnya struktur pengontrol elevasi menyebabkan

degradasi dasar sungai berlangsung secara progresif. Salah satu dampak kritis dari kondisi ini adalah terbentuknya erosi mudik (*headward erosion*), yaitu proses perambatan penurunan elevasi dasar sungai dari titik keruntuhan ke arah hulu [4]. Fenomena ini bukan ancaman hipotetis, sebab Jembatan Srandakan Lama sebelumnya telah runtuh akibat proses gerusan yang berkaitan dengan kegagalan struktur pengendali dasar sungai [5]. Saat ini, proses serupa berpotensi mengancam Jembatan Srandakan Baru yang berada di bagian hulu *groundsill*. Penurunan elevasi dasar sungai dapat menyebabkan terbukanya fondasi pilar (*exposed foundation*), sehingga kapasitas dukung tanah di sekitar fondasi berkurang dan stabilitas struktur jembatan dapat terganggu [6]. Kondisi ini konsisten dengan temuan Baharuddin dkk.[7], yang melaporkan bahwa gerusan di sekitar pilar memicu penggerusan fondasi dan pada

akhirnya menurunkan kapasitas dukung serta stabilitas struktur jembatan.

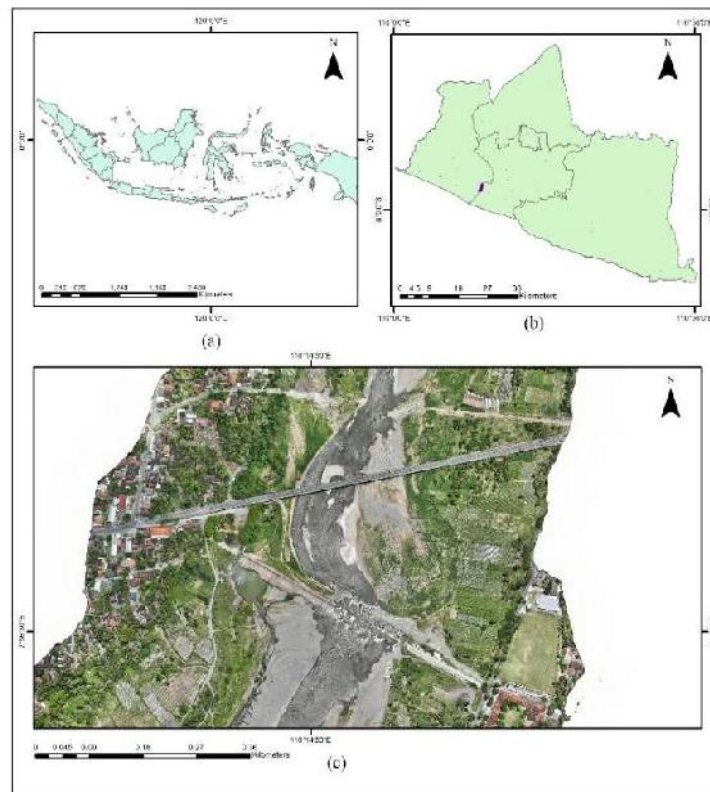
Merumuskan langkah mitigasi dan rencana rekonstruksi *groundsill* menuntut data geometris dan topografi yang akurat, yaitu dimensi kerusakan, kedalaman gerusan, dan arah rambatan erosi. Namun, kondisi lapangan pascakeruntuhan menyulitkan pengambilan data itu sendiri. Aliran deras, geometri tebing dan dasar sungai yang belum stabil, serta risiko keselamatan bagi petugas survei membuat survei terestris konvensional (*theodolite*, *total station*) membutuhkan waktu akuisisi lama dan cakupan terbatas pada area sungai yang luas dan tidak stabil [8].

Teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) menawarkan alternatif survei non-kontak untuk kaji cepat (*rapid assessment*) pada kondisi seperti ini. UAV memungkinkan akuisisi data spasial permukaan yang cepat, luas, dan relatif aman karena tidak menuntut petugas survei mengukur langsung di area berisiko tinggi [9]. Untuk meningkatkan ketelitian geometri, survei UAV dapat dikombinasikan dengan kontrol geodetik berbasis GNSS guna menghasilkan model permukaan digital sungai dengan akurasi tinggi, mencapai ketelitian pada kisaran sentimeter sehingga mampu mengidentifikasi tahapan proses gerusan secara rinci, termasuk penggerusan bagian bawah tebing (*undermining*) [10], serta model elevasi digital dengan ketelitian horizontal dan vertikal yang memadai untuk analisis morfologi sungai dan evaluasi gerusan [11].

Meski demikian, penerapan UAV-DEM pada kasus seperti *groundsill* Srandakan belum tergarap dalam literatur yang ditinjau. Studi [9] menghasilkan pemetaan kerusakan

fisik pascabencana secara deskriptif, sementara studi [10] mengkarakterisasi proses gerusan tebing sungai secara siklis. Keduanya tidak dirancang untuk mengidentifikasi arah rambatan kerusakan menuju infrastruktur tertentu di sekitarnya. Pada objek yang sama, *groundsill* Srandakan, kajian lain telah membahas strategi penanganan darurat berbasis pemodelan hidraulik numerik [5], tetapi kajian tersebut belum mengevaluasi kerusakan geometris struktur secara kuantitatif berbasis data survei udara pascakeruntuhan.

Penelitian ini menjawab kekosongan tersebut. Berbeda dari studi UAV-DEM sebelumnya yang berfokus pada bencana gempa atau erosi tebing sungai, penelitian ini menerapkan pendekatan tersebut secara khusus pada kasus kerusakan *groundsill* pascakeruntuhan melalui integrasi survei UAV, kontrol GNSS, dan analisis DEM berbasis sistem informasi geografis, sebagai dasar awal pengambilan keputusan mitigasi sebelum dilakukan kajian hidraulik dan desain struktur yang lebih rinci. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengevaluasi kerusakan geometris *groundsill* Srandakan berdasarkan data UAV dan DEM; (2) mengidentifikasi penurunan elevasi dasar sungai serta arah rambatan erosi mudik menuju Jembatan Srandakan Baru; dan (3) merumuskan rekomendasi mitigasi awal berdasarkan hasil analisis geometri gerusan. Hasil penelitian ini menghasilkan data kuantitatif kerusakan *groundsill* dan rambatan erosi mudik yang dapat menjadi rujukan awal sebelum kajian hidraulik dan desain struktur lanjutan.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian: (a) posisi Provinsi DIY di Indonesia, (b) posisi lokasi penelitian di Provinsi DIY, (c) peta orthomosaic UAV pada area *groundsill* Srandakan. Sumber: (a, b) Badan Informasi Geospasial (BIG), 2024; (c) Hasil olahan data UAV penelitian, 2025.

