

Analisis Kerentanan Longsor dan Perencanaan Mitigasi Geoteknik pada Akses Jalan Jalan Merdeka - Damai, Samarinda, Kalimantan Timur.

**Alif Bintang Ghifaari ^{1)*}, Muhammad Rizqy Septyandy ¹⁾, Muhammad Daffa Aqilla ¹⁾,
Zessiva Isma Putri ¹⁾, Daffa Aditya Pramana ¹⁾**

¹⁾ Fakultas Teknik /Program Studi Teknik Geologi, Universitas Mulawarman

E-mail: bintang3112003@gmail.com

ABSTRAK

Kawasan akses Jalan Merdeka–Damai, Kota Samarinda, Kalimantan Timur, merupakan daerah dengan tingkat kejadian longsor yang tinggi akibat kondisi morfologi berupa lereng curam, litologi dominan batulempung, serta perubahan tutupan lahan yang intensif. Penelitian ini bertujuan untuk menilai tingkat kerentanan longsor dan merumuskan strategi mitigasi geoteknik yang efektif dan berbasis prioritas risiko. Analisis kerentanan dilakukan menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) berbasis Sistem Informasi Geografis dengan mempertimbangkan parameter kemiringan lereng, tutupan lahan, litologi, dan curah hujan. Selanjutnya, empat lokasi kritis dianalisis lebih rinci melalui pemodelan stabilitas lereng menggunakan perangkat lunak *Slide* untuk memperoleh nilai *Factor of Safety* (FK) dan karakteristik bidang longsor. Hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian besar area penelitian berada pada kelas rawan hingga sangat rawan longsor, dengan nilai FK awal < 1 yang mengindikasikan kondisi lereng tidak stabil. Berdasarkan karakteristik geoteknik dan hasil simulasi, dirancang beberapa alternatif mitigasi teknis berupa kombinasi *soil nailing*, *retaining wall*, *wiremesh*, dan *shotcrete* yang disesuaikan dengan kondisi tiap lokasi. Penerapan skenario mitigasi menunjukkan peningkatan kestabilan lereng yang signifikan, dengan nilai FK pasca-mitigasi melebihi 1,3. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa pendekatan integratif antara analisis kerentanan dan pemodelan geoteknik mampu menghasilkan rekomendasi mitigasi yang aplikatif, serta dapat menjadi dasar perencanaan infrastruktur jalan yang lebih aman dan berkelanjutan di wilayah perkotaan rawan longsor.

Kata Kunci: kerentanan longsor, mitigasi geoteknik, *Analytical Hierarchy Process*, stabilitas lereng

ABSTRACT

The Merdeka–Damai road corridor in Samarinda City, East Kalimantan, is highly prone to landslides due to steep slope morphology, dominant claystone lithology, and intensive land-use changes. This study aims to assess landslide susceptibility and to develop effective geotechnical mitigation strategies based on risk prioritization. Landslide susceptibility was evaluated using a Geographic Information System–based Analytical Hierarchy Process (AHP) by integrating slope gradient, land cover, lithology, and rainfall parameters. Furthermore, four critical locations were analyzed in detail through slope stability modeling using the Slide software to determine the Factor of Safety (FS) and failure mechanisms. The results indicate that most of the study area falls within high to very high susceptibility classes, with initial FS values below 1, reflecting unstable slope conditions. Based on geotechnical characteristics and simulation outcomes, site-specific mitigation measures were designed, including combinations of soil nailing, retaining walls, wiremesh, and shotcrete. The proposed mitigation scenarios significantly improve slope stability, increasing FS values to greater than 1.3. Overall, this study demonstrates that an integrated approach combining susceptibility analysis and geotechnical modeling provides practical and reliable mitigation recommendations, and can serve as a scientific basis for safer and more sustainable road infrastructure planning in landslide-prone urban areas.

Keyword: landslide susceptibility, geotechnical mitigation, Analytical Hierarchy Process, slope stability

1. Pendahuluan

A. Latar Belakang

Tanah longsor merupakan salah satu bentuk gerakan massa yang sering terjadi pada wilayah dengan kemiringan lereng curam dan intensitas curah hujan tinggi. Kejadian ini tidak hanya menyebabkan kerusakan lingkungan fisik, tetapi juga berdampak langsung terhadap infrastruktur, khususnya jaringan transportasi, serta berpotensi mengancam keselamatan masyarakat di sekitarnya. Dalam kajian geoteknik, kestabilan lereng umumnya dievaluasi menggunakan nilai Factor of Safety (FK), yaitu perbandingan antara gaya penahan terhadap gaya penggerak pada suatu lereng. Nilai FK yang rendah menunjukkan kondisi lereng yang tidak stabil dan memiliki potensi mengalami kegagalan (Duncan & Wright, 2005).

Selain faktor geometri lereng, sifat material penyusun juga sangat menentukan tingkat kestabilan. Parameter seperti kohesi, sudut geser dalam, serta tingkat pelapukan material berperan langsung dalam menentukan kekuatan geser tanah atau batuan. Keberadaan rekahan dan zona lemah juga dapat mempercepat penurunan kekuatan material, terutama ketika terisi air, sehingga meningkatkan potensi terjadinya longsor (Amin Syam et al., 2021).

Secara geologi, wilayah Samarinda termasuk dalam bagian dari Cekungan Kutai yang didominasi oleh litologi sedimen seperti batulempung dan batupasir. Material ini umumnya telah mengalami pelapukan intensif, sehingga memiliki sifat mekanik yang relatif lemah, khususnya saat kondisi jenuh air. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa rekahan dan bidang diskontinuitas pada batuan dapat berperan sebagai jalur infiltrasi air sekaligus berkembang menjadi bidang gelincir potensial (Amin Syam & Putri, 2022). Kondisi ini menyebabkan lereng menjadi semakin rentan terhadap ketidakstabilan, terutama pada musim hujan ketika tekanan air pori meningkat secara signifikan.

Dalam beberapa tahun terakhir, pendekatan berbasis spasial menggunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP) yang dikombinasikan dengan Sistem Informasi Geografis (SIG) banyak digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kerentanan longsor. Metode ini memungkinkan integrasi berbagai parameter pengontrol, seperti kemiringan lereng, litologi, curah hujan, dan penggunaan lahan, ke dalam suatu model zonasi kerentanan yang sistematis (Saaty, 2008). Studi di wilayah Kalimantan Timur menunjukkan bahwa parameter-parameter tersebut memiliki kontribusi signifikan dalam menentukan tingkat bahaya longsor pada suatu daerah (Umar et al., 2021).

Di sisi lain, perubahan tata guna lahan yang tidak mempertimbangkan kondisi geologi dan geoteknik juga dapat memperburuk kerentanan suatu wilayah terhadap longsor. Aktivitas pembukaan lahan, pemotongan lereng, serta minimnya vegetasi penutup seringkali menyebabkan berkurangnya stabilitas lereng secara alami (Putri et al., 2020). Oleh karena itu, analisis berbasis spasial perlu diintegrasikan dengan analisis geoteknik agar dapat memberikan gambaran kondisi lereng yang lebih komprehensif.

Akses Jalan Merdeka–Damai di Kota Samarinda merupakan salah satu ruas jalan yang diduga memiliki tingkat kerentanan longsor yang cukup tinggi. Berdasarkan kajian awal, lereng pada lokasi ini memiliki kemiringan berkisar antara 57° hingga 72° , yang secara geoteknik tergolong sangat curam dan berpotensi tidak stabil. Selain itu, curah hujan yang tinggi di wilayah Samarinda berkontribusi terhadap peningkatan kejenuhan tanah, sehingga menurunkan kekuatan geser material penyusun lereng (Heriyanto et al., 2020). Dominasi batulempung yang mudah melunak serta terbatasnya vegetasi penutup semakin memperbesar potensi terjadinya longsor di area ini (Umar et al., 2021).

Beban tambahan dari aktivitas kendaraan pada badan jalan juga menjadi faktor eksternal yang dapat mempercepat terjadinya kegagalan lereng. Kondisi ini menunjukkan bahwa permasalahan longsor di ruas Jalan Merdeka–Damai tidak hanya dipengaruhi oleh faktor alami, tetapi juga oleh aktivitas manusia yang berlangsung di atasnya.

Namun demikian, upaya penanganan longsor yang dilakukan selama ini umumnya masih bersifat reaktif dan belum didasarkan pada analisis yang terintegrasi. Beberapa penelitian sebelumnya cenderung hanya

menggunakan satu pendekatan, baik spasial maupun geoteknik, sehingga belum mampu menggambarkan kondisi lereng secara menyeluruh (Amin Syam et al., 2021). Padahal, dalam perencanaan mitigasi yang efektif, diperlukan pendekatan yang menggabungkan analisis permukaan, kondisi bawah permukaan, serta aspek mekanika tanah dan batuan (Highland & Bobrowsky, 2008).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis tingkat kerentanan longsor serta mengevaluasi kestabilan lereng secara terpadu pada ruas Jalan Merdeka–Damai, Samarinda. Analisis kerentanan dilakukan menggunakan metode AHP berbasis SIG, sedangkan analisis kestabilan lereng dilakukan dengan bantuan perangkat lunak geoteknik untuk memperoleh nilai Factor of Safety. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran kondisi lereng secara lebih komprehensif serta menjadi dasar dalam perencanaan mitigasi geoteknik yang lebih efektif dan tepat sasaran.

B. Tinjauan Pustaka

Tanah longsor merupakan salah satu bentuk gerakan massa yang terjadi akibat ketidakseimbangan antara gaya penahan dan gaya penggerak pada suatu lereng. Fenomena ini umumnya dipengaruhi oleh kondisi topografi, litologi, serta faktor eksternal seperti curah hujan dan aktivitas manusia. Dalam klasifikasi yang telah diperbarui, longsor dibedakan menjadi beberapa jenis utama, antara lain fall, topple, slide, spread, dan flow, yang masing-masing memiliki karakteristik pergerakan dan mekanisme kegagalan yang berbeda (Hung et al., 2014). Pemahaman terhadap jenis longsor menjadi penting karena setiap tipe memiliki pola bidang gelincir serta pendekatan mitigasi yang tidak sama.

Kerentanan longsor pada suatu wilayah pada dasarnya merupakan representasi dari tingkat kemungkinan terjadinya longsor berdasarkan kondisi fisik dan lingkungan setempat. Pendekatan berbasis spasial banyak digunakan untuk memetakan kerentanan ini karena mampu mengintegrasikan berbagai parameter dalam satu sistem analisis. Reichenbach et al. (2018) menjelaskan bahwa pemodelan kerentanan longsor berbasis parameter fisik dan statistik merupakan metode yang efektif dalam mengidentifikasi zona rawan longsor. Salah satu metode yang umum digunakan adalah Analytical Hierarchy Process (AHP), yaitu metode pengambilan keputusan berbasis perbandingan berpasangan untuk menentukan bobot dari masing-masing parameter (Saaty, 2008).

Dalam penerapannya pada studi longsor, parameter yang sering digunakan dalam metode AHP meliputi kemiringan lereng, jenis litologi, curah hujan, penggunaan lahan, serta kondisi tanah. Parameter kemiringan lereng biasanya menjadi faktor dominan karena berkaitan langsung dengan gaya penggerak, sedangkan litologi dan jenis tanah berpengaruh terhadap kekuatan material penyusun lereng. Studi di Kalimantan Timur menunjukkan bahwa kombinasi parameter tersebut mampu menghasilkan zonasi kerentanan longsor yang cukup representatif terhadap kondisi lapangan (Umar et al., 2019). Selain itu, perubahan penggunaan lahan juga berperan dalam meningkatkan kerentanan, terutama pada area yang mengalami pembukaan lahan tanpa mempertimbangkan kestabilan lereng (Putri et al., 2020).

