



DOI: <https://doi.org/10.38035/jsmd.v4i3>
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Analisis Kinematik dan Pemetaan Spasial Potensi Pembentukan Wedge Berbasis GIS pada Terowongan Bekas Tambang Mangan Kalilingseng

Komang Marsanda Dewi Laksmi¹, Rochsyid Anggara²

¹Program Studi Teknik Pertambangan, Jurusan Teknik Pertambangan, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Indonesia, kmngmrsnd@gmail.com

²Program Studi Teknik Pertambangan, Jurusan Teknik Pertambangan, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Indonesia, rochsyid.anggara@upnyk.ac.id

Corresponding Author: kmngmrsnd@gmail.com¹

Abstract: *The Kalilingseng Former Manganese Mine Tunnel is utilized as a geotourism site, but quasi-continuum rock mass quality assessments are insufficient to ensure underground safety against local failure hazards. This study aims to analyze wedge formation potential, evaluate stability characteristics, and map their spatial distribution using a geographic information system. A quantitative applied method was employed through scanline mapping data acquisition, rock mass classification, kinematic analysis using Dips, three dimensional modeling with UnWedge, and chainage-base spatial mapping in QGIS software. Results identified three dominant joint sets intersecting to form tetrahedral wedges. Three-dimensional modeling revealed that Segmen 1 and Segmen 5 are in the most critical condition due to potential roof falling wedges with a zero factor of safety and maximum wedge volume of 0,830 m³. Meanwhile, Segmen 2,3, and 4 are categorized as unstable due to potential wall wedge sliding. The novelty of this study lies in the linear chainage-based geotechnical spatial mapping method integrating three-dimensional kinematic analysis for continuous wedge hazard zoning. This study provides practical contributions to prioritizing rock bolt reinforcement and establishing safe access boundaries for geotourism visitors.*

Keyword: *Geotourism, Kinematic Analysis, QGIS Spatial Mapping, Rock Mass Classification, Wedge failure*

Abstrak: Terowongan Bekas Tambang Mangan Kalilingseng dimanfaatkan sebagai objek geowisata, namun penilaian kualitas massa batuan secara kuasi-kontinum belum cukup untuk menjamin keselamatan ruang bawah tanah dari bahaya keruntuhan lokal. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi pembentukan baji, karakteristik kestabilan, serta memetakan persebarannya secara spasial berbasis sistem informasi geografis. Penelitian menggunakan metode kuantitatif terapan melalui akuisisi data *scanline mapping*, klasifikasi massa batuan, analisis kinematik dengan perangkat lunak Dips, pemodelan tiga dimensi dengan UnWedge, dan pemetaan spasial berbasis *chainage* pada perangkat lunak QGIS. Hasil penelitian mengidentifikasi tiga kelompok kekar utama yang saling berpotongan membentuk baji *tetrahedral*. Pemodelan tiga dimensi menunjukkan bahwa Segmen 1 dan Segmen 5 memiliki kondisi paling kritis akibat potensi *falling wedge* pada atap terowongan dengan faktor

keamanan nol dan volume baji maksimum mencapai $0,830 \text{ m}^3$. Sementara itu, Segmen 2,3, dan 4 berada pada kategori tidak stabil akibat potensi *wedge sliding* pada dinding terowongan. Kebaruan penelitian ini terletak pada metode pemetaan spasial geoteknik berbasis *chainage* linier yang memadukan analisis kinematik tiga dimensi untuk zonasi berbahaya baji secara kontinu. Penelitian ini memberikan kontribusi praktis dalam menentukan prioritas perkuatan baut batuan dan batas akses aman bagi pengunjung geowisata.

Kata Kunci: Geowisata, Analisis Kinematik, Pemetaan Spasial QGIS, Klasifikasi Massa Batuan, Keruntuhan Baji

PENDAHULUAN

Terowongan bekas tambang memiliki jejak kegiatan penambangan seperti bentuk bukaan dan singkapan batuan yang dapat dimanfaatkan sebagai objek wisata dan studi wisata. Pemanfaatan terowongan sebagai objek geowisata ini dapat menempatkan pengunjung pada ruang bawah tanah yang sudah lama tidak beroperasi. Kondisi terowongan tersebut tentu saja harus dikaji kembali berdasarkan keamanannya, sehingga tidak membahayakan pengunjung. Pada kondisi ini, terowongan mungkin saja dapat runtuh kapan saja, untuk itu diperlukan kajian geomekanika guna menentukan bagian terowongan yang dapat diakses pengunjung dengan aman, bagian yang memerlukan pemeriksaan lanjutan, serta bagian yang perlu dibatasi sebelum diakses untuk umum (Aguilar-Aguilar et al., 2023).