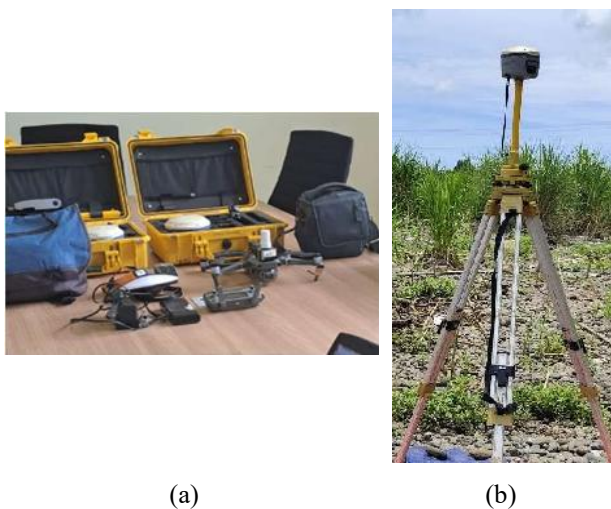
2. Metode Penelitian

2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada alur Sungai Progo, khususnya di area *groundsill* Srandakan (416.421 mE, 9.122.121 mN, UTM Zona 49S) dan Jembatan Srandakan Baru (416.450 mE, 9.122.311 mN, UTM Zona 49S), Daerah Istimewa Yogyakarta sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Lokasi ini dipilih karena mengalami kerusakan struktur *groundsill* yang memicu perubahan morfologi dasar sungai dan berpotensi mengancam stabilitas pilar jembatan di bagian hulu. Area tinjauan mencakup zona hulu di sekitar pilar jembatan, zona tengah pada area keruntuhan *groundsill*, dan zona hilir untuk mengidentifikasi pola rambatan gerusan. Survei lapangan dilakukan pada 9 September 2025 sebagai bagian dari kaji cepat kondisi pascakeruntuhan.

2.2 Peralatan dan Data

Penelitian ini menggunakan data foto udara, titik kontrol tanah, titik cek independen, serta data elevasi hasil pengolahan fotogrametri. Akuisisi foto udara dilakukan menggunakan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), seperti ditunjukkan Gambar 2 (a) yang dilengkapi sistem penentuan posisi berbasis RTK/PPK. Pengukuran titik kontrol dan titik cek dilakukan menggunakan GNSS geodetic, seperti ditunjukkan Gambar 2 (b). Pemrosesan koordinat GNSS dilakukan untuk memperoleh posisi titik kontrol yang presisi, sedangkan pemrosesan fotogrametri digunakan untuk menghasilkan *dense cloud*, *ortomosaik*, dan *Digital Elevation Model* (DEM). Analisis spasial dan ekstraksi profil elevasi dilakukan menggunakan perangkat lunak sistem informasi geografis.



Gambar 2. *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) (a) dan GNSS geodetic (b)

Sumber: (a) Dokumentasi peralatan penelitian, 2025; (b) Dokumentasi lapangan penelitian, 2025

2.3 Akuisisi Data UAV dan GNSS

Tahap pengumpulan data diawali dengan pemasangan target titik kontrol tanah pada area yang dapat diidentifikasi dengan jelas pada foto udara. Titik kontrol digunakan untuk

membantu proses georeferensi model, sedangkan titik cek independen digunakan untuk mengevaluasi akurasi hasil pemetaan. Pengukuran koordinat dilakukan menggunakan GNSS geodetik pada sistem koordinat WGS 84 UTM Zone 49S.

Akuisisi foto udara dilakukan dengan jalur terbang yang dirancang agar memiliki tumpang tindih antar-foto yang memadai untuk pemrosesan fotogrametri. Penerbangan dilakukan pada ketinggian 150 meter di atas permukaan tanah, dengan *overlap* depan 80% dan *overlap* samping 70%. Mode penerbangan menggunakan *autopilot* dalam kondisi cuaca cerah. Akuisisi ini menghasilkan 676 foto yang mencakup luas area survei sekitar 100 hektar, dengan resolusi spasial (GSD) sebesar 3,9 cm/piksel. Sebanyak 1 titik GCP dan 4 titik ICP dipasang untuk keperluan georeferensi dan validasi akurasi model, dengan koreksi dari stasiun CORS Bantul dengan kode stasiun CBTL. Sebaran titik ICP terhadap area studi ditunjukkan pada Gambar 3. Perekaman foto difokuskan pada area reruntuhan *groundsill*, jalur *thalweg*, dan zona sekitar pilar Jembatan Srandakan Baru. Strategi akuisisi non-kontak ini dipilih untuk mengurangi risiko keselamatan petugas survei akibat kondisi aliran yang deras dan morfologi sungai yang belum stabil.

Pemasangan GCP pada penelitian ini mengacu pada praktik yang diterapkan pada pemetaan fotogrametri UAV di kawasan Universitas Sam Ratulangi. Di sana, kehadiran GCP menekan kesalahan horizontal dari 2,54 m menjadi 0,05 m, dan kesalahan vertikal dari 0,78 m menjadi 0,12 m dibandingkan tanpa GCP [12]. Titik kontrol tanah karena itu tetap dipasang dalam penelitian ini agar model pemetaan yang dihasilkan cukup akurat untuk mendukung analisis morfologi sungai secara rinci.

2.4 Pemrosesan Fotogrametri dan Pembuatan DEM

Foto udara dan koordinat titik kontrol diproses menggunakan metode fotogrametri digital berbasis *Structure from Motion* (SfM). Tahapan pemrosesan meliputi penyelarasan foto, pembentukan *sparse cloud*, pembentukan *dense cloud*, pembuatan *ortomosaik*, dan ekstraksi DEM. DEM yang dihasilkan digunakan sebagai dasar analisis elevasi dan identifikasi geometri cekungan gerusan pada area keruntuhan *groundsill*.

Sebelum digunakan untuk analisis lebih lanjut, model hasil fotogrametri diperiksa secara visual untuk memastikan ketercakupannya area studi, kesesuaian posisi objek utama, dan keterbacaan fitur morfologi sungai seperti jalur *thalweg*, sisa struktur *groundsill*, dan area sekitar pilar jembatan. Prinsip pengolahan SfM ini memanfaatkan sekumpulan foto yang saling bertampalan sebagai input rekonstruksi struktur tiga dimensi objek [13], dan telah diterapkan pula pada pemetaan geomorfologi Sungai Oyo, Bantul, untuk menghasilkan DEM guna mengidentifikasi karakteristik erosi tebing sungai [14].