Dari sisi geoteknik, kestabilan lereng sangat dipengaruhi oleh parameter kekuatan geser tanah atau batuan, yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Kedua parameter ini mencerminkan kemampuan material dalam menahan gaya geser yang bekerja pada bidang gelincir. Penelitian menunjukkan bahwa penurunan nilai kohesi dan sudut geser dalam akan menyebabkan penurunan kekuatan geser, sehingga meningkatkan potensi kegagalan lereng (Komadja et al., 2021). Kondisi ini sering terjadi pada material yang telah mengalami pelapukan atau jenuh air, seperti batulempung di daerah tropis.

Kestabilan lereng umumnya dinyatakan dalam bentuk nilai factor of safety (FK), yang merupakan perbandingan antara gaya penahan dan gaya penggerak. Duncan dan Wright (2005) menjelaskan bahwa lereng dikatakan stabil apabila nilai FK lebih besar dari satu, sedangkan nilai di bawah satu menunjukkan kondisi tidak stabil. Namun demikian, interpretasi nilai FK juga bergantung pada metode analisis yang digunakan, baik itu metode keseimbangan batas maupun pendekatan numerik (Xiao et al., 2024). Oleh karena itu, analisis kestabilan lereng perlu mempertimbangkan kondisi geometri lereng, sifat material, serta keberadaan air tanah.

Penggunaan perangkat lunak geoteknik seperti Slide2 banyak dilakukan dalam analisis kestabilan lereng karena mampu memodelkan berbagai kondisi lereng secara lebih kompleks. Perangkat lunak ini memungkinkan pencarian bidang gelincir kritis dengan nilai FK terendah, serta dapat mengakomodasi pengaruh tekanan air pori terhadap stabilitas lereng (Rocscience, 2021). Dalam konteks lokal, penelitian di Samarinda menunjukkan bahwa analisis kestabilan lereng menggunakan metode Bishop Simplified dapat memberikan gambaran kondisi lereng yang cukup representatif, terutama pada lereng dengan geometri sederhana (Heriyanto et al., 2019).

Selain analisis kerentanan dan kestabilan, upaya mitigasi geoteknik menjadi bagian penting dalam pengelolaan risiko longsor. Salah satu metode yang umum digunakan adalah soil nailing, yaitu teknik perkuatan lereng dengan memasukkan batang baja ke dalam massa tanah untuk meningkatkan kekuatan geser dan mengurangi deformasi. Studi menunjukkan bahwa penerapan soil nailing mampu meningkatkan nilai faktor keamanan secara signifikan, sehingga lereng yang semula tidak stabil dapat menjadi stabil (Situmorang et al., 2025).

Metode lain yang sering digunakan adalah retaining wall atau dinding penahan tanah, yang berfungsi untuk menahan tekanan lateral tanah pada lereng. Penggunaan retaining wall umumnya diterapkan pada area dengan keterbatasan ruang atau pada lereng yang berada di sekitar infrastruktur jalan. Penelitian menunjukkan bahwa desain retaining wall yang tepat dapat meningkatkan kestabilan lereng hingga memenuhi standar keamanan yang ditetapkan (Shiddiq et al., 2024). Namun demikian, efektivitas metode ini sangat bergantung pada kondisi tanah, beban yang bekerja, serta sistem drainase yang digunakan.

Di wilayah Kalimantan Timur, beberapa penelitian telah dilakukan terkait analisis longsor dan kestabilan lereng. Umar et al. (2019) melakukan analisis bahaya longsor menggunakan metode AHP di Muara Badak, sedangkan Amin Syam et al. (2020) meneliti kekuatan massa batuan menggunakan kriteria Hoek-Brown di Samarinda. Selain itu, Heriyanto et al. (2019) menganalisis kestabilan lereng dengan metode Bishop Simplified, dan Sandrianti et al. (2024) menggunakan metode Rock Mass Rating (RMR) untuk menentukan kondisi kestabilan lereng di Kutai Timur.

Meskipun penelitian-penelitian tersebut telah memberikan kontribusi penting dalam memahami kondisi longsor di Kalimantan Timur, sebagian besar masih menggunakan pendekatan yang terpisah antara analisis spasial dan analisis geoteknik. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan yang mengintegrasikan keduanya agar diperoleh gambaran kondisi lereng yang lebih komprehensif. Pendekatan terintegrasi ini diharapkan mampu menghasilkan rekomendasi mitigasi yang lebih efektif, khususnya pada wilayah dengan aktivitas transportasi tinggi seperti ruas Jalan Merdeka–Damai di Kota Samarinda.

C. Kebaruan (Gap Penelitian)

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi metodologi AHP–GIS dengan pemodelan stabilitas lereng menggunakan software Slide untuk merancang perencanaan teknis mitigasi yang spesifik pada setiap titik longsor. Berbeda dari penelitian terdahulu yang umumnya berhenti pada peta kerentanan, penelitian ini tidak hanya mengidentifikasi zona rawan, tetapi juga melakukan analisis Factor of Safety (FK) secara numerik. Selain itu, dilakukan simulasi peningkatan kestabilan lereng akibat penerapan rekayasa geoteknik seperti soil nailing, retaining wall, wiremesh, dan shotcrete sehingga diperoleh gambaran kondisi sebelum dan sesudah mitigasi.

Penelitian ini juga menghasilkan estimasi efektivitas mitigasi dalam bentuk persentase peningkatan nilai FK, yang dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan prioritas penanganan dan pemilihan metode yang paling optimal. Dengan adanya pendekatan ini, rekomendasi yang dihasilkan tidak hanya bersifat umum, tetapi lebih terukur dan aplikatif dalam konteks perencanaan teknis di lapangan.

Selain itu, penelitian ini menekankan pendekatan berbasis kondisi lokal dengan mempertimbangkan karakteristik geologi dan geoteknik wilayah Samarinda yang didominasi material sedimen yang relatif lemah dan rentan terhadap kejenuhan air. Parameter penting seperti kohesi, sudut geser dalam, serta pengaruh tekanan air pori diintegrasikan ke dalam pemodelan numerik sehingga analisis yang dihasilkan lebih representatif terhadap kondisi sebenarnya. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi yang

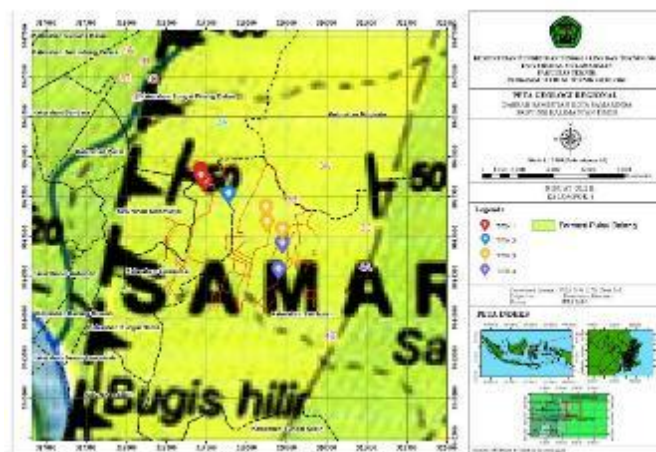
lebih komprehensif dalam menjembatani analisis spasial dan geoteknik serta menghasilkan strategi mitigasi longsor yang lebih efektif dan berkelanjutan.

D. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis tingkat kerentanan longsor pada akses Jalan Merdeka–Damai menggunakan metode AHP berbasis SIG melalui integrasi parameter fisik dan lingkungan.
2. Menganalisis stabilitas lereng secara geoteknik berdasarkan hasil simulasi nilai Factor of Safety menggunakan perangkat lunak Slide.
3. Merancang rekomendasi mitigasi teknis yang efektif dan sesuai kondisi lapangan melalui penerapan soil nailing, retaining wall, wiremesh, dan shotcrete.
4. Menilai efektivitas mitigasi secara kuantitatif melalui simulasi peningkatan FK dan menentukan prioritas implementasi berdasarkan tingkat risiko..

2. Geologi Daerah Penelitian



Gambar 2.1 Geologi Regional Daerah Penelitian

Daerah penelitian terletak pada wilayah Kelurahan Sidodamai, Sambutan, dan Sungai Pinang Dalam, Kota Samarinda, Provinsi Kalimantan Timur, dengan sistem koordinat WGS 84 / UTM Zona 50S. Berdasarkan Peta Geologi Regional Skala 1:7.500, daerah penelitian tersusun atas satuan batuan sedimen Formasi Pulau Balang (Miosen Awal–Tengah), yang ditandai dengan warna kuning–hijau pada peta. Formasi ini berkembang luas pada bagian tengah dan timur wilayah penelitian, dan menjadi satuan batuan dominan yang dikontrol oleh proses sedimentasi fluvial–deltaik pada masa pengendapan (satyana et al,1999).

3. Metode Penelitian

Penelitian ini dirancang untuk menganalisis kerentanan longsor dan merancang mitigasi geoteknik pada akses Jalan Kuburan Cina, Samarinda, Kalimantan Timur. Pendekatan penelitian bersifat integratif, memadukan analisis spasial berbasis SIG, perhitungan stabilitas lereng secara geoteknik, serta evaluasi kelayakan teknis dan biaya. Alur penelitian dibagi menjadi empat tahap utama, dimulai dari pengumpulan data, analisis kerentanan, analisis geoteknik, hingga perencanaan mitigasi dan evaluasi biaya. Diagram alir penelitian digunakan untuk menggambarkan keterkaitan antar tahapan penelitian.

Tahap pertama penelitian diawali dengan studi literatur. Studi literatur dilakukan untuk memahami teori, metode, dan pendekatan yang relevan dalam analisis kerentanan longsor dan mitigasi geoteknik. Setelah itu dilakukan pengumpulan data dengan data primer dan sekunder. Data primer diperoleh dari survei lapangan berupa pengukuran geometri lereng, pengambilan sampel tanah untuk uji laboratorium (uji kadar air, kepadatan, dan kuat geser), serta dokumentasi kondisi eksisting akses jalan Kuburan Cina. Sementara itu, data sekunder mencakup citra satelit, data topografi (DEM), peta topografi, peta geologi, data curah hujan dari BMKG, serta

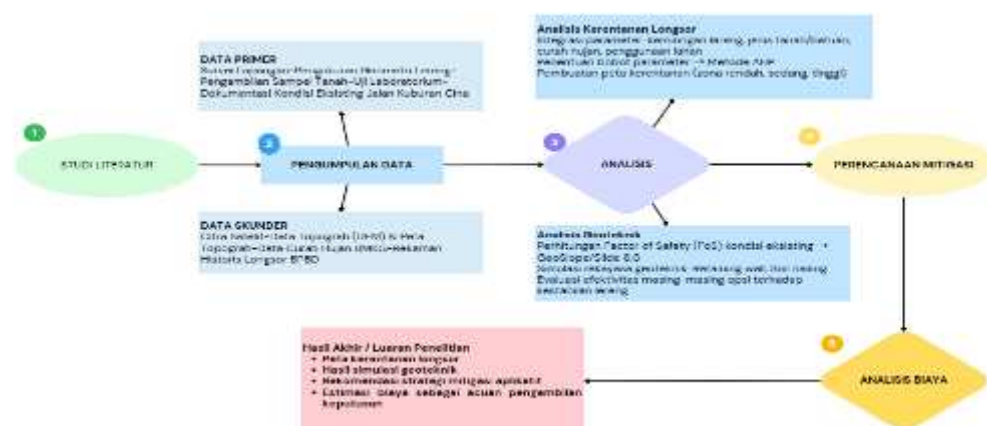
rekaman historis kejadian longsor dari BPBD Samarinda. Data topografi dimanfaatkan untuk menganalisis morfologi lereng, sedangkan peta geologi digunakan untuk mengetahui litologi dan struktur batuan yang memengaruhi kestabilan lereng. Data curah hujan berguna dalam menilai pengaruh iklim terhadap tingkat kerentanan, sementara dokumentasi longsor dari BPBD digunakan sebagai referensi validasi peta kerentanan.