Goa Kalilingseng merupakan salah satu goa bekas tambang yang dimanfaatkan sebagai geowisata dan sering dikunjungi untuk studi wisata atau penelitian lainnya. Goa Kalilingseng terletak di Kelurahan Karangsari, Kecamatan Pengasih, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta dengan komoditas utama bijih mangan. Penelitian terdahulu memperoleh nilai *Rock Mass Rating* sebesar 65 dengan kelas II dan nilai *strength factor* lebih dari 1,5 pada model yang digunakan. Hasil dari penelitian tersebut memberikan gambaran umum bahwa terowongan memiliki massa batuan berada dalam kondisi baik pada lokasi pengamatan (Arindry et al., 2023). Namun, penelitian terkait kekuatan massa batuan belum cukup untuk memberikan gambaran terkait bagian-bagian terowongan yang aman untuk dikunjungi. Penilaian berbasis kelas massa batuan dan model kontinu tetap perlu dilengkapi dengan kajian struktur geologi karena blok pada bukaan terowongan dapat terbentuk dari perpotongan beberapa bidang diskontinu walaupun kondisi batuan sudah dinyatakan baik.

Bidang diskontinuitas dapat mengendalikan adanya bentuk, ukuran, dan kemungkinan pergerakan blok di sekitar lubang bukaan. Dua atau lebih bidang diskontinu yang saling berpotongan dengan permukaan bukaan dapat membentuk *wedge tetrahedral* pada dinding, atap, atau muka terowongan. Potensi pergerakannya dapat dipengaruhi oleh orientasi bidang diskontinu, garis perpotongan, arah sumbu terowongan, geometri bukaan, dan kuat geser bidang diskontinuitas. Kajian tambang bawah tanah juga dapat menunjukkan bahwa analisis balik *wedge* perlu mempertimbangkan kondisi geometri blok dan karakteristik bidang pembatas untuk menjelaskan mekanisme ketidakstabilan yang diamati (Xiroudakis et al., 2024).

Kombinasi diskontinuitas secara geometris dapat dilakukan dengan analisis kinematik dengan proyeksi stereografis, sehingga dapat dilihat potensi terjadinya longsoran bidang, longsoran baji, atau penggulingan. Analisis kinematik ini dapat menunjukkan potensi Bergeraknya bidang diskontinuistas, bukan peluang runtuh ataupun faktor keamanan. Namun, untuk menghitung volume, berat, arah gerak, dan faktor keamanan *wedge* pada bentuk bukaan yang sebenarnya diperlukan pemodelan tiga dimensi. *Software UnWedge* digunakan untuk pemodelan deterministik sehingga dapat melihat bentuk blok dari dua atau lebih bidang diskontinuitas dan permukaan galian. Hasil pemodelan ini kemudian dievaluasi tiap kombinasi bidang terhadap orientasi sumbu dan sifat kuat gesernya (Rockscience, 2026).

Perubahan orientasi terowongan dapat menyebabkan satu *family* diskontinuitas memberikan respons yang berbeda pada setiap ruas terowongan, sehingga penggunaan satu orientasi bukaan untuk seluruh lokasi dapat mengaburkan bagian yang paling kritis. Penelitian Goa Kalilingseng ini memuat tujuh *scanline* yang terikat pada titik kontrol poligon 1 sampai poligon 7, dengan perubahan azimuth *centerline* pada beberapa ruas. Setiap pengamatan perlu ditempatkan kembali terhadap *chainage* dan sisi bukaan agar hasil analisis dapat dibaca sebagai lokasi, bukan hanya sebagai persentase pada stereonet.

Posisi terowongan, *chainage*, data *scanline*, serta atribut hasil analisis *wedge* dapat digabungkan dalam sistem informasi geografis. Pemodelan tiga dimensi pada terowongan telah digunakan untuk menggabungkan keadaan geologi dengan keputusan teknis pada lokasi tertentu (Wang, et al., 2024). Pada penelitian ini, konsep tersebut diterapkan dalam skala lorong dengan menjadikan *centerline* sebagai acuan linear. Hasil dari analisis ditempatkan pada *chainage* titik tengah tiap *scanline* yang kemudian disajikan sebagai segmen beratribut untuk menunjukkan variasi potensi pembentukan *wedge* disepanjang terowongan.

Penelitian terdahulu di Goa Kalilingseng (seperti Arindry et al., 2023) menghasilkan penilaian bahwa massa batuan terowongan secara umum berada dalam kondisi baik (*Good Rock*, RMR = 65) dengan *strength factor* kontinum di atas 1,25. Namun, analisis kontinum makro tersebut memiliki keterbatasan mendasar karena tidak memperhitungkan keberadaan blok batuan terpisah (*structural blocks*) yang terbentuk akibat persilangan bidang diskontinuitas. Celah penelitian (*research gap*) terletak pada belum tersedianya kajian yang mengintegrasikan analisis kinematik per orientasi bukaan, pemodelan 3D baji deterministik, validasi visual di lapangan, dan pemetaan berbasis *chainage* linier dalam satu basis data GIS. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan *joint sets*, mengidentifikasi kombinasi pembentukan baji, menilai nilai kuantitatif baji (FS dan volume), serta menyusun peta zonisasi bahaya baji berbasis GIS sebagai dasar pengelolaan keselamatan geowisata.