2.5 Uji Akurasi Data Spasial

Uji akurasi dilakukan dengan membandingkan koordinat hasil pemetaan UAV terhadap titik cek independen yang diukur menggunakan GNSS geodetik. Titik cek tidak digunakan dalam proses georeferensi model, sehingga berfungsi sebagai data validasi independen.

Selisih koordinat dihitung pada komponen horizontal dan vertikal, yaitu ΔX , ΔY , dan ΔZ .

Ketelitian horizontal dihitung menggunakan RMSE horizontal, kemudian dikonversi menjadi CE90. Ketelitian vertikal dihitung menggunakan RMSE vertikal, kemudian dikonversi menjadi LE90, dengan persamaan sebagai berikut:

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{UAV,i} - X_{cek,i})^2} \quad (1)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{UAV,i} - Y_{cek,i})^2} \quad (2)$$

$$RMSE_r = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (3)$$

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{UAV,i} - Z_{cek,i})^2} \quad (4)$$

$$CE90 = 1,5175 \times RMSE_r \quad (5)$$

$$LE90 = 1,6499 \times RMSE_z \quad (6)$$

Keterangan:

$X_{UAV,i}$, $Y_{UAV,i}$, $Z_{UAV,i}$ = koordinat titik ke- i hasil pemetaan UAV; $X_{cek,i}$, $Y_{cek,i}$, $Z_{cek,i}$ = koordinat titik ke- i hasil pengukuran ICP di lapangan; n = jumlah titik cek independen; CE90 = ketelitian horizontal pada tingkat kepercayaan 90%; LE90 = ketelitian vertikal pada tingkat kepercayaan 90%.

Perhitungan CE90 dan LE90 mengacu pada Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar [15], sebagaimana juga diterapkan pada penelitian pemetaan fotogrametri UAV sebelumnya [12]. Hasil uji akurasi digunakan untuk menilai kelayakan data *ortomosaik* dan DEM sebagai dasar analisis geometri gerusan.

2.6 Analisis Potongan Memanjang dan Estimasi Gerusan

DEM hasil pemrosesan UAV digunakan untuk mengekstraksi profil penampang memanjang pada jalur aliran terdalam atau *thalweg*. Garis penampang memanjang ditarik dari area sekitar pilar Jembatan Srandakan Baru di bagian hulu menuju area *groundsill* yang mengalami keruntuhan di bagian hilir. Berdasarkan Gambar 5, panjang profil yang dianalisis adalah sekitar 250m, mengikuti jalur aliran utama yang teridentifikasi pada *ortomosaik* dan DEM. Pendekatan ekstraksi profil sungai dari DEM hasil UAV untuk menganalisis perubahan morfologi telah diterapkan pada studi geomorfologi Sungai Oyo, Bantul, dimana DEM dari foto udara drone digunakan untuk mengidentifikasi bentuk lahan sungai serta menentukan tipe dan karakteristik erosi tebing di sepanjang sungai yang diteliti [14].

Karena data topografi sebelum keruntuhan tidak tersedia, penelitian ini menggunakan pendekatan rekonstruksi spasial. Elevasi bagian *groundsill* yang masih utuh digunakan sebagai acuan awal untuk membentuk garis referensi atau baseline. Profil elevasi eksisting dari DEM kemudian dibandingkan dengan baseline tersebut untuk memperkirakan kedalaman degradasi dasar sungai dan mengidentifikasi cekungan gerusan. Dengan demikian, nilai penurunan elevasi yang diperoleh merupakan estimasi berdasarkan pendekatan rekonstruksi spasial, bukan hasil

perbandingan langsung dengan data survei sebelum kejadian.

2.7 Klasifikasi Risiko Relatif Pilar Berdasarkan Indikator Penurunan Elevasi dan Jarak Gerusan

Tingkat risiko relatif pada Pilar 5, 6, 7, dan 8 diklasifikasikan menggunakan dua indikator kuantitatif. Indikator pertama adalah penurunan elevasi dasar sungai lokal pada titik koordinat tiap pilar, diperoleh dari selisih elevasi DEM terhadap elevasi baseline pilar. Elevasi baseline pilar diperoleh dari titik pada jalur *thalweg* sekitar 370 m di sebelah utara Pilar 6, yaitu di luar jangkauan zona rambatan erosi mudik sepanjang 250 m yang membentang dari pilar jembatan yang terdampak menuju *groundsill* yang rusak dan menunjukkan morfologi dasar sungai yang stabil pada profil memanjang. Baseline pilar ini berbeda dari baseline permukaan *groundsill* pada subbab 2.6, mengingat jarak pilar terdampak ke *groundsill* cukup jauh sehingga penggunaan baseline *groundsill* berpotensi mengabaikan kemiringan memanjang alami dasar sungai. Baseline diasumsikan relatif seragam pada segmen antara titik referensi dan posisi tiap pilar, mengingat kemiringan memanjang dasar sungai yang landai pada segmen yang dianalisis. Potensi variasi kemiringan alami menjadi salah satu sumber ketidakpastian dalam estimasi ini.

Indikator kedua adalah jarak tiap pilar terhadap titik gerusan terdalam pada jalur *thalweg*, diukur dari peta sebaran pilar pada Gambar 6. Keempat pilar kemudian dikelompokkan ke dalam kategori risiko tinggi, sedang, dan rendah berdasarkan pembagian tersil dari nilai kedua indikator tersebut. Klasifikasi ini bersifat relatif antarpilar dalam lingkup penelitian ini, bukan risiko struktural mutlak, karena data kedalaman fondasi tiap pilar tidak tersedia dalam penelitian ini.

2.8 Perumusan Rekomendasi Mitigasi Awal

Rekomendasi mitigasi dirumuskan berdasarkan hasil analisis geometri gerusan, kedalaman degradasi dasar sungai, posisi jalur *thalweg*, dan potensi rambatan erosi menuju pilar jembatan. Rekomendasi yang disusun meliputi penanganan celah pada area *groundsill* yang runtuh, perlindungan gerusan di sekitar pilar terdampak, dan pemantauan berkala terhadap perubahan elevasi dasar sungai.

Penanganan celah pada *groundsill* dapat mengacu pada metode yang telah diterapkan pada studi mitigasi gerusan pilar jembatan lain. Karuru *dkk.* [16] merekomendasikan pemasangan riprap di sekitar pilar sebagai pelindung dasar sungai, dikombinasikan dengan bronjong untuk memperkuat tanggul dan menekan kecepatan aliran di titik rawan gerusan. Pendekatan serupa relevan diterapkan pada area keruntuhan *groundsill* Srandakan, mengingat kondisi tebing dan dasar sungai di lokasi ini juga rentan terhadap rambatan erosi lanjutan menuju pilar jembatan.