Tahap kedua adalah analisis kerentanan longsor. Analisis dilakukan dengan metode Weighted Overlay berbasis SIG yang mengintegrasikan beberapa parameter utama, seperti kemiringan lereng, jenis tanah/batuan, curah hujan, dan penggunaan lahan. Metode AHP digunakan untuk menentukan bobot relatif setiap parameter berdasarkan literatur dan pendapat ahli. Hasil integrasi parameter menghasilkan peta kerentanan longsor yang diklasifikasikan ke dalam zona rendah, sedang, dan tinggi. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil peta kerentanan dengan titik kejadian longsor aktual, sehingga diperoleh tingkat akurasi model.

Tahap ketiga adalah analisis geoteknik. Pada tahap ini dilakukan perhitungan stabilitas lereng menggunakan bantuan perangkat lunak GeoSlope/Slide 6.0. Nilai Factor of Safety (FoS) dihitung untuk kondisi eksisting guna mengetahui tingkat kestabilan lereng. Selanjutnya, dilakukan simulasi kondisi setelah penerapan rekayasa geoteknik, seperti pemasangan retaining wall dan sistem soil nailing. Hasil simulasi digunakan untuk membandingkan efektivitas masing-masing opsi rekayasa dalam meningkatkan stabilitas lereng.

Tahap keempat adalah perencanaan mitigasi. Berdasarkan hasil analisis geoteknik, disusun rancangan desain mitigasi berupa penampang sederhana rekayasa lereng. Opsi mitigasi yang dibandingkan meliputi desain retaining wall dan sistem soil nailing. Kedua opsi tersebut dianalisis dari aspek teknis, efektivitas dalam meningkatkan kestabilan lereng, serta potensi dampak terhadap lingkungan sekitar. Desain penampang dibuat menggunakan perangkat lunak seperti AutoCAD atau SketchUp, dengan visualisasi sederhana untuk menunjukkan konsep perkuatan lereng pada akses Jalan Kuburan Cina.

Tahap terakhir adalah analisis biaya. Rencana Anggaran Biaya (RAB) sederhana disusun untuk masing-masing opsi mitigasi dengan memperhitungkan komponen bahan, alat, tenaga kerja, dan waktu pelaksanaan. Hasil analisis biaya kemudian dibandingkan untuk menentukan opsi yang paling layak secara teknis dan ekonomis. Dengan demikian, luaran penelitian ini tidak hanya berupa peta kerentanan longsor dan hasil simulasi geoteknik, tetapi juga rekomendasi strategi mitigasi yang aplikatif serta estimasi biaya yang dapat dijadikan acuan dalam pengambilan keputusan.



Gambar 3.1 Tahapan Penelitian

4. Hasil dan Pembahasan

A. Lokasi dan Titik Survei

Area penelitian ini berlokasi di sekitar Jalan Merdeka - Damai, Samarinda, yang secara geomorfologi merupakan zona dengan potensi instabilitas lereng. Secara detail, penelitian ini difokuskan pada empat (4) titik lokasi utama dan beberapa titik lokasi pendukung disekitar lokasi utama yang teridentifikasi sebagai lokasi

longsor (landslides). Pengambilan data lapangan dan observasi geologi dilakukan pada lokasi-lokasi ini untuk Analisa jenis longsor, ukuran/dimensi lereng, litologi, dan struktur lebih lanjut.



Gambar 4.1 STA 1 Sidodamai



Gambar 4.5 Peta Titik Longsor



Gambar 4.2 STA 2 Sidodamai



Gambar 4.3 STA 3 Sambutan



Gambar 4.4 STA 4 Sambutan

B. Analisis Spasial Berbasis AHP-GIS

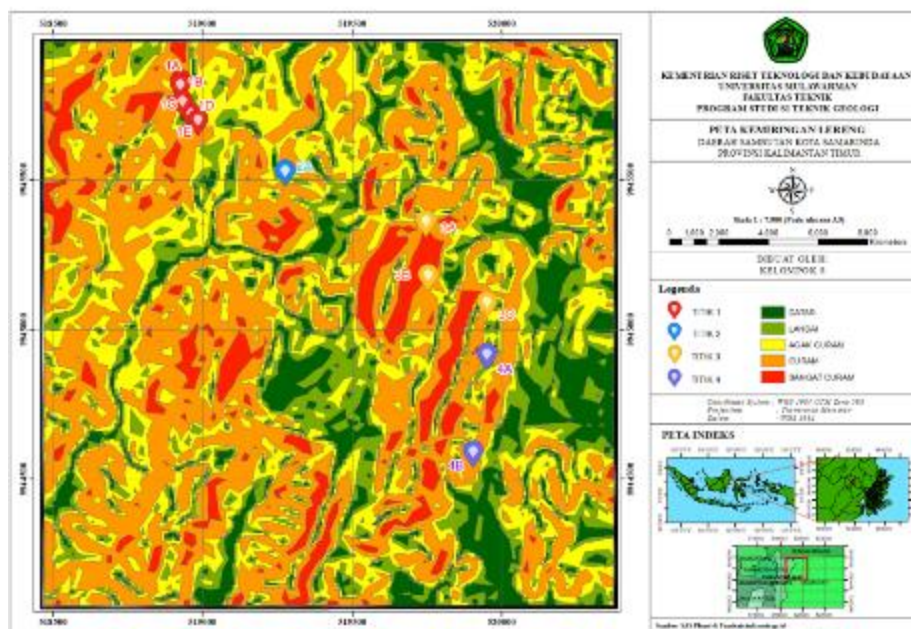
Penilaian kerentanan longsor dilakukan dengan menggunakan pendekatan Analytical Hierarchy Process (AHP), yang merupakan metode kuantitatif untuk menentukan tingkat kepentingan relatif antarparameter penyebab longsor berdasarkan prinsip perbandingan berpasangan (pairwise comparison). Metode ini dipilih karena mampu mengintegrasikan berbagai faktor fisik dan lingkungan secara sistematis ke dalam model spasial berbobot berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG).

Dalam penelitian ini, pembobotan parameter disusun berdasarkan sintesis dari beberapa studi AHP longsor di Indonesia, khususnya pada wilayah dengan karakteristik geologi dan iklim tropis basah. Berdasarkan kajian tersebut, kemiringan lereng umumnya menjadi faktor dominan dengan kontribusi sekitar 30–40%, diikuti oleh tutupan lahan sebesar 20–30%, litologi sekitar 15–25%, serta curah hujan dan jenis tanah pada kisaran 10–20% (Umar et al., 2021; Raharjo & Fitria, 2019; Sitorus & Syaifuddin, 2018). Pola ini menunjukkan bahwa kontrol utama terhadap kejadian longsor di Indonesia lebih dipengaruhi oleh kondisi topografi dibandingkan faktor lain.

Berdasarkan acuan tersebut, dalam penelitian ini digunakan pembobotan sebagai berikut: kemiringan lereng (35%), tutupan lahan (30%), litologi (20%), dan curah hujan (15%). Nilai ini masih berada dalam rentang umum penelitian AHP longsor di Indonesia, sehingga tetap memiliki dasar ilmiah yang kuat dan dapat dipertanggungjawabkan. Setiap parameter kemudian dikonversi ke dalam nilai skoring dan dilakukan proses weighted overlay dalam SIG untuk menghasilkan peta kerentanan longsor.

Untuk memastikan keandalan hasil pembobotan, dilakukan uji konsistensi AHP menggunakan Consistency Ratio (CR). Nilai $CR < 0,1$ menunjukkan bahwa hasil perbandingan berpasangan masih konsisten dan dapat diterima secara matematis (Saaty, 1980). Dengan demikian, model AHP-GIS yang digunakan tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga memiliki validitas kuantitatif dalam merepresentasikan tingkat kerentanan longsor di lokasi penelitian.

b.1 Parameter Kemiringan Lereng



Gambar 4.6 Peta Kemiringan Lereng

Tabel 4.1 Nilai Parameter Kemiringan Lereng

No	Kemiringan Lereng	Kriteria	Skor
1	0 - <8	Datar	1
2	8 - 15	Landai	2
3	16 - 25	Miring	3
4	26 - 45	Agak Curam	4
5	>45	Curam	5

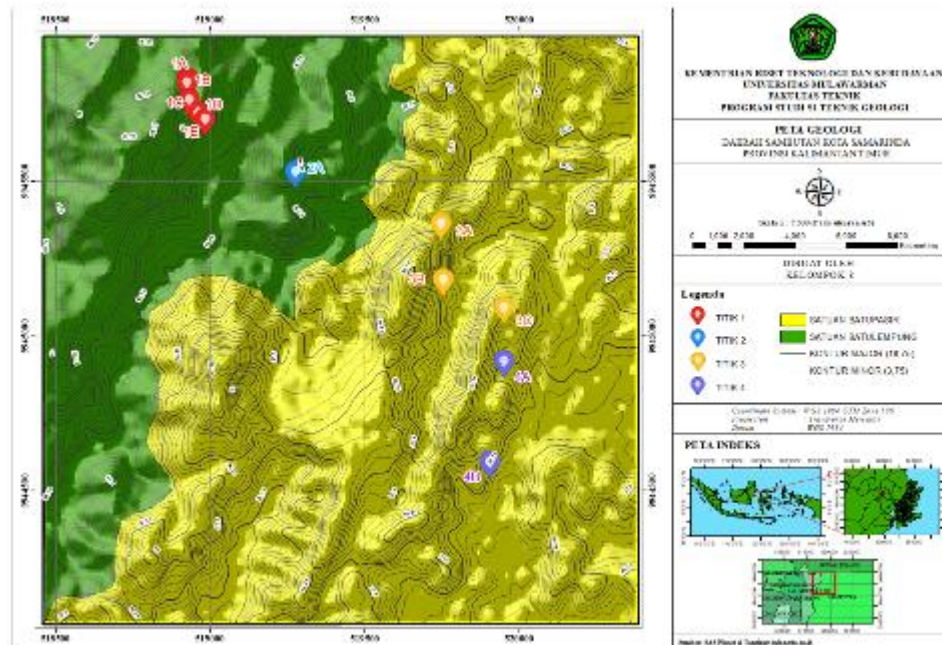
Kemiringan lereng merupakan parameter paling berpengaruh terhadap kestabilan lereng karena semakin besar sudut lereng, semakin tinggi pula gaya gravitasi yang bekerja pada massa tanah. Parameter ini diberi bobot tertinggi sebesar 35%, sebab secara langsung menentukan tingkat kestabilan medan dan menjadi faktor utama dalam pembentukan peta kerentanan longsor. Dalam berbagai studi pemetaan kerawanan longsor berbasis AHP di Indonesia, kemiringan lereng juga konsisten menjadi parameter dominan karena berhubungan langsung dengan gaya penggerak pada lereng dan kestabilan geomorfologi wilayah (Budianta, 2020; Umar et al., 2021).

Klasifikasi kemiringan lereng dibagi menjadi lima kelas dengan sistem skoring yang menggambarkan tingkat potensi kerentanan: datar ($0 < 8^\circ$, skor 1), landai ($8 - 15^\circ$, skor 2), miring ($16 - 25^\circ$, skor 3), agak curam ($26 - 45^\circ$, skor 4), dan curam ($> 45^\circ$, skor 5). Nilai skor yang lebih tinggi menunjukkan peningkatan risiko longsor akibat bertambahnya gaya geser dan menurunnya gaya penahan pada lereng. Dalam pedoman kebencanaan, lereng dengan kemiringan di atas $25^\circ - 30^\circ$ umumnya sudah dikategorikan sebagai zona rawan longsor karena ketidakseimbangan gaya pada massa tanah (BNPB, 2012; Isneni et al., 2020). Dengan demikian, area dengan kemiringan lebih dari 26° termasuk kategori rentan hingga sangat rentan terhadap pergerakan massa tanah.