METODE

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif terapan dengan analisis geometri diskontinuitas, pemodelan blok tiga dimensi, dan analisis spasial. Objek yang diteliti berupa lubang bukaan bekas tambang bijih mangan di Goa Kalilingseng, Kabupaten Kulon Progo. Pengambilan data awal dilakukan dengan pengamatan lapangan dan pengambilan data *joint mapping* yang dilakukan pada tujuh titik lokasi *scanline* dan ruas *centerline* yang mewakili orientasi terowongan. Pengukuran topografi digunakan untuk memetakan titik koordinat terowongan dengan lima segmen representatif sepanjang 123,31 meter.

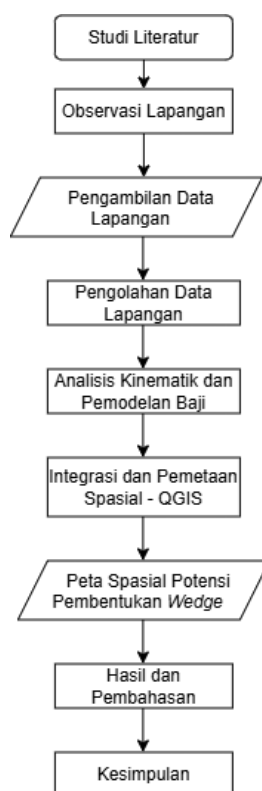
Pengamatan dan pengambilan data menghasilkan data primer yang terdiri dari 160 pengukuran diskontinuitas, panjang serta sisi pemasangan tujuh *scanline*, koordinat dan elevasi titik poligon 1 sampai poligon 7, jarak kiri dan kanan dinding terhadap sumbu menggunakan alat *Laser Distance Meter* (LDM), serta dimensi penampang terowongan. Pada kegiatan *joint mapping*, diperoleh data *dip*, *dip direction*, kondisi kekar berupa spasi kekar, kemenerusan, kekasaran, pelapukan, lebar celah, isian dan laluan. Selain itu, data sekunder berupa peta administrasi dan geologi regional juga digunakan sebagai acuan awal penelitian dan pengamatan lapangan. Sampel batuan utuh (*intact rock*) diambil untuk pengujian laboratorium guna menentukan sifat fisik dan mekanik batuan, yang mencakup uji *Point Load Index* (PLI) dan *Uniaxial Compressive Strength* (UCS).

Pengolahan data diawali dengan mengklasifikasikan kualitas massa batuan menggunakan tiga sistem pembobotan geomekanika, yaitu *Rock Mass Rating* (RMR, Bieniawski 1989), *Q-System* (Barton 1974), dan *Rock Structure Rating* (RSR, Wickham 1972). Data orientasi diskontinuitas kemudian dianalisis secara kinematik menggunakan perangkat lunak Rocscience Dips. Perangkat lunak ini digunakan untuk mengidentifikasi kelompok kekar utama (*Joint Sets*) dan potensi modulus keruntuhan. Pemodelan *wedge* tiga dimensi (3D) dan perhitungan Faktor Keamanan (*Factor of Safety*/FS) dilakukan pada perangkat lunak

Rocscience UnWedge. Pada perangkat lunak ini didapatkan volume *wedge* (m^3), bobot *wedge* (MN), serta tipe runtuh (*falling wedge* dan *wedge sliding*) pada atap maupun dinding terowongan.

Parameter input spesifik yang digunakan dalam simulasi UnWedge meliputi bobot isi batuan sebesar $23,62 \text{ kN/m}^3$, sudut geser dalam bidang kekar sebesar 30° , dan kohesi kekar sebesar 0 kPa. Penetapan kohesi 0 kPa dan sudut geser dalam 30° didasarkan pada pertimbangan geomekanika untuk memodelkan skenario paling kritis (*worst-case scenario*) pada bukaan geowisata yang telah lama terbuka dan mengalami pelapukan, di mana material isian kekar yang lunak tererosi sehingga ketahanan geser baji murni mengandalkan gesekan antar-permukaan kekar dan pengekanan gravitasi tanpa perekat alami (*unbound joints*). Untuk memastikan keandalan hasil pemodelan, dilakukan validasi lapangan melalui teknik pencocokan observasi visual (*field observational cross-check*). Lokasi baji kritis yang diprediksi oleh pemodelan diverifikasi secara langsung di terowongan dengan mencocokkan koordinat *chainage* dan posisi perimeter terhadap keberadaan jejak rontokan atap (*roof-fall scars*), celah rekahan terbuka (*open aperture*), serta akumulasi bongkah rontokan batuan di lantai terowongan.

