

Analisis Metode Shotcrete Dalam Proteksi Permukaan Lereng Tanah Clay Shale Terhadap Slaking Dan Fissility (Studi Kasus: Proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Seksi 6B IKN)

Analysis Of The Shotcrete Method In Protecting Clay Shale Slope Surfaces Against Slacking And Fissility (Case Study: Section 6B IKN Toll Road Construction Project)

Anton Sangaji¹, Abdul Rochim², Rifqi Brilyant Arief²

¹ Prodi Magister Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung

² Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung Email : antonsangaji.as@gmail.com¹

ABSTRAK

Pembangunan infrastruktur jalan di Ibu Kota Nusantara (IKN) menghadapi tantangan geoteknik akibat dominasi lapisan clay shale yang bersifat rapuh, berpermeabilitas rendah, dan sangat sensitif terhadap perubahan kadar air. Fenomena slaking dan fissility pada clay shale menyebabkan degradasi kekuatan geser dan meningkatkan potensi kelongsoran, khususnya pada lereng galian, sehingga berimplikasi langsung terhadap keberlanjutan dan keselamatan perencanaan infrastruktur jalan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas penggunaan shotcrete dalam meningkatkan stabilitas lereng clay shale pada berbagai variasi kemiringan lereng sebagai dasar teknis penentuan geometri lereng pada koridor infrastruktur strategis IKN. Studi kasus dilakukan pada pembangunan Jalan Bebas Hambatan IKN Paket 6B menggunakan analisis numerik untuk membandingkan kondisi lereng sebelum dan sesudah perkuatan shotcrete. Hasil analisis menunjukkan bahwa lereng tanpa perkuatan memiliki nilai faktor keamanan (Safety Factor/SF) antara 0,6-1,335, yang belum memenuhi kriteria aman sebesar 1,5. Penerapan shotcrete meningkatkan nilai SF menjadi 1,27-1,335, meskipun pada kemiringan tertentu stabilitas jangka panjang masih belum optimal. Temuan ini menunjukkan bahwa perbaikan metode perkuatan saja tidak cukup tanpa pengendalian geometri lereng. Oleh karena itu, kemiringan lereng minimum yang direkomendasikan adalah 1,5:1 hingga 2:1 karena menunjukkan tingkat stabilitas yang lebih baik dan lebih aman untuk kondisi jangka panjang. Secara ilmiah, penelitian ini menegaskan pentingnya integrasi antara metode perkuatan lereng dan pengaturan geometri lereng dalam perencanaan infrastruktur jalan pada kawasan dengan dominasi clay shale, sehingga dapat berkontribusi sebagai dasar teknis dalam mitigasi risiko lereng dan perencanaan infrastruktur jalan berkelanjutan di IKN.

Kata Kunci: Clay Shale, Galian Lereng, Shotcrete, Safety Factor, Stabilitas Lereng.

ABSTRACT

Road infrastructure development in the Capital City of Nusantara (IKN) faces significant geotechnical challenges due to the dominance of clay shale layers, which are fragile, low-permeability, and highly sensitive to changes in water content. The phenomena of slaking and fissility in clay shale lead to shear strength degradation and increase the risk of slope failure, directly affecting the sustainability and safety of road infrastructure planning. This study aims to evaluate the effectiveness of shotcrete application in improving the stability of clay shale slopes at various slope inclinations as a technical basis for determining appropriate slope geometry within strategic infrastructure corridors in IKN. A case study was conducted on the Section 6B IKN Toll Road construction project using numerical analysis to compare slope conditions before and after shotcrete reinforcement. The results indicate that slopes without reinforcement have safety factor (SF) values ranging from 0.6 to 1.335, which do not meet the required safety criterion of 1.5. The application of shotcrete increases the SF to 1.27–1.335; however, stability under certain slope configurations remains insufficient for long-term safety. These findings demonstrate that reinforcement alone is not adequate without proper control of slope geometry. Therefore, minimum slope gradients of 1.5:1 to 2:1 are recommended, as they provide better stability performance and improved long-term safety. Scientifically, this study highlights the importance of integrating slope reinforcement methods with geometric slope design in road infrastructure planning within clay shale-dominated areas, contributing technical insight for slope risk mitigation and sustainable infrastructure development in IKN.

Keywords: Clay Shale, Slope Excavation, Shotcrete, Safety Factor, Slope Stability

Anton Sangaji, Abdul Rochim, Rifqi Brilyant Arief - 102
Analisis Metode Shotcrete Dalam Proteksi Permukaan Lereng Tanah...