Hasil interpretasi menunjukkan bahwa seluruh lokasi pengamatan berada pada zona oranye mulai dari STA 1 hingga STA 3, yang merepresentasikan kategori agak curam hingga curam (skor 4–5), menandakan potensi longsor tinggi. Satu-satunya pengecualian adalah titik STA 4, yang berada di zona kuning (skor 3) dengan kemiringan miring hingga agak curam, sehingga tingkat kerawannya tergolong sedang. Kondisi ini sejalan dengan hasil penelitian AHP di berbagai

wilayah Indonesia yang menunjukkan bahwa peningkatan kemiringan lereng selalu berkorelasi langsung dengan peningkatan tingkat kerawanan longsor (Umar et al., 2021; Budianta, 2020).

b.2 Parameter Jenis Litologi



Gambar 4.7 Peta Geologi

Tabel 4.2 Nilai Parameter Jenis Litologi

No	Litologi	Kriteria	Skor
1	Batupasir	Tidak Jenuh Air	1
2	Batulempung	Jenuh Air	2

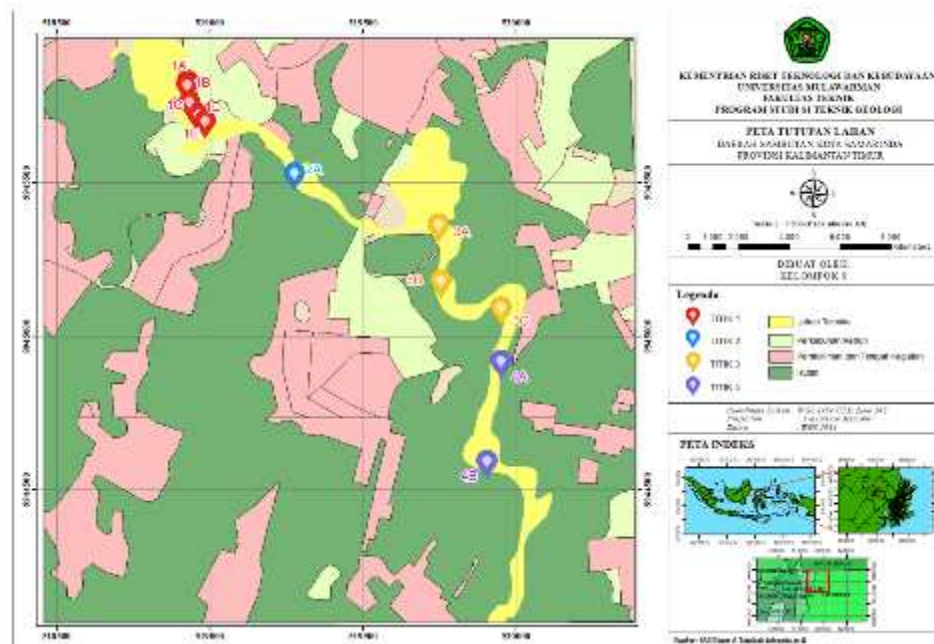
Peta geologi pada Gambar 6 menunjukkan sebaran satuan batuan di wilayah penelitian yang terletak di Formasi Pulau Balang, Kalimantan Timur. Peta geologi wilayah penelitian ini dibuat berdasarkan data primer dari survei lapangan, meliputi identifikasi dan pengamatan langsung terhadap litologi batuan di lokasi tiap titik survei. Di daerah penelitian terdapat dua satuan batuan utama yaitu batupasir dan batulempung yang masing-masing memiliki karakter berbeda terhadap kestabilan lereng. Batupasir memiliki karakteristik tidak jenuh air (unsaturated), bertekstur lebih kompak, dan memiliki permeabilitas sedang–tinggi, sehingga memungkinkan drainase alami yang baik. Satuan ini diberi skor 1 dalam klasifikasi AHP (Tabel 2) karena memiliki tingkat kerentanan longsor rendah.

Sebaliknya, batulempung tergolong material jenuh air (saturated) dengan porositas tinggi dan kohesi sedang, namun sangat dipengaruhi oleh kadar air. Dalam kondisi jenuh, batulempung mengalami penurunan kuat geser akibat berkurangnya kohesi efektif dan sudut geser dalam, sehingga lebih rentan terhadap deformasi dan longsor (Das & Sobhan, 2018). Penurunan parameter kuat geser tanah (kohesi dan sudut geser dalam) pada material lempung juga telah banyak dibuktikan dalam studi geoteknik sebagai faktor utama penyebab ketidakstabilan lereng (Hardiyatmo, 2010; Atkinson, 2007). Oleh karena itu, batulempung diberi skor 2 karena memiliki tingkat kerentanan lebih tinggi terhadap longsor dibanding batupasir.

Secara mekanika tanah, kestabilan lereng sangat dipengaruhi oleh parameter kuat geser tanah yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Semakin kecil nilai kedua parameter tersebut, maka semakin rendah kemampuan tanah menahan gaya geser yang bekerja pada lereng. Pada tanah lempung yang mengalami kejenuhan air, nilai kohesi efektif dapat menurun signifikan akibat peningkatan tekanan air pori, sehingga memperbesar potensi terjadinya longsor (Craig, 2004).

Dari hasil penelitian Silalahi et al. (2023) dan Ifnie et al. (2022), batulempung pada Formasi Pulau Balang menunjukkan karakter kekuatan yang relatif rendah hingga sedang, dengan nilai UCS yang lebih kecil dibandingkan batupasir. Kondisi ini mengindikasikan bahwa batulempung memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan kadar air, di mana peningkatan kejenuhan dapat menurunkan kekuatan geser secara signifikan. Sementara itu, batupasir menunjukkan nilai kekuatan yang lebih tinggi akibat dominasi material kuarsa yang memberikan sifat friksi internal lebih besar dibandingkan kohesi.

b.3 Parameter Tutupan Lahan



Gambar 4.8 Peta Tutupan Lahan

Tabel 4.3 Nilai Parameter Jenis Penggunaan Lahan

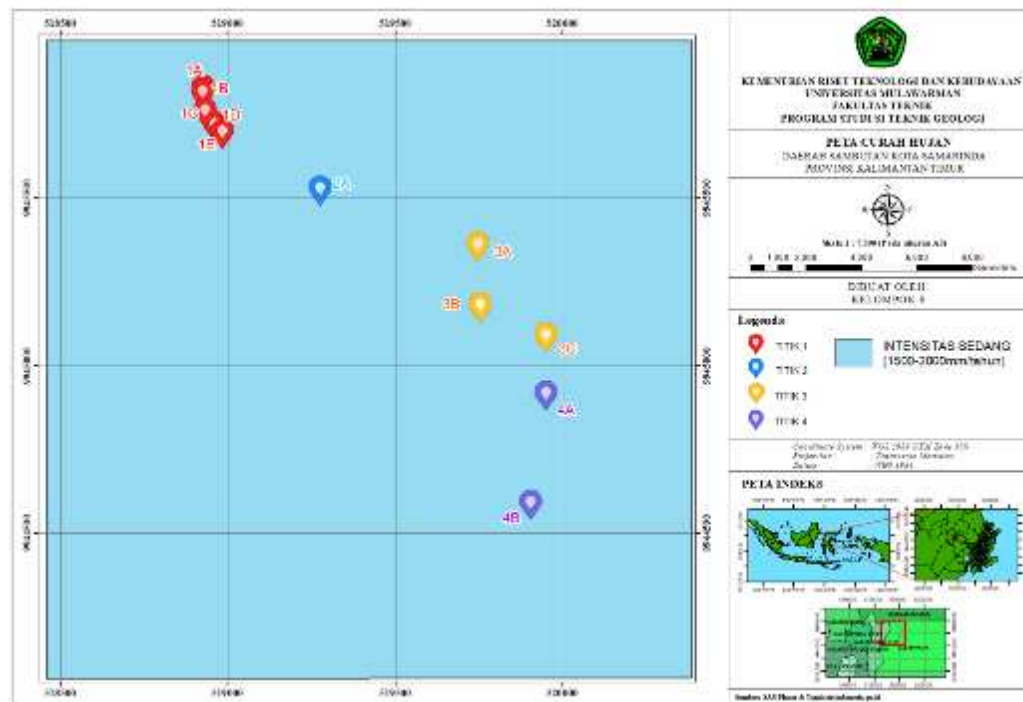
No	Penggunaan Lahan	Kriteria	Skor
1	Hutan	Vegetasi sangat rapat dan alami	1
2	Perkebunan	Vegetasi sedang dan teratur	2
3	Pemukiman	Vegetasi jarang	4
4	Lahan Terbuka	Tidak Terdapat Vegetasi	5

Peta tutupan lahan menunjukkan variasi penggunaan lahan yang berpengaruh signifikan terhadap tingkat kerentanan longsor di area penelitian. Dalam kajian kerawanan longsor berbasis AHP, tutupan lahan menjadi salah satu parameter penting karena berhubungan langsung dengan kemampuan vegetasi dalam mengontrol infiltrasi air, erosi permukaan, dan kestabilan tanah (Rizki et al., 2017; Umar et al., 2021). Vegetasi dengan akar yang rapat mampu meningkatkan kohesi tanah dan mengurangi laju limpasan permukaan, sehingga dapat menurunkan potensi longsor.

Satuan hutan memiliki vegetasi sangat rapat dengan sistem perakaran kuat yang mampu menahan infiltrasi air dan memperkuat kestabilan lereng, sehingga diberi skor 1. Perkebunan memiliki vegetasi sedang dengan jarak tanam teratur dan aktivitas manusia moderat, sehingga diberi skor 2. Pemukiman memperlihatkan kondisi permukaan tertutup bangunan kedap air yang menyebabkan berkurangnya infiltrasi serta meningkatnya aliran permukaan, sehingga diberi skor 4. Sementara itu, lahan terbuka hampir tidak memiliki vegetasi dan sangat rentan terhadap erosi maupun infiltrasi air berlebih, sehingga menjadi kategori dengan risiko tertinggi (skor 5). Kondisi ini konsisten dengan hasil penelitian bahwa semakin rendah tutupan vegetasi, maka semakin tinggi tingkat kerentanan longsor (Rizki et al., 2017).

Secara spasial, STA 1 dan STA 2 berada pada lahan terbuka yang berdekatan dengan permukiman, sehingga memiliki potensi longsor tinggi akibat minimnya vegetasi dan pengaruh aktivitas manusia. STA 3 juga berada pada lahan terbuka, namun masih mendapat pengaruh vegetasi di sekitarnya sehingga tingkat kerentanannya sedikit lebih rendah. STA 4 berada pada area transisi antara lahan terbuka dan hutan sehingga relatif lebih stabil karena masih mendapatkan perlindungan vegetasi pada bagian hulu (Umar et al., 2021).

b.4 Parameter Curah Hujan



Gambar 4.9 Peta Curah Hujan

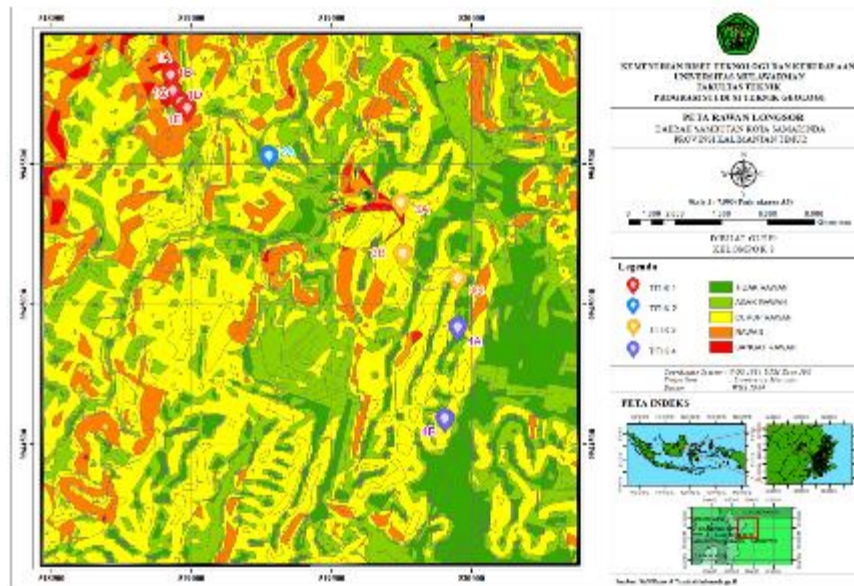
Tabel 4.4 Nilai Parameter Curah Hujan

No	Curah Hujan	Kriteria	Skor
1	2129 mm/tahun	Curah hujan 1900 – 2200 mm/tahun	2

Berdasarkan hasil klasifikasi data curah hujan diperoleh nilai rata-rata sebesar 2.129 mm/tahun, yang termasuk dalam kategori intensitas sedang dengan kisaran antara 1.900–2.200 mm/tahun dan diberi skor 2 dalam klasifikasi AHP. Dalam berbagai penelitian kerawanan longsor berbasis AHP di Indonesia, curah hujan umumnya diberikan bobot sebagai faktor pemicu utama karena berperan dalam meningkatkan kejenuhan tanah dan tekanan air pori yang memicu ketidakstabilan lereng (Umar et al., 2021; Permana et al., 2018). Nilai curah hujan yang semakin tinggi umumnya dikorelasikan dengan peningkatan tingkat kerawanan longsor dalam sistem pembobotan AHP.