Tahap akhir metodologi adalah integrasi dan pemetaan spasial menggunakan perangkat lunak QGIS. Data koordinat presisi stasiun pengukuran poligon (Sistem Proyeksi *Universal Transverse Mercator* / UTM Zone 49S WGS 84) digabungkan dengan atribut tingkat kestabilan *wedge* per segmen. Hasil akhir didapatkan berupa Peta Spasial Potensi Pembentukan *Wedge* dengan zonasi kategori kestabilan (*Critical* untuk FS = 0,000 / *falling wedge* dan *Unstable* untuk *wedge sliding*) sebagai acuan penentuan rekomendasi teknis penyanggaan geoteknik untuk pengembangan geowisata terowongan. Adapun bagan alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Sumber: Data Pribadi

Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Massa Batuan dan Geometri Terowongan

Pengambilan data lapangan menghasilkan data pengukuran dimensi geometri menggunakan *Laser Distance Meter* (LDM) dan pemetaan poligon di sepanjang 123,31 m *trase* Terowongan Kalilingseng. Hasil pemetaan menunjukkan adanya variasi dimensi dan perubahan arah *azimuth* sumbu terowongan (*centerline*). Berdasarkan perbedaan orientasi bukaan tersebut, *trase* terowongan dibagi menjadi lima segmen penelitian (S1 hingga S5) dengan stasiun pengamatan dari poligon P1 hingga P7. Segmen 1 (P7-P6) memiliki panjang 52,00 m dengan *azimuth* 252,53°, Segmen 2 (P6-P5) sepanjang 19,00 m dengan *azimuth* 13,25°, Segmen 3 (P5-P4) sepanjang 11,15 m dengan *azimuth* 289,11°, Segmen 4 (P4-P3) sepanjang 10,00 m dengan *azimuth* 355,58°, dan Segmen 5 (P3-P1) sepanjang 31,16 m dengan *azimuth* rata-rata 5,64°. Hasil uji laboratorium terhadap sampel *intact rock* menunjukkan nilai *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) rata-rata sebesar 13,70 Mpa untuk batuan sampling (*country rock*) dan 27,06 Mpa untuk bijih mangan (*ore*), dengan rata-rata gabungan sebesar 20,38 Mpa yang mengindikasikan kualifikasi batuan agak lemah (*weak rock*).

Evaluasi geomekanika dilakukan menggunakan tiga sistem klasifikasi massa batuan yaitu *Rock Mass Rating* (RMR), *Q-System*, dan *Rock Structure Rating* (RSR) menghasilkan klasifikasi nilai massa batuan yang dirangkum pada Tabel 1. Nilai RMR berkisar antara 54 hingga 62, yang menempatkan Segmen 1, 3, dan 5 pada kelas III (*Fair Rock*) serta Segmen 2 dan 4 pada kelas II (*Good Rock*). Sementara itu, klasifikasi berdasarkan *Q-System* menghasilkan nilai Q sebesar 9,78 hingga 21,70 yang secara umum mengategorikan seluruh segmen dalam kelas *Good Rock*. Penilaian empiris RSR menghasilkan nilai 53 hingga 65. Meskipun klasifikasi massa batuan secara kuasi-kontinu memberikan gambaran bahwa terowongan secara umum berada dalam kondisi stabil hingga sedang, pendekatan empiris ini tidak mampu mendeteksi potensi keruntuhan lokal yang dikendalikan oleh geometri bidang diskontinuitas secara terpisah.

Tabel 1. Ringkasan Karakteristik Geometri dan Klasifikasi Massa Batuan Terowongan Kalilingseng

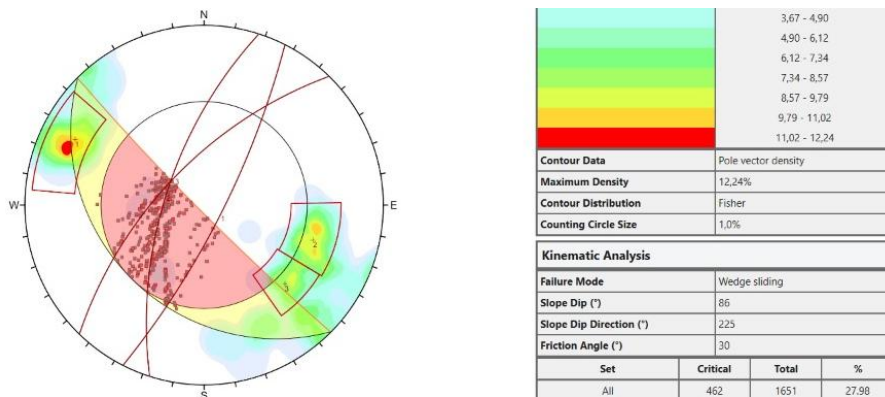
Segmen	Stasiun	Panjang (m)	<i>Azimuth</i> (°)	RQD (%)	RMR (Bieniawski)	Kelas RMR	Nilai Q (Barton)	Nilai RSR
S1	P7-P6	52,00	252,53	72,43	58	<i>Fair Rock</i>	18,11	53
S2	P6-P5	19,00	13,25	86,12	62	<i>Good Rock</i>	10,77	65
S3	P5-P4	11,15	289,11	81,11	54	<i>Fair Rock</i>	20,28	59
S4	P4-P3	10,00	355,58	86,80	61	<i>Good Rock</i>	21,70	61
S5	P3-P1	31,16	5,64	78,23	62	<i>Good Rock</i>	9,78	65