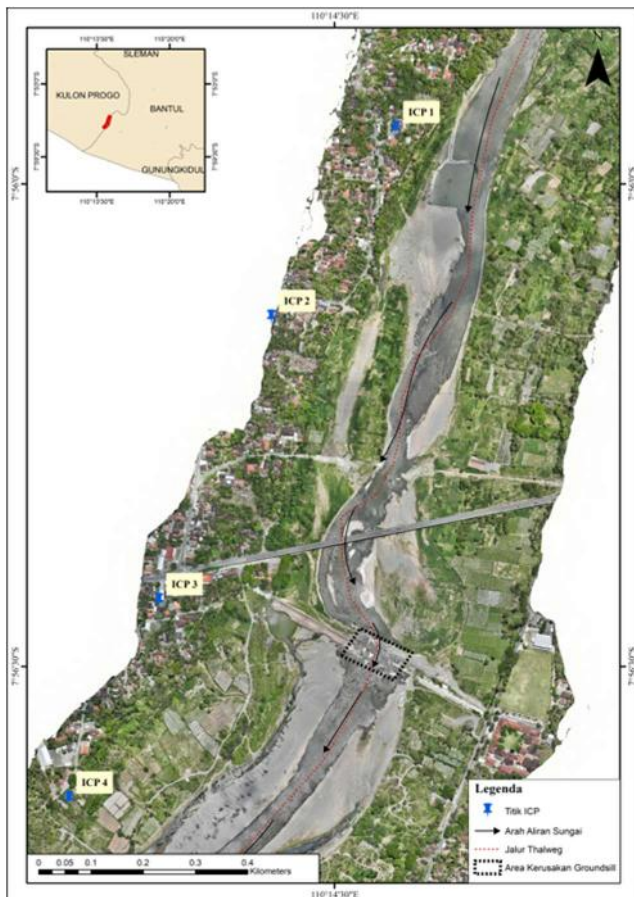
Rekomendasi dalam penelitian ini bersifat awal dan digunakan sebagai dasar pendukung pengambilan keputusan. Implementasi konstruksi tetap memerlukan kajian lanjutan, termasuk analisis hidraulik, analisis geoteknik, dan desain struktur pengendali dasar sungai.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Uji Akurasi Geometri Pemodelan UAV Berbasis Sistem PPK

Hasil pemrosesan data GNSS dan fotogrametri menunjukkan bahwa model spasial hasil survei UAV dapat digunakan untuk analisis geometri kerusakan *groundsill* setelah melalui uji ketelitian horizontal dan vertikal. Georeferensi model mengandalkan sistem *Post-Processed Kinematic* (PPK) sebagai kontrol geometrik utama, dengan satu titik GCP dipasang sebagai titik ikat tambahan untuk mengoreksi kemungkinan pergeseran sistematis pada hasil PPK. Pendekatan ini konsisten dengan temuan bahwa metode PPK mampu mengurangi kebutuhan jaringan GCP yang padat dibandingkan metode georeferensi konvensional, karena posisi kamera saat pemotretan sudah dikoreksi langsung melalui data GNSS [17].

Uji akurasi dilakukan menggunakan empat titik cek independen (*Independent Check Point/ICP*) yang tidak dilibatkan dalam proses georeferensi model. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3, keempat titik ICP tersebar di sepanjang koridor Sungai Progo, meliputi area hulu sungai (ICP 1), area permukiman di tepi barat sungai (ICP 2), area sekitar jembatan (ICP 3), hingga area hilir *groundsill* Srandakan (ICP 4), guna merepresentasikan akurasi model pada berbagai segmen sepanjang lokasi penelitian.



Gambar 3. Peta titik *Independent Check Point* (ICP)

Penggunaan satu titik GCP dalam penelitian ini memiliki keterbatasan dibandingkan praktik umum pemetaan fotogrametri UAV yang biasanya menggunakan jaringan GCP lebih padat untuk memperkuat kontrol

geometrik di seluruh area survei [12]. Keterbatasan jumlah GCP berpotensi menyebabkan koreksi geometrik kurang merata pada area yang jauh dari titik GCP tersebut, sehingga hasil uji akurasi pada keempat titik ICP menjadi acuan utama untuk menilai kelayakan model secara menyeluruh.

3.1.1 Uji Ketelitian Vertikal

Pengujian vertikal dilakukan dengan membandingkan nilai elevasi hasil pengukuran GNSS lapangan pada setiap titik ICP (Z ICP) terhadap nilai elevasi pada model *Orthomosaic* hasil pemrosesan UAV (Z Mosaik). Hasil pengukuran pada keempat titik uji disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Uji Ketelitian Vertikal Model DEM

NO	Nama Titik	Z ICP (m)	Z DEM (m)	ΔZ (m)	ΔZ^2 (m ²)
1	ICP 1	18	18,	0	0
2	ICP 2	19	19,006	-0,006	0
3	ICP 3	14	14,001	-0,001	0
4	ICP 4	10	10,080	-0,080	0,006
Jumlah					0,006
Rata-rata					0,002

Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) vertikal dihitung menggunakan persamaan berikut, sesuai formulasi yang diatur dalam Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 [15]:

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum(\Delta Z)^2}{n}} = \sqrt{\frac{0,006}{4}} = 0,04 \text{ meter}$$

Nilai ketelitian vertikal dengan tingkat kepercayaan 90% (LE90) kemudian dihitung menggunakan persamaan standar *US National Map Accuracy Standards* (NMAS) yang diadopsi dalam Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 [15]:

$$LE90 = 1,6499 \times RMSE_z$$

$$LE90 = 1,6499 \times 0,04$$

$$LE90 = 0,066 \text{ meter}$$

3.1.1 Uji Ketelitian Horizontal

Pengujian horizontal dilakukan dengan membandingkan koordinat X dan Y hasil pengukuran GNSS lapangan pada setiap titik ICP terhadap koordinat X dan Y pada model *Orthomosaic*. Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil uji ketelitian horizontal Model *Orthomosaic*

No	Nama Titik	ΔX (m)	ΔX^2 (m ²)	ΔY (m)	ΔY^2 (m ²)	$\Delta X^2 + \Delta Y^2$ (m ²)
1	ICP 1	-0,007	0,0000539	-0,038	0,001419	0,001472
2	ICP 2	0,053	0,002798	-0,017	0,000298	0,003096
3	ICP 3	0,003	0,0000121	-0,003	0,0000077	0,0000198
4	ICP 4	0,005	0,0000216	0,009	0,0000816	0,0001031
Jumlah						0,004691
Rata-rata						0,001173