Curah hujan dengan intensitas sedang berperan penting dalam menjaga ketersediaan air tanah dan kelembapan vegetasi, namun pada saat yang sama juga dapat berkontribusi terhadap peningkatan tekanan air pori di dalam tanah, terutama pada lereng dengan drainase buruk. Dalam beberapa studi AHP, curah hujan diklasifikasikan ke dalam beberapa kelas (rendah–tinggi) dengan bobot yang meningkat seiring intensitasnya, karena semakin tinggi curah hujan maka semakin besar potensi terjadinya longsor (Isneni et al., 2020).

Secara spasial, seluruh titik pengamatan berada dalam zona curah hujan yang relatif homogen, sehingga variasi kerawanan longsor lebih banyak dipengaruhi oleh faktor lain seperti kemiringan lereng, litologi, dan tutupan lahan. Dalam penelitian AHP, kondisi ini umum terjadi karena curah hujan bersifat regional sehingga lebih berfungsi sebagai faktor penguat dibandingkan pengontrol utama di tingkat lokal (BNPB, 2012; Umar et al., 2021).

C. Pemodelan Kerentanan Longsor Berbasis SIG (*Weighted Overlay*)

Gambar 4.10 Peta Rawan Longsor

Tabel 4.5 Nilai Bobot Klasifikasi Rawan Longsor

No	Klasifikasi	Kisaran Nilai
1	Tidak Rawan	100-150
2	Agak Rawan	150-200
3	Cukup Rawan	200-250
4	Rawan	250-300
5	Sangat Rawan	300-395

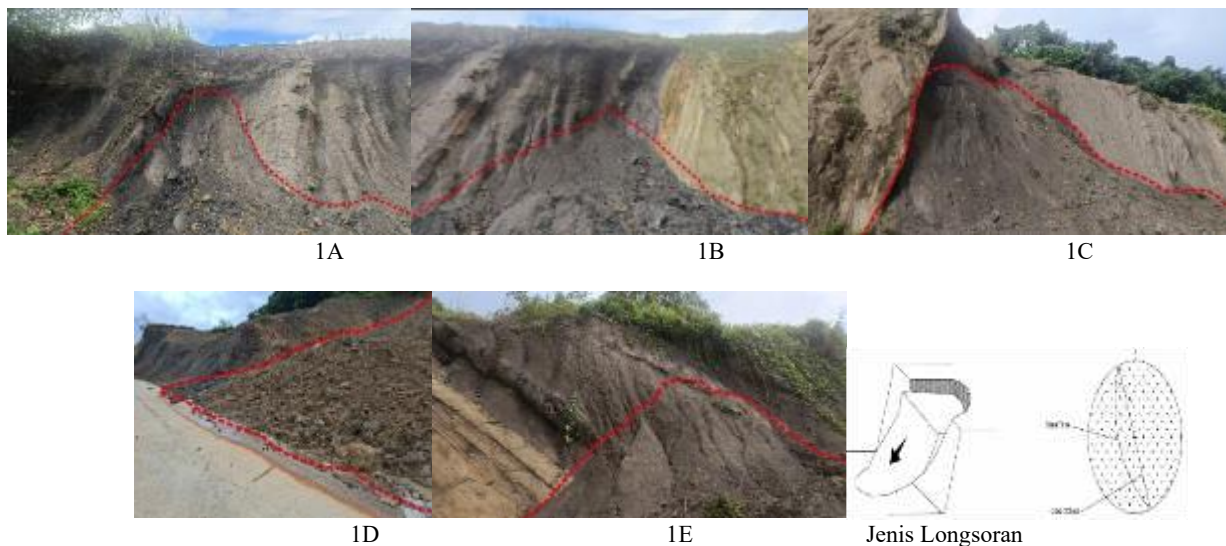
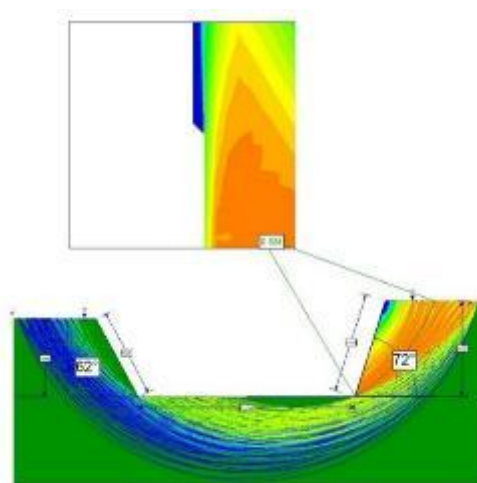
Peta tingkat kerawanan longsor disusun menggunakan metode tumpang susun (overlay) berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) dengan pendekatan Indeks Storie. Tahapan overlay dilakukan setelah setiap parameter penyebab longsor yakni tutupan lahan, kemiringan lereng, litologi, dan curah hujan diberi nilai skoring sesuai tingkat pengaruhnya terhadap kerentanan tanah. Proses Union dalam SIG digunakan untuk menggabungkan seluruh layer parameter menjadi satu kesatuan data spasial yang merepresentasikan kondisi wilayah. Setelah itu, dilakukan analisis kuantitatif menggunakan rumus:

Skor Total = (Skor Tutupan Lahan $\times$ 30%) + (Skor Kemiringan Lereng $\times$ 35%) + (Skor Litologi $\times$ 20%) + (Skor Curah Hujan $\times$ 15%).

Bobot tertinggi diberikan pada kemiringan lereng karena secara langsung mempengaruhi kestabilan massa tanah, sementara parameter lainnya memberikan kontribusi tambahan terhadap potensi terjadinya longsor (Umar et al., 2021).

Berdasarkan hasil overlay dan perhitungan indeks, diperoleh lima klasifikasi tingkat kerawanan longsor, yaitu tidak rawan (100–150), agak rawan (150–200), cukup rawan (200–250), rawan (250–300), dan sangat rawan (300–395). Setiap kelas kerawanan ini menunjukkan kombinasi pengaruh parameter fisik yang berbeda. Pada peta, terlihat bahwa area dengan warna hijau tua hingga hijau muda menunjukkan tingkat kerawanan rendah karena memiliki kemiringan lereng landai dan vegetasi lebat yang dapat menahan erosi. Sementara itu, area berwarna kuning hingga oranye menandakan wilayah dengan tingkat kerawanan sedang akibat adanya perubahan penggunaan lahan dan topografi yang lebih curam. Zona merah menandai daerah dengan tingkat kerawanan tertinggi, umumnya terletak di area terbuka atau tererosi dengan litologi yang mudah lapuk serta lereng terjal, yang menjadikannya sangat rentan terhadap gerakan massa tanah (Umar et al., 2021).

Hasil interpretasi pada titik pengamatan menunjukkan variasi tingkat kerawanan yang mencerminkan kondisi geomorfologi setempat. Titik 1A hingga 1E berada di wilayah dengan warna dominan orange, termasuk dalam kategori rawan, disebabkan oleh kombinasi antara lereng curam, litologi pelapukan lemah/batulempung, dan minimnya vegetasi penutup. Titik 2A diklasifikasikan sebagai cukup rawan, karena meskipun terdapat vegetasi penutup, kemiringan lereng sedang masih berpotensi memicu longsor saat curah hujan tinggi. Titik 3A, 3B, dan 3C juga menunjukkan kondisi rawan. Sementara itu, titik 4A dan 4B berada di area agak rawan hingga tidak rawan, dengan topografi relatif datar, tutupan hutan rapat, serta litologi yang kompak. Secara keseluruhan, hasil tumpang susun memperlihatkan bahwa bagian barat laut wilayah penelitian lebih berisiko tinggi terhadap longsor dibandingkan bagian timur hingga tenggara yang cenderung stabil berkat kondisi vegetasi alami dan morfologi lembah yang landai (Umar et al., 2021).

D. Pemodelan Kerentanan Longsor Berbasis SIG (*Weighted Overlay*)**d.1. Titik Longsor Kritis 1 (STA 1)****Gambar 4.11. STA 1****Gambar 4.12. STA Pendukung Titik Longsor STA 1****Gambar 4.13. Hasil Analisis Slide STA 1**

Hasil analisis pada STA 1 menunjukkan bahwa lokasi ini tersusun oleh litologi batulempung dengan parameter geoteknik berupa berat isi $18,5 \text{ kN/m}^3$, kohesi 20 kPa , dan sudut geser dalam (ϕ) 20° . Lereng memiliki kemiringan sangat curam (62° – 72°), yang secara morfologi menandakan tingkat kerentanan tinggi terhadap kelongsoran, terutama pada kondisi jenuh air akibat curah hujan intensif. Material batulempung yang bersifat kohesif namun mudah melunak ketika basah menyebabkan penurunan kekuatan geser efektif dan peningkatan tekanan air pori, sehingga memperbesar peluang terjadinya gerakan massa tanah.

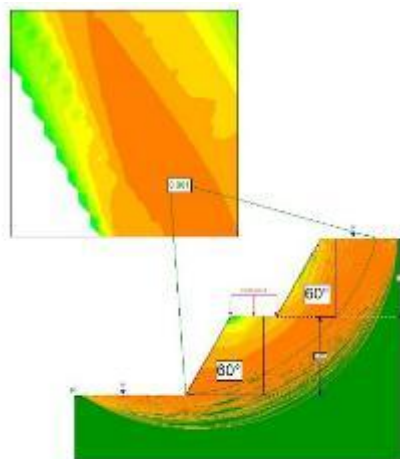
Simulasi kestabilan menggunakan metode Slide menghasilkan Factor of Safety (FK) = 0,824, menandakan kondisi marginal stability atau batas kestabilan ($FK \approx 1,0$). Lereng dalam kondisi ini sangat sensitif terhadap perubahan eksternal—seperti peningkatan curah hujan, beban tambahan di puncak, atau erosi kaki lereng—yang dapat menurunkan nilai FK di bawah batas aman ($FK \geq 1,3$) dan memicu longsor. Bidang gelincir yang terbentuk menunjukkan tipe longsor busur (*rotational slide*) dengan bidang melengkung khas material plastis seperti lempung.