Sumber: Data Lapangan

Analisis Kinematik dan Identifikasi Set Diskontinuitas

Pengolahan data *scanline mapping* di lapangan dilakukan menggunakan proyeksi stereografis pada perangkat lunak Rocscience Dips untuk mengidentifikasi keberadaan tiga kelompok kekar utama (*Joint Set*) dominan. Kombinasi orientasi antar-kelompok kekar ini saling berpotongan dengan permukaan galian terowongan dan membentuk bidang pembatas baji (*wedge*). Pada Segmen 1, terdapat tiga *joint set* utama yaitu J1 (54,86°/345,53°), J2 (72,63°/197,43°), dan J3 (73,01°/73,36°), sedangkan pada Segmen 5 terdapat tiga *joint set* utama yaitu J1 (78,00°/117,00°), J2 (65,00°/288,00°), dan J3 (65,00°/314,00°) sehingga berpotensi besar membentuk *wedge*. Perubahan *azimuth centerline* terowongan antar segmen secara signifikan mengubah sudut perpotongan antara sumbu penggalian dan orientasi bidang

diskontinuitas. Hal ini membuktikan bahwa suatu *family* diskontinuitas yang sama memberikan respons kinematik yang berbeda ketika orientasi penggalan terowongan berubah.



Sumber: Pengolahan Data Pribadi

Gambar 2. Analisis Kinematik pada Perangkat Lunak Dips 9.0

Pemodelan Tiga Dimensi *Wedge* dan Evaluasi Faktor Keamanan

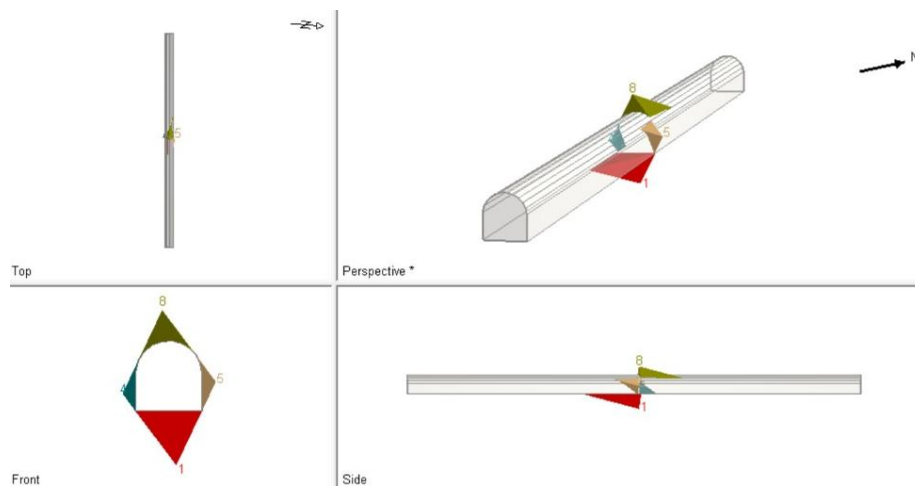
Pemodelan deterministik 3D menggunakan perangkat lunak Rocscience UnWedge dilakukan untuk menghitung geometri *wedge*, volume *wedge* (m³), bobot *wedge* (MN), serta nilai faktor keamanan (*Factor of safety* / FS) pada kondisi tanpa penyangga (*unsupported condition*). Tabel 2 menyajikan hasil pemodelan baji paling kritis pada setiap segmen terowongan.

Tabel 2. Hasil Pemodelan 3D *Wedge* Kritis Menggunakan Perangkat Lunak UnWedge

Segmen	Critical Wedge	Volume (m ³)	Bobot (MN)	Faktor Keamanan	Failure Mode	Sisi Terpengaruh
S1	Roof Wedge	0,830	0,022	0,000	Falling Wedge	Atap Terowongan
S2	Near End Wedge	0,241	0,006	0,331	Wedge Sliding (J2- J3)	Dinding / Muka
S3	Near End Wedge	0,149	0,004	0,073	Wedge Sliding (J1- J2)	Dinding / Muka
S4	Lower Right Wedge	0,006	0,000	0,386	Wedge Sliding on Joint 3	Dinding Kanan
S5	Roof Wedge	0,147	0,004	0,000	Falling Wedge	Atap Terowongan

Sumber: Pengolahan Data Pribadi

Hasil dari pemodelan menggunakan perangkat lunak UnWedge menunjukkan bahwa Segmen 1 dan Segmen 5 memiliki kondisi runtuh paling kritis dengan nilai FS 0,000 pada atap terowongan (*Roof Wedge*). Mekanisme keruntuhan pada kedua segmen ini adalah jatuh bebas (*Falling Wedge*) akibat gaya gravitasi yang bekerja langsung pada blok *tetrahedral* tanpa adanya tahanan geser bidang. *Wedge* atap pada Segmen 1 dan 5 memiliki volume maksimum berturut-turut sebesar 0,830 m³ dan 0,147 m³ dengan bobot berturut-turut sebesar 0,022 MN dan 0,004 MN. Sementara itu, Segmen 2,3, dan 4 mengalami *failure mode* keruntuhan gelincir (*wedge sliding*) sepanjang garis berpotongan bidang diskontinuitas dengan nilai FS berturut-turut sebesar 0,331, 0,073, dan 0,386 (FS < 1,000). Hasil ini menunjukkan bahwa seluruh segmen terowongan berada pada kondisi tidak stabil secara lokal apabila tanpa perkuatan. Pemodelan 3D pada perangkat lunak Unwedge dapat dilihat pada Gambar 3.