Nilai RMSE horizontal dihitung menggunakan persamaan berikut, sesuai formulasi yang diatur dalam Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 [15]:

$$RMSE_r = \sqrt{\frac{\sum(\Delta X^2 + \Delta Y^2)}{n}}$$

$$RMSE_r = \sqrt{\frac{0,004691}{4}} = 0,034 \text{ meter}$$

Nilai ketelitian horizontal dengan tingkat kepercayaan 90% (CE90) kemudian dihitung dengan persamaan:

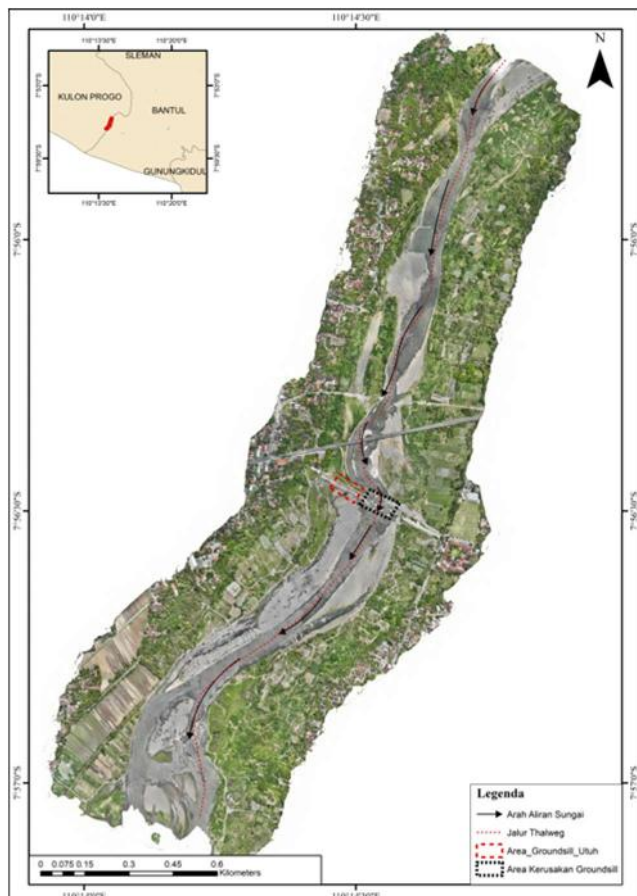
$$CE90 = 1,5175 \times RMSE_r$$

$$CE90 = 1,5175 \times 0,034$$

$$CE90 = 0,052 \text{ meter}$$

3.1.3 Evaluasi Kelas Ketelitian

Berdasarkan Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 6 Tahun 2018 Tentang Perubahan Atas Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 Tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar [18], skala peta terbesar dan kelas ketelitian tertinggi yang diatur adalah Peta Rupabumi Indonesia (RBI) skala 1:1.000 dengan ambang ketelitian Kelas 1 sebesar 0,2 meter untuk komponen horizontal maupun vertikal. Nilai CE90 sebesar 0,052 meter dan LE90 sebesar 0,066 meter pada penelitian ini berada di bawah ambang toleransi tersebut, sehingga model *Orthomosaic* dan *Digital Elevation Model* (DEM) yang dihasilkan dinyatakan memenuhi standar ketelitian geometri Kelas 1 dan layak dijadikan landasan kuantitatif untuk menganalisis dimensi gerusan sungai serta merumuskan langkah mitigasi teknis.



Gambar 4. Peta *Orthomosaic* area pasca-keruntuhan *groundsill*.

3.2 Evaluasi Topografi Eksisting Pascakeruntuhan

Ortomosaik dan DEM hasil pemrosesan UAV memperlihatkan perubahan morfologi yang jelas pada area *groundsill* Srandakan. Berdasarkan interpretasi visual pada

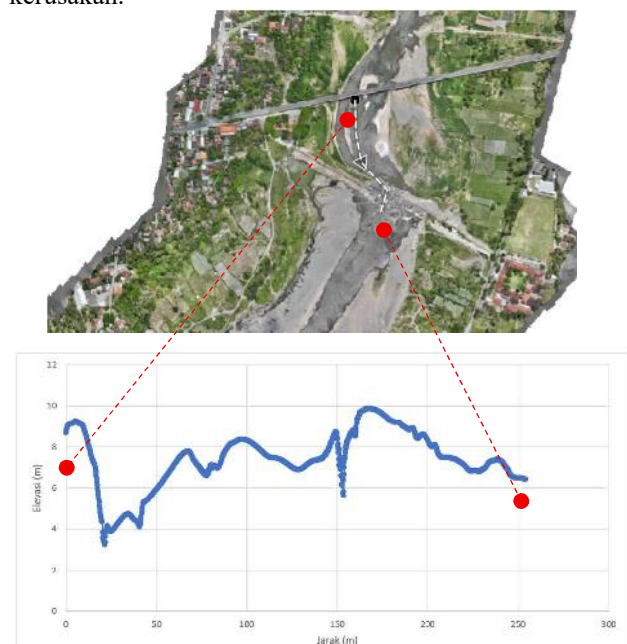
Gambar 4 tersebut, bagian tengah *groundsill* mengalami kerusakan dan membentuk celah terbuka yang menjadi jalur utama konsentrasi aliran. Sementara itu, bagian *groundsill* pada sisi kiri sungai masih tampak utuh dan dapat digunakan sebagai acuan visual untuk memahami perbedaan elevasi antara bagian yang masih stabil dan bagian yang telah mengalami gerusan.

Konsentrasi aliran pada celah tersebut sejalan dengan mekanisme *local scour*, yaitu penurunan dasar sungai di sekitar penghalang aliran akibat sistem pusaran (*vortex system*) yang terbentuk ketika aliran terhalang oleh struktur [6]. Pada kasus Srandakan, celah pada *groundsill* berperan serupa dengan penyempitan saluran yang mempercepat aliran lokal, sehingga energi yang sebelumnya terdistribusi merata kini terpusat pada satu lintasan dominan.