1. PENDAHULUAN

Jalan merupakan sektor penting dalam pertumbuhan ekonomi suatu negara karena berperan sebagai sarana distribusi barang, jasa, dan mobilitas penduduk (Hoek & Bray, 1981). Di Ibu Kota Nusantara (IKN), pembangunan infrastruktur jalan menjadi prioritas utama dalam mendukung konektivitas antarzona, mempercepat akses logistik, serta mendorong pertumbuhan kawasan inti pusat pemerintahan dan wilayah masyarakat. Namun demikian, salah satu permasalahan geoteknik yang paling sering dijumpai pada pembangunan infrastruktur di IKN adalah keberadaan lapisan clay shale yang masif dan luas (Fitri et al., 2023).

Clay shale merupakan salah satu jenis batuan lempung dengan karakteristik geoteknik yang kompleks dan menantang, khususnya dalam konteks kestabilan lereng (Bell, 1994; Fitri et al., 2023). Lapisan clay shale yang terpapar menunjukkan tingkat pelapukan yang tinggi, sehingga berkontribusi signifikan terhadap potensi kelongsoran lereng (Dearman, 1991; Fitri et al., 2023). Material ini tersusun atas partikel lempung berlapis yang mengalami proses diagenesis parsial, menghasilkan struktur rapuh, permeabilitas rendah, serta sangat sensitif terhadap perubahan kadar air (Sabrina et al., 2023; Wilson & Wilson, 2014).

Clay shale menunjukkan daya tahan mekanis yang terbatas, terutama pada kondisi jenuh air. Kondisi ini dipengaruhi oleh dua fenomena dominan, yaitu slaking dan fissility. Slaking merupakan proses disintegrasi material akibat siklus basah–kering yang berulang, sedangkan fissility mengacu pada kecenderungan batuan untuk terbelah sejajar bidang laminasi akibat orientasi mineral lempung (Gamble, 1971; Franklin & Chandra, 1972). Kombinasi kedua fenomena tersebut mempercepat degradasi kekuatan geser dan menurunkan stabilitas lereng secara signifikan, khususnya pada wilayah dengan curah hujan tinggi atau aktivitas manusia seperti pemotongan lereng dan pekerjaan galian terbuka (Bell, 2007; Waskito et al., 2016).

Dalam proyek infrastruktur berskala besar, keberadaan clay shale yang mengalami pelapukan memerlukan pendekatan mitigasi yang terencana dan berbasis karakteristik material secara komprehensif. Strategi penanganan dapat meliputi sistem drainase bawah permukaan, struktur penahan lereng, serta perbaikan tanah melalui stabilisasi mekanik maupun kimia (Terzaghi, Peck, & Mesri, 1996; Hoek & Bray, 1981). Evaluasi lanjutan melalui parameter durabilitas batuan, indeks pelapukan, serta pengujian laboratorium seperti slake durability test menjadi sangat penting dalam mendukung desain lereng yang aman dan berkelanjutan (Gamble, 1971; Franklin & Chandra, 1972).

Material clay shale dengan tingkat fissility tinggi berpotensi membentuk jalur rembesan air sepanjang bidang belahan, sehingga diperlukan sistem drainase permukaan dan sub-permukaan yang efektif untuk mengendalikan infiltrasi dan tekanan air pori (Bell, 1994; Rusydy et al., 2016).

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk perlindungan lereng clay shale adalah shotcrete, yang diaplikasikan melalui penyemprotan beton bertekanan tinggi ke permukaan lereng. Metode ini memungkinkan penetrasi ke celah permukaan tidak rata, sekaligus memberikan dukungan struktural awal terhadap massa tanah berkohesi rendah (Galan et al., 2019; Gaboreau et al., 2012). Selain mengendalikan erosi dan infiltrasi air, shotcrete juga meningkatkan kekakuan dan stabilitas permukaan lereng (Putro & Agustina, 2023).

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji stabilitas lereng pada material clay shale dengan fokus pada karakteristik slaking, degradasi kekuatan geser, serta efektivitas metode perkuatan seperti shotcrete, soil nailing, dan geosintetik dalam meningkatkan faktor keamanan lereng. Studi-studi tersebut umumnya berorientasi pada evaluasi teknis dan analisis numerik untuk menentukan nilai safety factor (SF) pada kondisi lereng tertentu. Namun, sebagian besar penelitian masih terbatas pada pendekatan rekayasa geoteknik dan belum secara eksplisit mengaitkan hasil analisis stabilitas lereng dengan implikasi perencanaan infrastruktur pada skala koridor jalan atau kawasan strategis.

Dalam konteks pembangunan infrastruktur strategis seperti Ibu Kota Nusantara (IKN), stabilitas lereng tidak hanya merupakan persoalan teknis rekayasa, tetapi juga menjadi bagian dari pengambilan keputusan perencanaan koridor jalan yang aman, berkelanjutan, dan efisien secara spasial. Hingga saat ini, masih terbatas penelitian yang mengintegrasikan analisis numerik stabilitas lereng clay shale dengan rekomendasi geometri lereng sebagai dasar pertimbangan perencanaan infrastruktur jalan pada kawasan strategis nasional. Kesenjangan inilah yang menjadi fokus penelitian ini.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas penggunaan shotcrete dalam meningkatkan stabilitas lereng clay shale pada berbagai variasi kemiringan lereng melalui analisis numerik. Lebih lanjut, hasil analisis ini diharapkan dapat menjadi dasar rekomendasi desain geometri lereng yang mendukung perencanaan infrastruktur jalan yang aman, adaptif terhadap kondisi geologi lokal, serta berkelanjutan dalam pengembangan koridor jalan di kawasan IKN.