Sumber: Pengolahan Data Pribadi

Gambar 3. Pemodelan 3D pada Perangkat Lunak UnWedge

Integrasi Pemetaan Spasial Berbasis GIS dan Rekomendasi Penyanggaan

Integrasi data pada posisi terowongan, *chainage*, dan atribut hasil analisis UnWedge ke dalam perangkat lunak QGIS menghasilkan Peta Spasial Potensi Pembentukan *Wedge* Terowongan Kalilingseng. Pemetaan spasial ini membagi *trase* terowongan menjadi dua kategori risiko utama, yaitu :

1. Zona Kritis (*Critical Zone*) : Meliputi Segmen 1 (ST A 0+071,31 – 0+123,31) dan Segmen 5 (ST A 0+000 – 0+031,16) yang ditandai dengan potensi *Roof Falling Wedge* (FS = 0,000).
2. Zona Tidak Stabil (*Unstable Zone*) : Meliputi Segmen 2,3, dan 4 (ST A 0+031,16 – 0+071,31) yang didominasi oleh potensi *wedge sliding* pada dinding terowongan ($0,073 \leq FS \leq 0,386$).

Pemetaan Spasial didukung oleh peta hasil akhir yang tersusun atas kondisi *wedge* yang terbentuk pada atap maupun dinding terowongan. Peta spasial ini digunakan untuk mempermudah melihat zona terowongan yang perlu diwaspadai sebelum terowongan Kalilingseng dibuka untuk umum. Peta Spasial Potensi Pembentukan *Wedge* Terowongan Kalilingseng dapat dilihat pada Gambar 4.



Sumber: Pengolahan Data Pribadi

Gambar 4. Peta Spasial Potensi Pembentukan Wedge Terowongan Kalilingseng

Ditemukannya kontradiksi antara penilaian kualitas massa batuan secara kuasi-kontinum dan kestabilan baji lokal memberikan pemahaman geomekanika penting pada terowongan ini. Berdasarkan klasifikasi RMR (54 – 62) dan *Q-System* (9,78 – 21,70), seluruh segmen tergolong dalam kelas fair rock hingga good rock. Namun, pemodelan 3D UnWedge mengindikasikan adanya baji atap (*roof wedge*) dengan faktor keamanan nol ($FS = 0,000$) pada segmen 1 dan segmen 5. Secara geomekanika, kontradiksi ini terjadi karena RMR dan *Q-System* meratakan (*averaging*) parameter massa batuan pada skala makro dengan mengasumsikan batuan saling mengunci (*interlocking*). Sebaliknya, analisis baji 3D berbasis *Block Theory* mengevaluasi diskontinuitas sebagai bidang diskrit. Ketika tiga bidang kekar berpotongan membentuk blok *tetrahedral* sempurna di atap terowongan, gravitasi bekerja vertikal pada pusat massa blok sehingga blok terlepas secara bebas (*falling wedge*) tanpa sempat memicu tahanan geser bidang. Hasil pemodelan ini tervalidasi di lapangan melalui teknik *field observational cross-check*, yang ditunjukkan oleh ditemukannya jejak rontokan atap (*roof-fall scar*) serta akumulasi bongkah rontokan baji pada segmen 1 (ST A 0+071,31 – 0 + 123,31).

Evaluasi hasil akhir dari *Q-System* ($Span/ESR \leq 1,51$) dan RMR mengindikasikan bahwa terowongan secara umum tidak membutuhkan penyanggaan berat (*no support required*), adanya potensi *wedge failure* lokal menuntut intervensi geoteknik spesifik. Untuk zonasi *critical* (S1 dan S5), direkomendasikan pemasangan *spot bolting / rockbolt* tipe *fully grouted* dengan panjang 2,0 – 3,0 m pada terowongan guna mengunci blok baji yang menggantung, disertai pelapisan *shotcrete* tipis (50 mm) untuk mencegah pelapukan batuan. Pada zona *unstable* (S2, S3 dan S4), penanganan difokuskan pada perkuatan dinding menggunakan baut batuan lokal.

Temuan utama (*novelty*) dari penelitian ini adalah keberhasilan menyusun metode integrasi pemetaan spasial geoteknik berbasis *chainage* linier yang menghubungkan analisis kinematik 3D dengan zona bahaya *wedge* secara kontinu pada terowongan geowisata.