Kondisi ini juga sejalan dengan temuan bahwa keruntuhan sebagian struktur *groundsill* dapat memicu degradasi dasar sungai secara signifikan di bagian hilir. Ananta dkk. [4] mendokumentasikan kasus serupa pada sebuah bendung pada aliran sungai Winongo yang terletak di Yogyakarta runtuh akibat aliran yang terus-menerus melewati bagian bawah struktur, sehingga kekuatan struktur menurun dan degradasi dasar sungai meningkat tajam pascakeruntuhan. Pola ini konsisten dengan kondisi *groundsill* Srandakan, di mana hilangnya sebagian struktur pengontrol elevasi berpotensi mempercepat penurunan dasar sungai di titik-titik yang telah kehilangan fungsi kendalinya.

3.3 Analisis Penurunan Dasar Sungai dan Geometri Cekungan Gerusan

Penurunan dasar sungai dianalisis melalui ekstraksi penampang memanjang pada jalur *thalweg* di sekitar area *groundsill* yang runtuh. Karena data topografi sebelum keruntuhan tidak tersedia, penelitian ini menggunakan pendekatan rekonstruksi spasial. Elevasi bagian *groundsill* yang masih utuh digunakan sebagai garis referensi untuk memperkirakan elevasi dasar sungai sebelum terjadi kerusakan.



Gambar 5. Potongan Memanjang Pada *Thalweg*.

Hasil komparasi (*overlay*) antara garis *baseline* dengan profil elevasi eksisting dari DEM UAV, sebagaimana disajikan pada Gambar 5, menunjukkan adanya deviasi vertikal yang signifikan. Elevasi sedimen dasar sungai pada potongan memanjang jalur *thalweg* teridentifikasi mencapai titik terdalam pada angka 3,23 meter. Dasar sungai telah mengalami degradasi vertikal (penurunan) sedalam 7,12 meter dari elevasi referensinya yaitu 10,35 meter.

Besarnya penurunan elevasi yang teramati konsisten dengan pola degradasi dasar sungai akibat kerusakan struktur pengontrol elevasi yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya. Nilai ini memperkuat interpretasi bahwa hilangnya sebagian struktur *groundsill* Srandakan berkontribusi langsung terhadap besarnya penurunan dasar sungai yang teramati pada jalur *thalweg*.

Secara morfologis, hilangnya fungsi pengontrol elevasi pada *groundsill* menyebabkan dasar sungai lebih rentan mengalami degradasi lokal. Cekungan gerusan yang terbentuk pada area jebolan dapat memperbesar perbedaan elevasi dasar sungai antara bagian hulu dan hilir, sehingga meningkatkan potensi rambatan erosi ke arah hulu.

3.4 Pemetaan Rambatan Erosi Mudik terhadap Jembatan Srandakan Baru

Profil penampang memanjang yang mengikuti jalur *thalweg* menunjukkan adanya cekungan gerusan di antara area *groundsill* yang runtuh dan pilar Jembatan Srandakan Baru. Berdasarkan interpretasi spasial pada Gambar 5, jalur gerusan teridentifikasi memanjang sekitar 250 m dari area *groundsill* menuju bagian hulu. Pola ini mengindikasikan potensi rambatan erosi mudik (*headward erosion*) yang perlu mendapat perhatian karena posisinya mengarah ke area pilar jembatan. Fenomena serupa didokumentasikan pada studi evolusi morfologi sungai di Taiwan, di mana migrasi titik patahan (*knickpoint*) akibat obstruksi struktur bangunan air menyebabkan degradasi dasar sungai yang terus-menerus di bagian hilir hingga merambat ke arah hulu [19].

Berdasarkan posisi jalur *thalweg* dan distribusi cekungan gerusan yang disajikan pada Gambar 6, Pilar 5, 6, 7, dan 8 Jembatan Srandakan Baru merupakan elemen yang perlu diprioritaskan dalam pemantauan. Elevasi pada titik Pilar 5, 6, 7, dan 8 dibandingkan dengan elevasi *baseline* pada titik acuan 370 m dari Pilar 6, yaitu 10,55 m. Hasilnya disajikan pada Tabel 3.

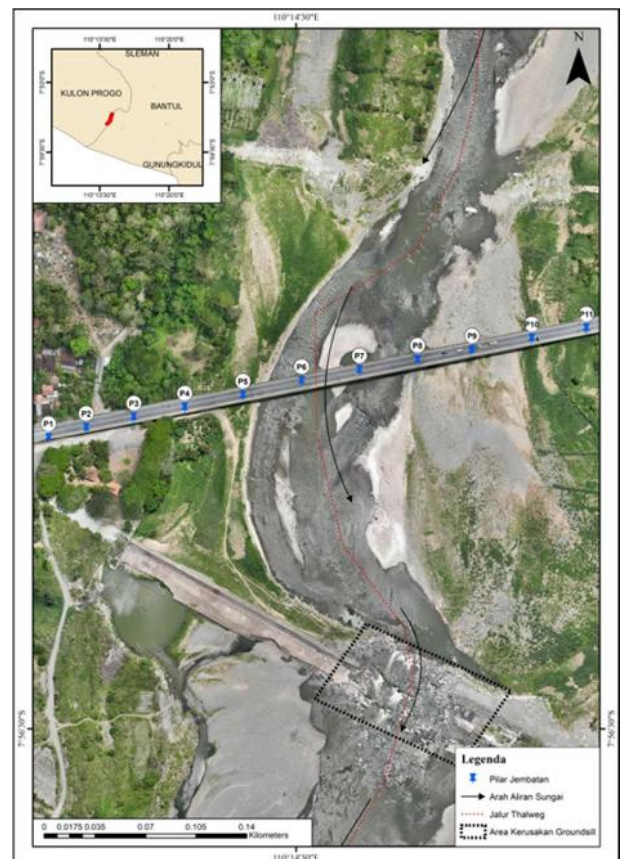
Tabel 3. Klasifikasi risiko relatif Pilar 5 sampai dengan Pilar 8 Jembatan Srandakan Baru

Pilar	Elevasi <i>baseline</i> (m)	Elevasi terukur (m)	Perubahan elevasi lokal (m)	Jarak ke titik gerusan terdalam (m)	Kategori risiko
5	10.55	12.5	1.95	167	Tidak dapat diklasifikasikan (indikator tidak berlaku)
6	10.55	8.32	-2.23	151	Risiko tinggi
7	10.55	8.84	-1.71	155	Risiko sedang
8	10.55	10.1	-0.45	180	Risiko sedang-rendah

Pilar 6 berada paling dekat dengan titik gerusan terdalam, hanya berjarak 151 m, dan elevasinya turun paling dalam yaitu 2,23 m dari *baseline*. Pilar ini masuk kategori risiko tinggi. Pilar 7 berjarak 155 m dari titik gerusan terdalam dengan penurunan elevasi 1,71 m, masuk kategori risiko sedang. Pilar 8 paling jauh dari titik gerusan, mencapai 180 m, dan elevasinya hanya turun 0,45 m sehingga masuk kategori sedang-rendah. Polanya jelas: makin jauh dari titik gerusan terdalam, penurunan elevasi makin kecil.