Secara keseluruhan, STA 1 dikategorikan sebagai zona rawan tinggi, di mana faktor utama ketidakstabilan mencakup kemiringan curam, litologi pelapukan lemah, serta pengaruh curah hujan yang tinggi. Rekomendasi mitigasi teknis berupa soil nailing dan shotcrete, yang berfungsi memperbesar gaya tahan internal dan melindungi permukaan lereng dari infiltrasi air serta erosi.

d.2. Titik Longsor Kritis 2 (STA 2)



Gambar 4.14. STA 2



Gambar 4.15. Hasil Analisis Slide STA 2

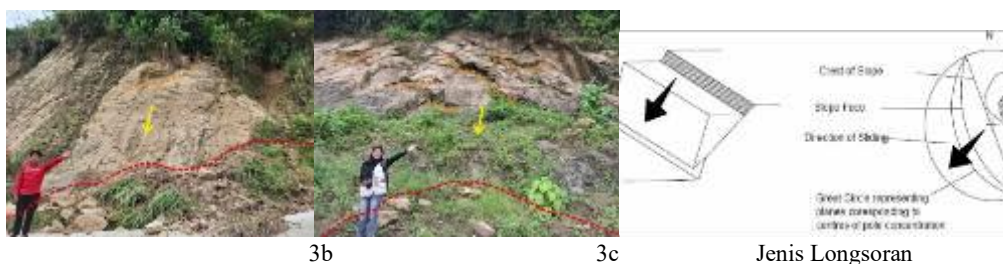
STA 2 merupakan titik paling kritis di lokasi penelitian karena posisi longsor berada tepat di bawah badan jalan utama, sehingga selain dipengaruhi oleh kondisi geologi, lereng juga menanggung beban tambahan kendaraan sekitar 20 kN yang secara signifikan meningkatkan gaya pendorong pada massa tanah. Litologi dominan di area ini adalah batulempung, dengan parameter fisik $\gamma = 18,5 \text{ kN/m}^3$, $c = 20 \text{ kPa}$, dan $\phi = 20^\circ$. Lereng memiliki kemiringan sekitar 60° , tergolong curam dan mudah mengalami destabilisasi, terutama pada kondisi jenuh air akibat curah hujan tinggi. Hasil simulasi menggunakan metode Slide menunjukkan Factor of Safety (FK) = 0,807, menandakan bahwa lereng dalam kondisi tidak stabil (*unstable*) karena nilai $FK < 1,0$ (1)(3). Bentuk bidang gelincir memperlihatkan pola longsor busur (*rotational slide*) yang melengkung dari puncak hingga kaki lereng, menunjukkan bahwa potensi kegagalan mencakup hampir seluruh tubuh lereng. Pola ini umum terjadi pada material lempung plastis yang kehilangan kekuatan geser saat jenuh air.

Kombinasi antara batulempung dengan plastisitas tinggi, kemiringan curam, dan beban kendaraan di atas lereng menyebabkan peningkatan tekanan air pori dan gaya geser, sehingga mempercepat pembentukan bidang lemah. Seperti dijelaskan oleh Reichenbach et al. (2018), gaya eksternal tambahan di puncak lereng dapat menurunkan FK secara drastis pada material kohesif rendah. Dengan kondisi tersebut, STA 2 dikategorikan sebagai titik paling rawan longsor di area penelitian. Mitigasi yang disarankan adalah sistem retaining wall + soil nailing, di mana retaining wall menahan tekanan lateral akibat beban kendaraan dan tanah jenuh, sementara soil nailing memperkuat massa tanah di belakang dinding. Kombinasi ini terbukti efektif meningkatkan $FK > 1,3$ dan menjaga kestabilan lereng pada kondisi dinamis.

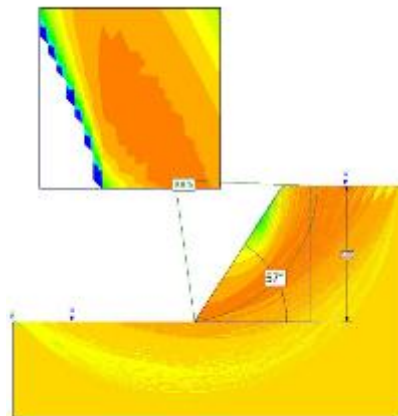
d.3. Titik Longsor Kritis 3 (STA 3)



Gambar 4.16. STA 3



Gambar 4.17. STA Pendukung Titik Longsor STA 3



Gambar 4.18. Hasil Analisis Slide STA 3

STA 3 didominasi oleh litologi batupasir, dengan parameter mekanik berat isi (γ) = 19,5 kN/m³, kohesi (c) = 15 kPa, dan sudut geser dalam (ϕ) = 30°. Lereng memiliki kemiringan sekitar 57°, tergolong curam dan berpotensi mengalami kegagalan terutama di bawah kondisi jenuh air. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan metode Slide, diperoleh Factor of Safety (FK) = 0,875, yang menunjukkan kondisi tidak stabil (unstable) karena gaya pendorong lebih besar daripada gaya penahan.

Pola bidang gelincir yang terbentuk pada hasil analisis memperlihatkan tipe longsoran bidang (*planar slide*), dengan arah pergerakan massa tanah sejajar bidang diskontinuitas pada batuan dasar. Mekanisme ini terjadi karena adanya rekahan atau bidang perlapisan pada batupasir yang memiliki orientasi hampir sejajar dengan muka lereng, sehingga ketika tegangan geser meningkat atau air meresap ke bidang lemah, massa batuan akan meluncur ke bawah secara translasi.

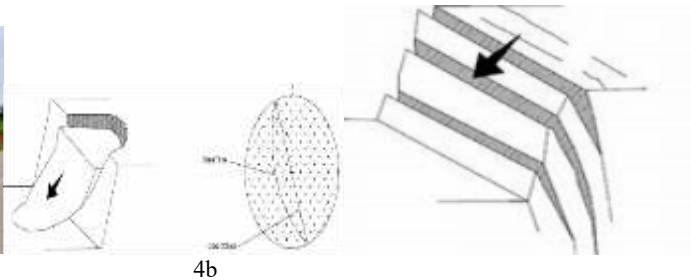
Batupasir memiliki sudut geser dalam tinggi (30°) yang memberikan tahanan friksi besar, namun kohesi rendah (15 kPa) menyebabkan kestabilan lereng sangat bergantung pada kondisi bidang diskontinuitas. Ketika air hujan meningkatkan tekanan air pori (pore pressure) pada bidang lemah, kekuatan geser efektif menurun secara signifikan dan memicu terjadinya pergerakan bidang (2)(5). Nilai FK = 0,875 memperkuat indikasi bahwa lereng dalam kondisi tidak stabil, terutama pada musim hujan ketika infiltrasi tinggi dan drainase alami kurang efektif (3). Dengan kombinasi kemiringan 57°, kohesi rendah, dan bidang pelapisan miring searah lereng, STA 3 dikategorikan sebagai area rawan longsor bidang. Mitigasi yang disarankan

meliputi soil nailing dan weremash, untuk memperkuat massa tanah dan mencegah jatuhnya longsor pada bidang rekahan. Sistem ini terbukti efektif meningkatkan nilai FK di atas batas aman ($FK > 1,3$) serta menekan potensi deformasi lereng.

d.4. Titik Longsor Kritis 4 (STA 4)

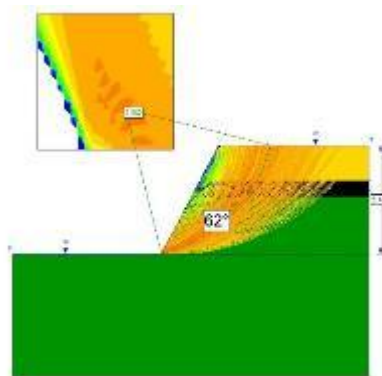


Gambar 4.19. STA 4



4b

Gambar 4.20. STA Pendukung Titik Longsor STA 4



Gambar 4.21. Hasil Analisis Slide STA 4

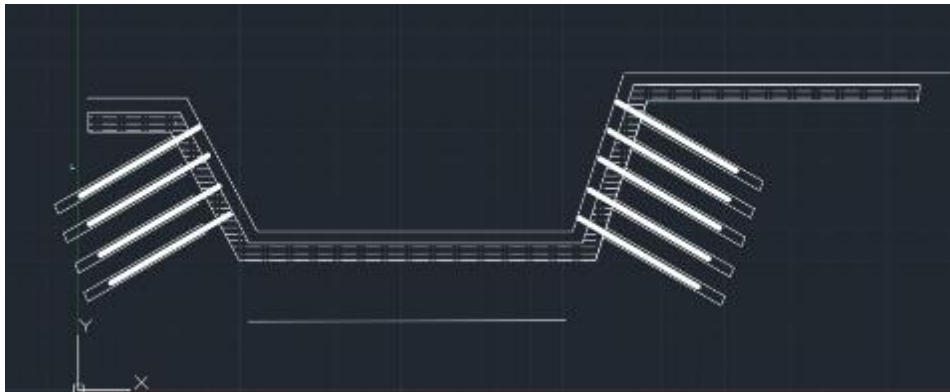
Hasil analisis STA 4 memperlihatkan kondisi lereng dengan kemiringan 62° , tersusun atas kombinasi litologi batupasir, batubara, dan batulempung. Setiap litologi memiliki karakteristik geoteknik berbeda, yakni batupasir ($c = 15 \text{ kPa}$; $\phi = 30^\circ$) dengan friksi tinggi namun kohesi rendah, batubara ($c = 100 \text{ kPa}$; $\phi = 28^\circ$) yang bersifat kohesif kuat, dan batulempung ($c = 20 \text{ kPa}$; $\phi = 20^\circ$) yang kohesif sedang tetapi mudah jenuh. Kombinasi tersebut menghasilkan perilaku mekanik yang kompleks pada massa lereng, di mana batulempung berfungsi sebagai bidang lemah potensial dan batupasir di bagian atas berperan sebagai lapisan kaku yang rentan terhadap rekahan.

Simulasi dengan metode Slide menunjukkan Factor of Safety (FK) = 0,962, menandakan kondisi tidak stabil ($FK < 1,0$). Nilai tersebut menunjukkan bahwa gaya penahan dari kombinasi kohesi dan friksi internal masih jauh lebih besar daripada gaya pendorong akibat gravitasi. Lapisan batubara yang memiliki kohesi tinggi bertindak sebagai penahan alami yang memperkuat lapisan di atasnya, sementara batupasir di permukaan memberikan kontribusi gaya geser yang menjaga keseimbangan lereng.

Bidang gelincir utama memperlihatkan membusur pada lapisan batulempung dan sebagian kecil batubara. Pola ini menunjukkan mekanisme longsor busur dominan dengan potensi toppling minor pada lapisan batupasir di bagian atas. Kondisi ini umum terjadi pada lereng berlapis heterogen, di mana lapisan lempung yang plastis dan jenuh air berperan sebagai bidang gelincir, sedangkan lapisan kaku di atasnya dapat mengalami deformasi rotasional akibat kehilangan tumpuan bawah.

Secara umum, STA 4 dikategorikan stabil dan memiliki tingkat kerawanan rendah, namun deformasi lokal masih berpotensi terjadi apabila drainase lereng tidak berfungsi dengan baik atau terjadi peningkatan curah hujan ekstrem. Mitigasi disarankan

berupa kombinasi soil nailing, wiremesh, dan shotcrete, yang efektif memperkuat lapisan atas, menutup jalur infiltrasi air, dan menjaga kestabilan jangka panjang lereng.

E. Pemodelan Kerentanan Longsor Berbasis SIG (*Weighted Overlay*)e.1. Mitigasi STA 1 Menggunakan *Soil Nailing* dan *Shotcrete*Gambar 4.22. Perencanaan Mitigasi Geoteknik *Soil Nailing* dan *Shotcrete*

Pada lereng STA 1, metode mitigasi yang diterapkan adalah *soil nailing* dan *shotcrete*, yang berfungsi memperkuat massa tanah dan menjaga kestabilan lereng dengan kondisi geoteknik berupa batulempung dengan kemiringan 62° – 72° dan nilai FK = 0,824 (batas tidak stabil).

- *Soil nailing* bekerja dengan cara menanam batang baja (*nail*) secara miring ke dalam lereng untuk menambah gaya tahan internal (*resisting force*) melalui peningkatan kohesi buatan serta memperkuat interaksi tanah–paku. Sistem ini menahan gaya geser di dalam massa tanah dan mengubah lereng menjadi satu kesatuan struktural yang lebih kaku dan stabil.
- *Shotcrete* (lapisan beton semprot) berfungsi sebagai pelindung permukaan lereng, mencegah erosi, pelapukan, dan infiltrasi air, serta membantu menyalurkan beban luar menuju sistem paku tanah di belakangnya.