Penelitian terdahulu hanya berfokus pada penilaian kualitas massa batuan secara makro yaitu nilai RMR = 65 dan pemodelan 2D yang menyimpulkan terowongan dalam kondisi aman. Penelitian ini membuktikan bahwa penelitian massa batuan secara kuasi-kontinum tidak cukup untuk menjamin keselamatan ruang bawah tanah, karena bahaya keruntuhan lokal justru dikendalikan oleh interaksi geometri antara orientasi bukaan terowongan dan persilangan bidang diskontinuitas. Pendekatan spasial berbasis GIS ini memberikan kontribusi praktis berupa peta acuan presisi tinggi bagi pengelola geowisata dan pemerintah daerah dalam menentukan prioritas zonasi aman bagi pengunjung serta kebutuhan perkuatan geoteknik sebelum terowongan difungsikan secara komersial.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menjawab tantangan evaluasi kestabilan terowongan bekas tambang geowisata dengan mengintegrasikan analisis kinematik, pemodelan tiga dimensi (3D), dan pemetaan spasial berbasis *Geographic Information System* (GIS) di Terowongan Bekas Tambang Mangan Kalilingseng. Berdasarkan pengolahan data lapangan berupa *scanline mapping*, teridentifikasi adanya tiga kelompok kekar utama (*joint sets*) dominan, yaitu J1 ($54,86^\circ/345,53^\circ$), J2 ($72,63^\circ/197,43^\circ$), dan J3 ($70^\circ/70^\circ$). Kombinasi antar-kelompok kekar ini berpotensi kuat membentuk *wedge* tertrahedral pada galian terowongan, di mana perpotongan J1-J2 mengendalikan pembentukan *wedge* pada atap terowongan (*roof wedge*), sedangkan kombinasi J2-J3 dan J1-J3 mengendalikan *wedge* pada dinding (*wall wedge*). Evaluasi karakteristik *wedge* menunjukkan bahwa perubahan *azimuth centerline* terowongan menghasilkan variasi tingkat keruntuhan yang signifikan, meliputi Segmen 1 (S1) dan Segmen 5 (S5) memiliki kondisi paling kritis dengan terbentuknya *roof falling wedge* dengan faktor keamanan (FS) sebesar 0,000 dan volume *wedge* yang terbentuk mencapai $0,830 \text{ m}^3$, sementara Segmen 2,3, dan 4 berada pada kategori tidak stabil akibat potensi *wedge sliding* ($0,073 \leq \text{FS} \leq 0,386$). Akurasi pemodelan 3D UnWedge dengan parameter input spesifik (Bobot isi = 23,62 kN/m^3 , sudut geser dalam = 30° , kohesi = 0 kPa) tervalidasi secara nyata di lapangan melalui teknik *field observational cross-check*, yang ditunjukkan oleh ditemukannya jejak rontokan atap (*roof-fall scar*) secara akumulasi rontokan batuan baji di lantai terowongan pada segmen 1 (ST A 0+071,31 – 0+123,31). Fenomena ini mempertegas logika geomekanika bahwa metode RMR meratakan parameter secara makro-kontinum, sementara keruntuhan baji dikendalikan oleh bidang diskrit lokal di mana gravitasi melepas blok *tetrahedral* tanpa memicu tahanan geser bidang (FS = 0,000). Peta persebaran zona potensi *wedge* berbasis GIS yang disusun berhasil memberikan zonasi kerentanan spasial secara presisi sepanjang 123,31 m *trase* terowongan, yang menjadi kontribusi nyata bagi sains geoteknik bawah tanah bahwa penilaian massa batuan kuasi-kontinum seperti RMR perlu dilengkapi dengan analisis ketidakstabilan blok lokal untuk menentukan batas aman akses geowisata dan prioritas *rockbolt*.

Keterbatasan

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan dalam pelaksanaannya. Pertama, penelitian ini hanya berfokus pada satu objek bukan bawah tanah (Terowongan Kalilingseng) pada periode observasi tertentu sehingga hasilnya belum dapat digenerakisasikan untuk seluruh terowongan bekas tambang dengan kondisi geologi yang berbeda. Kedua, variabel analisis geomekanika yang digunakan masih terbatas pada pendekatan deterministik berdasarkan data *scanline mapping* dan sifat fiik-mekanik batuan utuh, belum mempertimbangkan variabilitas probabilistik parameter geser bidang secara penuh. Ketiga, pemodelan 3D dan analisis spasial yang dilakukan belum sepenuhnya mensimulasikan dinamika perubahan tegangan induksi jangka panjang atau efek pelapukan batuan akibat perubahan kelembapan udara terowongan

secara komprehensif. Oleh karena itu, hasil penelitian ini perlu diinterpretasikan sesuai dengan ruang lingkup geoteknik lokal lokasi penelitian.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas cakupan objek penelitian pada berbagai bukaan bawah tanah geowisata lainnya, menambah jumlah lintasan *scanline*, serta memperpanjang periode pemantauan deformasi terowongan. Selain itu, penggunaan pendekatan analisis probabilistik (seperti *Probabilistik Wedge Analysis*), pemodelan numerik 3D diskontinum (seperti *District Element Method / DEM*), atau integrasi sensor *internet of things* (IoT) untuk pemantauan pergerakan blok secara *real-time* sangat direkomendasikan agar memperoleh pemahaman geomekanika yang lebih mendalam dan komprehensif.

Kontribusi Author

Seluruh penulis berkontribusi secara signifikan terhadap penelitian ini. Kontribusi meliputi konseptualisasi penelitian, penyusunan kerangka teori, pengumpulan data lapangan, analisis data dan pemodelan pada perangkat lunak, interpretasi hasil spasial, penulisan naskah, revisi ilmiah, serta persetujuan akhir terhadap naskah yang akan dipublikasikan. Seluruh penulis menyatakan telah membaca dan menyetujui versi final artikel ini.