Pilar 5 berbeda sendiri. Elevasinya justru naik 1,95 m dari *baseline*, bukan turun. Ini bukan karena pilar tersebut aman dari gerusan, tapi karena titik pengukurannya berada di tepi alur aktif, bukan di dasar sungai seperti tiga pilar lainnya. Elevasi yang terukur mencerminkan permukaan bantaran, sehingga angkanya tidak bisa dibandingkan langsung dengan Pilar 6, 7, dan 8.

Kondisi ini tidak berarti Pilar 5 bebas risiko. Posisinya yang menempel di tepi alur aktif tetap membuatnya rentan terhadap gerusan tepi, yang dalam istilah teknis disebut bank erosion. Fenomena ini tidak terekam oleh indikator penurunan elevasi vertikal pada penelitian ini. Aspek ini perlu dipertimbangkan dalam evaluasi risiko struktural jangka panjang meski berada di luar cakupan metode kuantitatif yang dipakai.



Gambar 6. Pilar 5, 6, 7 dan 8 pada Jembatan Srandakan Baru yang terancam rambatan erosi mudik

Jika proses gerusan berlanjut, pengurangan sedimen penahan di sekitar fondasi dapat meningkatkan risiko terbukanya fondasi pilar dan menurunkan stabilitas pilar, sebagaimana ditunjukkan pada kajian literatur gerusan fondasi jembatan bahwa kategori risiko tinggi ditentukan ketika kedalaman gerusan melampaui kedalaman fondasi

yang tertanam [20]. Kondisi ini perlu diinterpretasikan sebagai indikasi risiko awal yang memerlukan verifikasi lanjutan melalui inspeksi struktur dan analisis hidraulik.

3.5 Rekomendasi Langkah Mitigasi

Berdasarkan hasil analisis DEM dan penampang memanjang, mitigasi awal perlu diarahkan pada pengendalian jalur *thalweg* di area *groundsill* yang runtuh dan perlindungan pilar jembatan yang berpotensi terdampak. Penutupan celah pada area *groundsill* dapat dipertimbangkan untuk mengurangi konsentrasi aliran dan membantu mengembalikan fungsi pengontrol elevasi dasar sungai. Alternatif awal yang dapat dikaji meliputi pengisian kembali dengan material batu besar, pemasangan bronjong, atau proteksi *riprap* pada zona yang mengalami gerusan. Pendekatan ini sejalan dengan rekomendasi mitigasi gerusan pada studi pilar jembatan lain, yang menunjukkan bahwa kombinasi *riprap* dan bronjong efektif menekan kedalaman gerusan pada area terdampak [16]. Alternatif ini perlu diprioritaskan untuk dikaji dalam desain teknis lanjutan, bukan sebagai keputusan konstruksi final.

Selain penanganan pada area *groundsill*, proteksi gerusan di sekitar Pilar 5, 6, 7, dan 8 perlu menjadi prioritas pemantauan dan evaluasi teknis. Berdasarkan klasifikasi risiko pada Tabel 3, penanganan diprioritaskan pada pilar dengan kategori risiko tinggi terlebih dahulu, sementara pilar dengan kategori risiko sedang dan rendah dapat ditindaklanjuti melalui pemantauan berkala tanpa intervensi struktural segera. Pemantauan berkala terhadap elevasi dasar sungai, posisi *thalweg*, dan kondisi fondasi pilar diperlukan untuk mendeteksi perubahan morfologi setelah kejadian. Rekomendasi ini bersifat awal dan harus ditindaklanjuti dengan analisis hidraulik, geoteknik, dan desain struktur sebelum dilaksanakan sebagai pekerjaan konstruksi.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menjawab tiga tujuan yang dirumuskan di awal. Pertama, evaluasi kerusakan geometris *groundsill* Srandakan menunjukkan bahwa integrasi survei UAV, kontrol GNSS, dan analisis DEM berbasis QGIS mampu mengidentifikasi elevasi dasar sungai terendah sebesar 3,23 m, atau mengalami penurunan 7,12 m terhadap elevasi referensi 10,35 m pada bagian *groundsill* yang masih utuh. Uji akurasi menunjukkan nilai CE90 sebesar 0,052 m dan LE90 sebesar 0,066 m, memenuhi standar Kelas 1 berdasarkan Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 6 Tahun 2018 Tentang Perubahan Atas Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 Tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar, sehingga data spasial yang dihasilkan layak digunakan sebagai dasar analisis lebih lanjut.

Kedua, identifikasi penurunan elevasi dasar sungai dan arah rambatan erosi mudik menunjukkan bahwa degradasi dasar sungai merambat sejauh kurang lebih 250 m dari area keruntuhan *groundsill* menuju Jembatan Srandakan Baru, mengancam stabilitas Pilar 5, 6, 7, dan 8 melalui berkurangnya selimut tanah penahan pondasi dan meningkatnya risiko fondasi terbuka. Klasifikasi risiko relatif antarpilar menunjukkan Pilar 6 berada pada kategori

risiko tertinggi, dengan jarak terdekat terhadap titik gerusan terdalam dan penurunan elevasi lokal terbesar, diikuti Pilar 7 pada kategori sedang dan Pilar 8 pada kategori sedang-rendah. Pilar 5 tidak dapat diklasifikasikan dengan indikator penurunan elevasi vertikal pada penelitian ini karena posisinya di tepi alur aktif, namun tetap berpotensi terpapar risiko gerusan tepi yang memerlukan perhatian terpisah.

Ketiga, berdasarkan temuan tersebut, dirumuskan rekomendasi mitigasi awal yang meliputi penutupan celah *thalweg* melalui pengisian kembali atau pemasangan bronjong, proteksi gerusan yang diprioritaskan pada pilar berkategori risiko tinggi, serta pemantauan berkala terhadap perubahan elevasi dasar sungai. Rekomendasi ini bersifat awal dan disusun sebagai dasar pendukung pengambilan keputusan, bukan sebagai keputusan konstruksi final. Implementasi di lapangan tetap memerlukan kajian lanjutan berupa analisis hidraulik, analisis geoteknik, dan desain struktur pengendali dasar sungai sebelum diterapkan dalam pekerjaan konstruksi.