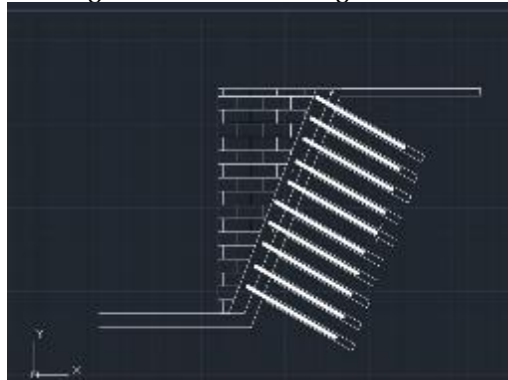
Kombinasi kedua sistem ini membuat lereng STA 1 berperilaku sebagai struktur tanah bertulang (*reinforced soil structure*) yang mampu menahan gaya longsor, terutama jenis longsor busur (*rotational slide*) yang teridentifikasi dari hasil analisis stabilitas.

Gambar menunjukkan konfigurasi lereng dengan *soil nail* yang tertanam miring sekitar 15° – 25° dari horizontal, disertai lapisan *shotcrete* pada permukaan luar. Pola pemasangan paku yang rapat menggambarkan kondisi lereng curam dengan material lempung jenuh, di mana gaya dorong tanah relatif tinggi. Bidang melengkung di bawah permukaan mewakili bidang gelincir potensial (*failure surface*), khas pada tipe longsor busur di STA 1. Dari gambar ini terlihat bahwa *nail* berfungsi menahan gaya geser dari massa tanah di atasnya, sementara *shotcrete* melindungi lereng dari pelapukan dan aliran air yang dapat melemahkan zona permukaan.

Tabel 4.6 Hubungan Mitigasi Geoteknik *Soil Nailing* dan *Shotcrete* terhadap Kondisi STA 1

STA	Kondisi Geoteknik & FK	Jenis Potensi Longsor	Fungsi Mitigasi <i>Soil Nailing</i> + <i>Shotcrete</i>
STA 1	Batulempung, FK = 0,824 (tidak stabil), kemiringan 62° – 72° , mudah jenuh air.	Longsor busur (<i>rotational slide</i>).	<i>Soil nailing</i> meningkatkan gaya tahan internal dan memperbesar FK menjadi $> 1,3$; <i>shotcrete</i> melindungi permukaan lereng dari erosi dan infiltrasi air untuk menjaga kestabilan jangka panjang.

Pada STA 1, kondisi lereng menunjukkan potensi longsor busur akibat kombinasi kemiringan curam, material lempung jenuh air, dan kohesi alami yang rendah. Sistem *soil nailing* berperan utama untuk menambah kekuatan geser internal pada zona lemah di bawah permukaan, sehingga bidang gelincir potensial dapat tertahan (Sutikno et al., 2020).. Sementara itu, lapisan *shotcrete* di bagian luar mencegah air hujan masuk ke dalam massa tanah yang dapat menurunkan kekuatan geser efektif dan memicu longsor ulang. Melalui penerapan sistem gabungan ini, faktor keamanan (FK) lereng dapat meningkat dari 0,824 menjadi di atas 1,3, sehingga lereng dikategorikan stabil secara teknis. Berdasarkan kondisi lapangan, potensi kegagalan di STA 1 sangat dipengaruhi oleh infiltrasi air hujan dan pelapukan material lempung. Kombinasi *soil nailing* + *shotcrete* dinilai mampu mengendalikan lebih dari 70% faktor pemicu longsor tersebut, dengan estimasi efektivitas struktural mitigasi mencapai $\pm 72\%$ dalam mengembalikan kestabilan lereng melalui peningkatan kekuatan geser internal dan proteksi permukaan.

e.2. Mitigasi STA 2 Menggunakan *Retaining Wall* dan *Soil Nailing*Gambar 4.23. Perencanaan Mitigasi Geoteknik *Retaining Wall* dan *Soil Nailing*

Pada lereng STA 2, sistem mitigasi yang digunakan adalah *retaining wall* (dinding penahan tanah) yang dikombinasikan dengan *soil nailing* sebagai perkuatan internal. Lokasi STA 2 memiliki kondisi geoteknik berupa batulempung jenuh air, kemiringan sekitar 60° , dan nilai $FK = 0,807$, yang menunjukkan kondisi tidak stabil dengan potensi terjadinya longsor busur besar (*rotational slide*).

- *Retaining wall* berfungsi sebagai elemen struktural utama yang memberikan tahanan pasif terhadap gaya dorong tanah aktif, mencegah pergeseran massa tanah ke arah depan. Dinding ini menahan tekanan lateral dari lapisan tanah yang jenuh air dan menjadi penahan eksternal terhadap deformasi lereng (Hidayat & Wibowo, 2019).
- *Soil nailing* dipasang miring ke dalam lereng dengan sudut sekitar $15-20^\circ$ dari horizontal, berperan menambah kohesi buatan dan meningkatkan kekuatan geser internal pada zona tanah di belakang dinding. Sistem ini memperkuat interaksi tanah-paku, membentuk massa tanah bertulang (*reinforced soil mass*) yang lebih stabil dan kaku.

Kombinasi kedua sistem tersebut menghasilkan kestabilan lereng yang lebih tinggi, menahan gaya geser akibat tekanan air pori, serta mencegah pergerakan massa tanah yang berpotensi membentuk bidang gelincir busur.

Gambar memperlihatkan konfigurasi *retaining wall* vertikal dengan *soil nail* yang tertanam miring di belakang dinding. Pola pemasangan *nail* yang rapat menunjukkan desain untuk menahan tekanan tanah aktif yang besar, terutama pada lereng curam dengan kondisi jenuh air seperti di STA 2.

- *Retaining wall* berperan sebagai penahan muka dan titik tumpu terhadap gaya horizontal tanah.
- *Soil nail* berfungsi memperkuat lapisan belakang dinding agar bidang gelincir potensial tidak berkembang.

Bidang gelincir pada lokasi ini umumnya berbentuk busur (*rotational*), yang diperkirakan melengkung dari dasar dinding hingga ke area belakang lereng. Kombinasi sistem ini memperlihatkan sinergi antara penahan eksternal (dinding) dan penguat internal (*nail*), yang bekerja bersama untuk menstabilkan massa tanah.

Tabel 4.7 Hubungan Mitigasi Geoteknik *retaining wall* dan *Soil nailing* terhadap Kondisi STA 2

STA	Kondisi Geoteknik & FK	Jenis Potensi Longsor	Fungsi Mitigasi <i>Retaining Wall</i> + <i>Soil Nailing</i>
STA 2	Batulempung, $FK = 0,807$ (tidak stabil), kemiringan 60° , jenuh air.	Longsor busur besar (<i>rotational slide</i>).	<i>Retaining wall</i> berfungsi sebagai penahan utama terhadap tekanan tanah aktif, sedangkan <i>soil nail</i> memperkuat massa tanah di belakangnya untuk menambah tahanan geser internal. Kombinasi keduanya meningkatkan FK menjadi $> 1,3$ dan mengurangi deformasi akibat tekanan air pori.

Pada STA 2, kondisi tanah lempung yang jenuh air menyebabkan penurunan kekuatan geser efektif dan peningkatan tekanan lateral terhadap lereng. Karena itu, *retaining wall* menjadi elemen kunci untuk menahan gaya dorong aktif akibat tekanan air dan berat tanah di atasnya. Namun, untuk menghindari kegagalan pada bidang gelincir di bawah dinding, *soil nailing* dipasang sebagai sistem perkuatan internal, menembus lapisan lemah di belakang dinding dan menahan pergerakan tanah dari dalam. Interaksi keduanya membuat zona di belakang dinding berfungsi seperti blok massa tanah bertulang, yang tidak hanya menahan tekanan eksternal tetapi juga meningkatkan kekuatan internal. Hasil perhitungan dan analisis menunjukkan bahwa penerapan kombinasi sistem ini dapat menaikkan faktor keamanan (FK) dari $0,807$ menjadi di atas $1,3$, menjadikan lereng STA 2 stabil terhadap gaya longsor busur besar. STA 2 memiliki risiko tertinggi karena beban kendaraan ± 20 kN dan deformasi horizontal dominan pada bidang busur. Sistem *retaining wall* + *soil nailing* memberikan pertahanan paling kuat karena mampu mengontrol gaya pendorong terbesar dan memutus bidang gelincir secara efektif. Tingkat keberhasilan mitigasi diperkirakan mencapai $\pm 82\%$, menjadikannya solusi paling efektif dan prioritas utama implementasi.

e.3. Mitigasi STA 1 Menggunakan *Soil Nailing* dan *Wiremesh*



Gambar 4.24. Perencanaan Mitigasi Geoteknik Wiremesh dan Soil Nailing

Prinsip dasar *soil nailing* adalah memperkuat massa tanah secara insitu dengan menambahkan elemen-elemen penahan berupa batang baja (nail) yang dipasang miring ke dalam lereng. Sistem ini bekerja dengan:

- Menambah gaya penahan internal pada massa tanah, sehingga meningkatkan nilai faktor keamanan (FK).
- Mengubah mekanisme deformasi dari geser bebas menjadi massa kaku (*composite mass*).
- Menahan pergerakan tanah dengan gaya tarik dan geser yang dihasilkan oleh paku tanah. Umumnya dipasang dengan kemiringan 10–20° dari horizontal, menembus zona potensi longsor.

Wiremesh (kawat anyam baja) digunakan di permukaan lereng dengan fungsi:

- Menahan erosi permukaan akibat air hujan.
- Mengikat tanah lapisan atas agar tidak terlepas di antara paku tanah.
- Mendistribusikan beban secara merata ke elemen soil nail.
- Melindungi lereng dari longsor kecil, runtuh lokal, dan pelepasan fragmen batuan.

Kombinasi *soil nailing* + *wiremesh* berfungsi memperkuat massa tanah secara internal sekaligus menstabilkan permukaan lereng.

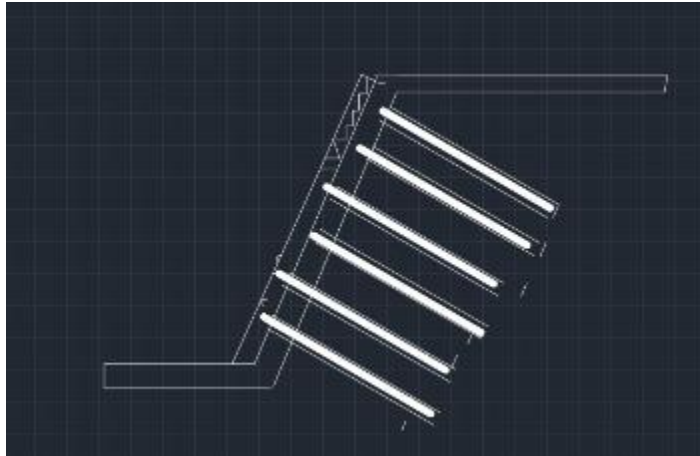
Gambar diatas menunjukkan potongan melintang lereng yang telah direncanakan untuk diperkuat menggunakan sistem *soil nailing* dan *wiremesh*. Elemen-elemen berbentuk garis miring ke belakang lereng menggambarkan paku tanah yang dipasang menembus tubuh lereng pada sudut tertentu dari horizontal, sedangkan garis tebal di bagian permukaan menunjukkan lapisan pelindung berupa *wiremesh*. Secara fungsional, setiap batang paku bekerja menahan gaya pendorong yang cenderung menggulingkan blok batuan ke depan, sehingga mengubah mekanisme deformasi dari gerakan rotasional bebas menjadi pergerakan yang terbatas dan terkendali. Paku tanah mentransfer gaya tarik dan geser ke dalam massa batuan yang lebih stabil di belakang bidang lemah, sementara *wiremesh* di permukaan berperan melindungi lereng dari erosi, retakan terbuka, dan keluarnya fragmen batuan kecil. Kombinasi kedua sistem ini memungkinkan lereng yang sebelumnya tidak stabil menjadi lebih kaku dan mampu menahan beban akibat gravitasi maupun pengaruh air. Selain itu, lapisan *wiremesh* juga membantu mengurangi infiltrasi air hujan yang dapat meningkatkan tekanan air pori, sehingga turut menjaga kestabilan internal lereng. Dengan adanya sistem ini, potensi kegagalan *toppling* pada STA 3 dapat ditekan secara signifikan, karena gaya guling yang bekerja pada blok batuan tertahan oleh gaya reaksi dari *soil nail* dan kekakuan permukaan yang diperkuat.