AI Disclosure Statement

Penulis menyatakan bahwa naskah penelitian ini disiapkan, diteliti, ditulis, dan disunting secara mandiri tanpa menggunakan bantuan teknologi atau teknik kecerdasan buatan (AI).

Acknowledgment

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh lembaga dan orang yang terlibat dalam mendukung dan membersamai penulis selama melakukan penelitian. Terima kasih juga kepada seluruh instansi yang turut memfasilitasi jalannya penelitian hingga pengolahan data sehingga karya ini dapat dipublikasikan.

REFERENSI

- Aguilar-Aguilar, A., Rincón-García, N., & Gómez-Espina, R. (2023). Geomechanical assessment and safety evaluation for the conversion of abandoned underground mines into geotourism sites. *Safety Science*, 158, 105980.
- Arindry, A. P. P., Saptono, S., Nagara, B. D., Koesnaryo, S., & Haryanto, D. (2023). Analisis diskontinuitas stabilitas terowongan bekas bijih mangan Kalilingseng Kulon Progo berdasarkan klasifikasi massa batuan. *Jurnal Geomine*, 11(1), 01–08.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of jointed rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4), 189–236.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.
- Carvalho, J., Hoek, E., & Lee, L. (1991). *UnWedge: Underground wedge analysis*. Rocscience Inc.
- Chani, C. L. (2017). Support design methods for underground excavations in jointed rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 95, 112–124.
- Deng, J., Liu, Q., & Yang, X. (2026). Spatial mapping of rock mass quality based on machine vision and geostatistics-block method: Case studies in mining engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 167, 106200.
- Donal, R. N. (2020). *Pengaruh persistensi bidang diskontinu terhadap kestabilan lereng batuan andesit terkekarkan: Studi kasus kuari andesit Batujajar* (Tesis Magister). Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta.

- Fekete, S., & Diederichs, M. S. (2013). Integration of three-dimensional laser scanning with discontinuum modelling for stability analysis of tunnels in blocky rockmasses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 57, 11–23.
- González-Palacio, C., Menéndez-Díaz, A., Álvarez-Vigil, A. E., & González-Nicieza, C. (2005). Identification of non-pyramidal key blocks in jointed rock masses for tunnel excavation. *Computers and Geotechnics*, 32(6), 402–416.
- Goodman, R. E., & Shi, G. H. (1985). *Block theory and its application to rock engineering*. Prentice-Hall.
- Junior, E. (2019). Analisis kestabilan lubang bukaan horizontal bekas penambangan mangan Goa Kalilingseng menggunakan metode elemen hingga. *Jurnal Teknologi Pertambangan*, 5(2), 45–53.
- Lin, M., Zuo, Y., Wang, J., Zheng, L., Chen, S., Sun, Y., & Liu, Y. (2020). Stability analysis of underground surrounding rock mass based on block theory. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(8), 4215–4228.
- Maryanto, S. (2015). Perkembangan sedimentologi batugamping berdasarkan data petrografi pada Formasi Sentolo di sepanjang Lintasan Pengasih, Kulonprogo. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 16(3), 129–139.
- Ojeda, F., Fogel, A., Roy, E., Valerio, M., & Rogers, S. (2024). Probabilistic three-dimensional kinematic analysis to improve design reliability of complex underground excavations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(4), 2845–2862.
- Rocscience. (2026). *Dips version 8.0: 3D stereographic projection and kinematic analysis software*. Rocscience Inc.
- Rocscience. (2026). *Unwedge version 5.0: 3D underground wedge stability analysis software*. Rocscience Inc.
- Rogers, S., Bewick, R. P., Brzovic, A., & Gaudreau, D. (2017). Integrating photogrammetry and discrete fracture network modelling for improved conditional simulation of underground wedge stability. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63, 185–196.
- Saptono, S. (2014). *Studi kekuatan geser terhadap pengaruh kekasaran permukaan di kelas batugamping*. Prosiding Seminar Nasional Kebumihan Ke-7, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Suyono, S., Diah, N., & Cahyadi, A. (2022). Hidrogeologi air tanah: Studi kasus pada lubang bukaan bekas penambangan bijih mangan di Kliripan, Kabupaten Kulonprogo. *Jurnal Lingkungan Pertambangan*, 10(1), 15–24.
- Wang, H., Zhang, L., & Liu, Y. (2024). Spatial integration of 3D underground excavation geometry and geomechanical block hazard mapping using GIS. *Automation in Construction*, 159, 105240.
- Wickham, G. E., Tiedemann, H. R., & Skinner, E. H. (1972). Support determination based on rock structure rating. *Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference*, AIME, New York, 43–64.
- Xiroudakis, G., Koukouvelas, I., & Chatziangelou, M. (2024). Back-analysis of wedge failures in abandoned underground mines to characterize rock mass discontinuities. *Engineering Geology*, 328, 107380.

&&&