Daftar Pustaka

- [1] R. Saputra, J. Ikhsan, and H. Prayuda, "Pengaruh Penambangan Pasir Terhadap Laju Degradasi Agradasi Dasar Sungai Progo", *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, vol. 1, no. 2, pp. 109–120, 2021. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v1i2.24>
- [2] P. Harsanto, A.R. Habibullah, and B.K. Wisnulingga, "Analysis of Riverbed Degradation and Aggradation with Toffaleti, Ackers-White, and Yang Equations," *AIP Conference Proceedings*, p. 090006, 2025. <https://doi.org/10.1063/5.0279121>.
- [3] N.R. Muhamad, D. Sisinggih, and L. Prasetyorini, "Pemodelan Hidraulik Daya Rusak Air Sungai Konto Hilir Menggunakan HEC-RAS 6.2", *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air*, vol. 5, no. 2, pp. 1141–1154, 2025. <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2025.005.02.109>
- [4] Q. Ananta, S.B. Lesmana, and P. Harsanto, "Pengaruh *Groundsill* Pada Degradasi dan Agradasi Dasar Sungai Winongo (Studi Kasus Simulasi dengan Sedimen D50)", *Jurnal Rekonstruksi dan Manajemen Bencana*, vol. 4, no. 2, pp. 87–98, 2023. <https://doi.org/10.22487/renstra.v4i2.583>
- [5] S. Wahyuni, A. Rachmadi, Harianto, and M.R. Devianto, "Strategi Penanganan Darurat *Groundsill* Srandakan Dengan Integrasi Model Numerik Dan Metode Analitis Shields-Izbash", *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, vol. 5, no. 2, pp. 173–184, 2025. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v5i2.160>
- [6] I. Rauf, A. Gaus, Imran, and S. Jaelan, "Eksperimen Laboratorium Pengaruh Hidung Pilar Jembatan Terhadap Kedalaman Gerusan Lokal Setimbang", *Terakreditasi Jurnal Teknik Sipil*, vol. 13, no. 2, pp. 313–323, 2023. <https://doi.org/10.29103/tj.v13i2.872>
- [7] A. Baharuddin, N. Karim, M.Y. Ali, and S. Latif, "Investigasi Eksperimental Pengendalian Gerusan Pilar Jembatan Menggunakan Deflektor Arus Bawah Air Berpori", *Green Complex Engineering Journal*,

- vol. 3, no. 2, 2026. <https://doi.org/10.59810/greenplexresearch.v3i2.246>
- [8] E.B. Ginting, R. Haribowo, and A. P. Hendrawan, "Studi Perbandingan Perhitungan Volume Galian dan Timbunan Menggunakan Data Total Station dan Drone (UAV)", *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air*, vol. 4, no. 1, pp. 616–625, 2024. <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2024.004.01.052>
- [9] A. Adiputra, S. Dahlia, Alwi, and W. Al Hakim, "Kaji Cepat Dampak Bencana Gempa Bumi Cianjur Berbasis Unmanned Aerial Vehicle (UAV)", *Jurnal Geografi, Edukasi dan Lingkungan*, vol. 8, no. 1, pp. 83–93, 2024. <https://doi.org/10.22236/jgel.v8i1.14291>
- [10] G. Duró, A. Crosato, M. G. Kleinhans, and W. S. J. Uijtewaal, "Bank Erosion Processes Measured with UAV-SfM along Complex Banklines of a Straight Mid-Sized River Reach", *Earth Surface Dynamics*, vol. 6, no. 4, pp. 933–953, 2018. <https://doi.org/10.5194/esurf-6-933-2018>
- [11] A.A. Ahmad, Y.L. Sidabutar, and A.S. Herwieany, "Komparasi Produktivitas Dan Akurasi Pesawat Udara Nirawak Untuk Survei Fotogrametri Pada Proyek Jalan (Comparison of Productivity and Accuracy of Unmanned Aerial Vehicles for Photogrammetry Surveys on Road Projects)", *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, vol. 41, no. 1, pp. 1–14, 2024. <https://doi.org/10.58499/jatan.v41i1.1283>
- [12] I.P.H. Prayogo, F.J. Manoppo, and L.I.R. Lefrandt, "Pemanfaatan Teknologi Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Quadcopter Dalam Pemetaan Digital (Fotogrametri) Menggunakan Kerangka Ground Control Point (GCP)", *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, vol. 10, no. 1, 2020. <https://ejournal.unsrat.ac.id/v2/index.php/jime/article/view/29422>
- [13] Y.N. Pranata and A.B. Cahyono, "Evaluasi Metode Aerial Videogrametri untuk Rekonstruksi 3D Bangunan (Studi Kasus: Candi Singasari, Jawa Timur)", *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, 2016. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.17375>
- [14] M. Isbahuddin, M.A. Setiawan, and M. Widyastuti, "Pemetaan Geomorfologi Detail untuk Analisis Karakteristik Erosi Tebing Sungai pada Sebagian Penggal Sungai Oyo, Kabupaten Bantul, Provinsi DIY", *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 22, no. 4, pp. 1017–1023, 2024. <https://doi.org/10.14710/jil.22.4.1017-1023>
- [15] Badan Informasi Geospasial, *Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar*. Cibinong, Indonesia, 2014
- [16] R.S. Karuru, M.B. Allo, and N.V. Verucha, "Analisis Upaya Mitigasi Dampak Gerusan (Scouring) Aliran Sungai terhadap Struktur Pilar Jembatan", *Civil Engineering Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 381–391, 2025. <https://doi.org/10.52722/ctlyj152>
- [17] H. Zhang, E. Aldana-Jague, F. Clapuyt, F. Wilken, V. Vanacker, and K. Van Oost, "Evaluating the Potential of Post-Processing Kinematic (PPK) Georeferencing for UAV-Based Structure-from-Motion (SfM) Photogrammetry and Surface Change Detection", *Earth Surface Dynamics*, vol. 7, no. 4, pp. 807–827, 2019. <https://doi.org/10.5194/esurf-7-807-2019>
- [18] Badan Informasi Geospasial, *Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 6 Tahun 2018 tentang Perubahan atas Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar*. Indonesia, 2018
- [19] H. Chen, Y. Chiu, C. Cheng, and S. Chen, "Knickpoints and Fixed Points: The Evolution of Fluvial Morphology under the Combined Effect of Fault Uplift and Dam Obstruction on a Soft Bedrock River", *Earth Surface Dynamics*, vol. 12, pp. 1329–1346, 2024. <https://doi.org/10.5194/esurf-12-1329-2024>
- [20] A. Pizarro, S. Manfreda, and E. Tubaldi, "The Science behind Scour at Bridge Foundations: A Review", *Water*, vol. 12, no. 2, p. 374, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12020374>

This page is intentionally left blank