Tabel 4.8 Hubungan Perencanaan Mitigasi Geoteknik (*Soil Nailing* dan *Wiremesh*) terhadap Kondisi STA 3

STA	Kondisi Geoteknik & FK	Jenis Potensi Longsor	Fungsi Mitigasi Retaining Wall + Soil Nailing
STA 3	Batupasir, FK = 0,875 (tidak stabil), kemiringan 57°, rekahan terbuka	Longsor bidang (<i>planar slide</i>)	<i>Soil nail memperkuat massa lereng dan menambah tahanan geser, sedangkan wiremesh mencegah adanya jatuhnya dari longsor permukaan. Keduanya meningkatkan FK > 1,3 dan menjaga lereng tetap stabil saat jenuh air.</i>

Hasil analisis kestabilan lereng STA 3 menunjukkan bahwa litologi batupasir memiliki kohesi rendah (15 kPa) dan sudut geser tinggi (30°), sehingga meskipun memiliki friksi antarbutir yang kuat, daya ikatnya lemah dan rentan terhadap gulingan (*toppling*). Dengan kemiringan 57°, gaya gravitasi memperbesar potensi longsor, terutama saat jenuh air. Oleh karena itu, sistem *soil nailing* diterapkan untuk menambah kekuatan tarik dan menahan gaya guling, sedangkan *wiremesh* berfungsi menjaga kestabilan permukaan serta mencegah erosi dan infiltrasi air. Kombinasi keduanya diharapkan meningkatkan faktor keamanan dari 0,875 menjadi lebih dari 1,3, sehingga lereng menjadi stabil dan tahan terhadap deformasi.

e.4. Wiremesh, Soil Nailing dan Shotcrete



Gambar 4.25. Perencanaan Mitigasi Geoteknik Soil Nailing, Wiremesh Serta Shotcrete

Soil Nailing berfungsi memperkuat massa tanah atau batuan dari dalam dengan memasang batang baja miring ke arah belakang lereng. Elemen ini menambah gaya tarik dan geser internal sehingga meningkatkan faktor keamanan (FK) lereng. Paku tanah menahan deformasi dan momen guling akibat gaya berat dan tekanan air pori. *Wiremesh* berperan sebagai pengikat permukaan yang menahan pelepasan fragmen batuan, mencegah erosi, dan membantu distribusi beban secara merata ke sistem paku tanah. Dan *Shotcrete* adalah lapisan beton semprot yang menutupi permukaan lereng di atas *wiremesh*, berfungsi sebagai pelindung tambahan terhadap infiltrasi air, pelapukan, dan degradasi permukaan batuan (Pratama et al., 2021). Ketiga sistem ini bekerja sinergis, *Soil nailing* menambah kekuatan internal lereng, *wiremesh* menjaga kestabilan permukaan (Kurniawan & Setiawan, 2020)., dan *shotcrete* melindungi sistem dari pengaruh eksternal seperti air hujan dan cuaca.

Gambar potongan melintang lereng STA 4 memperlihatkan sistem mitigasi yang terdiri dari *soil nailing*, *wiremesh*, dan *shotcrete*. Elemen garis miring panjang menggambarkan paku tanah yang tertanam ke dalam tubuh lereng, menembus beberapa lapisan litologi dari batupasir hingga batulempung. Elemen zigzag di permukaan atas menunjukkan keberadaan lapisan *wiremesh*, sedangkan garis tebal pelindung di permukaan melambangkan lapisan *shotcrete*. Secara fungsional, ketiga sistem ini bekerja secara berlapis dan saling mendukung. *Soil nail* berfungsi menahan gaya dalam dan memperkuat massa lereng dari dalam, menjadikan seluruh tubuh lereng berperilaku sebagai satu kesatuan kaku (*reinforced slope*). *Wiremesh* berperan sebagai lapisan pengikat permukaan yang menahan keluarnya material lepas serta membantu mendistribusikan beban ke sistem nail di bawahnya. Lapisan *shotcrete* di atasnya memberikan perlindungan tambahan terhadap air dan cuaca, sekaligus memperkuat permukaan agar lebih tahan terhadap gaya mekanik eksternal seperti erosi, rembesan, atau beban tambahan di puncak lereng. Dengan kombinasi tersebut, sistem mitigasi STA 4 mampu mengontrol potensi kegagalan ganda, baik *toppling* pada lapisan batupasir maupun *rotational slide* pada lapisan batulempung. Nilai faktor keamanan yang sudah tergolong tinggi ($FK = 0,962$) dipertahankan dalam kondisi ekstrem.

Tabel 4.9 Hubungan Perencanaan Mitigasi Geoteknik (*Wiremesh*, *Soil Nailing*, dan *Shotcrete*) terhadap Kondisi STA 4

STA	Kondisi Geoteknik & FK	Jenis Potensi Longsor	Fungsi Mitigasi Retaining Wall + Soil Nailing
STA 4	Batupasir–batubara–batulempung, $FK = 0,962$ (tidak stabil), kemiringan 62°	Longsor busur (rotasional) dengan toppling minor	<i>Soil nail</i> memperkuat massa lereng, <i>wiremesh</i> menahan retakan, dan <i>shotcrete</i> mencegah infiltrasi air. Ketiganya menjaga $FK > 1,5$ dan meningkatkan kestabilan jangka panjang.

Kondisi geoteknik pada STA 4 menunjukkan bahwa kestabilan lereng dipengaruhi oleh variasi litologi, di mana lapisan batupasir bagian atas cenderung mengalami *toppling*, sedangkan batulempung di bawahnya berpotensi longsor rotasional akibat sifat plastisnya. Batubara di antaranya memiliki kohesi tinggi (100 kPa) namun tetap rentan terhadap pelapukan. Untuk mengatasi hal tersebut, sistem *soil nailing* diterapkan sebagai penguat internal yang menembus seluruh lapisan batuan dan menyalurkan gaya tarik ke zona stabil, didukung oleh *wiremesh* yang menahan erosi serta *shotcrete* yang menutup permukaan dan mencegah infiltrasi air. Kombinasi ketiga sistem ini meningkatkan kekuatan geser total, mengendalikan deformasi, dan menjaga kestabilan lereng terhadap pengaruh air maupun cuaca.

5. Kesimpulan

Penelitian ini memberikan hasil kesimpulan mengenai kerentanan longsor dan perencanaan mitigasi geoteknik pada akses Jalan Merdeka–Damai, Kota Samarinda. Penilaian tingkat kerentanan longsor telah dilakukan menggunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP) berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) melalui integrasi empat parameter utama, yaitu kemiringan lereng (35%), tutupan lahan (30%), litologi (20%), dan curah hujan (15%). Hasil pemodelan spasial menghasilkan peta kerentanan dengan lima kelas tingkat kerawanan, di mana lokasi-lokasi titik pengamatan berada pada kelas rawan hingga sangat rawan untuk STA 1, STA 2, dan STA 3, serta cukup rawan hingga agak rawan pada STA 4. Temuan ini menunjukkan bahwa kemiringan lereng curam, tutupan lahan terbuka, dan litologi pelapukan lemah merupakan faktor paling dominan dalam menentukan risiko longsor.

Analisis stabilitas lereng secara geoteknik menggunakan perangkat lunak GeoSlope/Slide 6.0 berhasil menunjukkan kondisi aktual ketidakstabilan lereng pada keempat titik pengamatan dalam kondisi eksisting. Nilai Factor of Safety (FK) yang diperoleh pada masing-masing titik adalah STA 1 (FK = 0,824), STA 2 (FK = 0,807), STA 3 (FK = 0,875), dan STA 4 (FK = 0,962). Nilai FK < 1 pada seluruh titik menunjukkan kondisi tidak stabil dan berpotensi mengalami kegagalan lereng kapan saja pada kondisi cuaca ekstrem atau beban tambahan. Mekanisme longsor yang teridentifikasi adalah longsor busur (rotational slide) pada STA 1, STA 2, dan STA 4, serta longsor bidang (planar slide) pada STA 3.

Berdasarkan hasil analisis geoteknik tersebut, penelitian ini berhasil merancang rekomendasi mitigasi teknis yang sesuai kondisi lapangan dan disesuaikan dengan karakteristik geologi setiap titik. Solusi yang dirancang meliputi penggunaan kombinasi soil nailing + shotcrete pada STA 1, retaining wall + soil nailing pada STA 2, soil nailing + wiremesh pada STA 3, dan soil nailing + wiremesh + shotcrete pada STA 4. Seluruh model mitigasi yang diusulkan mampu meningkatkan nilai FK menjadi lebih dari ambang batas stabilitas (FK > 1,3) dengan estimasi efektivitas peningkatan kestabilan sebesar $\pm 72\%$ pada STA 1, $\pm 82\%$ pada STA 2, $\pm 78\%$ pada STA 3, dan $\pm 86\%$ pada STA 4. Hasil ini menegaskan bahwa pendekatan mitigasi berbasis rekayasa geoteknik dapat meningkatkan performa struktural lereng dan mengurangi risiko keruntuhan.

6. Daftar Pustaka

- Atkinson, J. (2007). The mechanics of soils and foundations. CRC Press.
- Amin Syam, M., & Putri, R. I. (2022). Identifikasi bidang gelincir longsor menggunakan metode geolistrik resistivitas. Jurnal Teknik Geologi.
- Amin Syam, M., Umar, H., & Heriyanto. (2020). Analisis kekuatan massa batuan menggunakan kriteria Hoek-Brown pada batugamping. Jurnal Teknik Geologi.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB). (2012). Pedoman umum pengkajian risiko bencana. BNPB.
- Budianta, W. (2020). Pemetaan kawasan rawan tanah longsor dengan metode Analytical Hierarchy Process (AHP). Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat UGM.
- Craig, R. F. (2004). Craig's soil mechanics. Spon Press.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In Landslides: Investigation and Mitigation. National Research Council.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). Principles of geotechnical engineering. Cengage Learning.
- Hardiyatmo, H. C. (2010). Mekanika tanah I. Gadjah Mada University Press.
- Hidayat, R., & Wibowo, A. (2019). Perencanaan dinding penahan tanah pada lereng rawan longsor. Jurnal Rekayasa Sipil Universitas Brawijaya.
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). The landslide handbook: A guide to understanding landslides. U.S. Geological Survey.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). Landslide classification. Engineering Geology.
- Ifnie, S., et al. (2022). Korelasi UCS dan Point Load Index batupasir–batulempung Formasi Pulau Balang, Kalimantan Timur.
- Isnani, A. N., Putranto, T. T., & Trisnawati, D. (2020). Analisis kerawanan longsor berbasis AHP dan SIG. Jurnal Geosains Indonesia.
- Kurniawan, H., & Setiawan, B. (2020). Stabilisasi lereng menggunakan wiremesh dan rock bolt. Jurnal Teknik Sipil ITS.
- Pratama, D., et al. (2021). Penggunaan shotcrete pada stabilisasi lereng tebing jalan. Jurnal Geoteknik Indonesia.
- Raharjo, T., & Fitria, D. (2019). Pemodelan kerentanan longsor berbasis AHP dan GIS. Jurnal Geografi Indonesia.

Satyana, A. H., Nugroho, D., & Surantoko. (1999). Tectonic controls on hydrocarbon habitat of the Kutai Basin, East Kalimantan. Proceedings of the Indonesian Petroleum Association, 27th Annual Convention.

Silalahi, A. B., Trides, T., Nugroho, W., Oktaviani, R., & Pontus, A. J. (2023). Korelasi UCS dan Point Load Index batupasir–batulempung Formasi Pulau Balang.

Sutikno, S., et al. (2020). *Analisis stabilitas lereng dengan perkuatan soil nailing pada tanah lempung*. Jurnal Teknik Sipil UNDIP.

Umar, H., Heriyanto, H., & Putri, R. I. (2021). Analisis bahaya longsor menggunakan metode AHP berbasis SIG di Kutai Kartanegara. Jurnal Teknik Geologi.