Dengan mengkaji stabilitas lereng dalam konteks pembangunan koridor jalan strategis IKN, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi pada aspek rekayasa teknis, tetapi juga memperluas pembahasan ke dalam dimensi perencanaan infrastruktur kawasan, khususnya terkait mitigasi risiko geologi, efisiensi desain geometri lereng, dan keberlanjutan pembangunan pada kawasan strategis nasional. Pendekatan ini menempatkan stabilitas lereng sebagai bagian dari sistem perencanaan ruang dan infrastruktur, bukan semata persoalan teknis konstruksi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah

Secara umum dalam bidang teknik, tanah didefinisikan sebagai material yang tersusun dari agregat mineral padat berupa butiran yang tidak saling terikat secara kimia (tidak tersementasi), serta mengandung bahan organik hasil pelapukan yang berbentuk partikel padat. Di antara partikel-partikel padat ini terdapat ruang kosong yang diisi oleh cairan dan gas (BM, 1995). Dalam pekerjaan teknik sipil, tanah dimanfaatkan sebagai bahan konstruksi dan juga berperan penting sebagai media pendukung pondasi bangunan.

2.1.1 Klasifikasi Tanah

Ukuran partikel tanah sangat bervariasi. Berdasarkan dominasi ukuran partikelnya, tanah dapat dikategorikan menjadi beberapa jenis, yaitu kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*), dan lempung (*clay*).

Tabel 1. Batasan-Batasan Ukuran Golongan Tanah

Nama Golongan	Ukuran Butiran (mm)			
	Ker kil	Pasir	Lanau	Lempung
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	>2	2 – 0,06	0,06 – 0,002	<0,002
U.S. Department of Agriculture (USDA)	>2	2 – 0,075	0,05 – 0,002	<0,002
American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	76,2 - 2	2 – 0,075	0,075 – 0,002	<0,002
Unified Soil Classification System (U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Bureau of Reclamation)	76,2 – 4,75	4,75 – 0,075	Halus (yaitu lanau dan lempung) <0,0075.	

2.1.2 Tes Boring

Borelog adalah metode investigasi tanah yang dilakukan dengan pengeboran hingga kedalaman tertentu untuk mengamati kondisi lapisan tanah secara visual serta mengambil sampel tanah. Data yang diperoleh digunakan untuk mendeskripsikan dan mengklasifikasikan jenis tanah, serta menjadi bahan untuk pengujian lebih lanjut di laboratorium.

2.2 Clay Shale

Keselamatan Clay shale dan batuan sedimen pada umumnya rentan terhadap pelapukan yang menyebabkan penurunan kualitas material. Tanah lempung kaku yang terendam air

mengalami penurunan daya dukung secara bertahap dalam jangka waktu yang relatif lama (Skempton, 1964; 1977). Namun, clay shale yang berada pada kondisi terbuka mengalami degradasi yang lebih cepat akibat paparan langsung terhadap perubahan cuaca dan siklus kering–basah. Proses pengeringan menjadi tahap awal degradasi clay shale (Sadisun et al., 2010; Alatas et al., 2015), yang kemudian dipercepat oleh proses pembasahan (Duncan et al., 1991; Sadisun et al., 2010; Alatas & Simatupang, 2017). Siklus kering–basah yang berulang akan meningkatkan laju disintegrasi secara signifikan (Nazir et al., 2016).

Proses degradasi diawali dengan terbentuknya retakan halus akibat pengeringan, yang kemudian menjadi jalur masuk air saat pembasahan. Kondisi ini terutama terjadi pada clay shale dengan kandungan mineral smektit yang tinggi, karena sifatnya yang memiliki kapasitas serap air besar (Zhang et al., 2017). Kehadiran air melemahkan ikatan antar mineral lempung sehingga menurunkan daya dukung dan durabilitas material. Secara umum, durabilitas clay shale semakin menurun seiring meningkatnya kandungan mineral lempung, khususnya smektit, yang memiliki pengaruh paling signifikan dibandingkan kaolinit dan illit (Gautam & Shakoor, 2013; Sadisun et al., 2010; Nazir et al., 2016; Alatas & Simatupang, 2017).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pemodelan numerik dengan PLAXIS untuk merepresentasikan kondisi aktual di lapangan. Parameter parameter input diperoleh dari data sekunder yang dikumpulkan langsung di lapangan serta hasil pengujian laboratorium. Hasil pemodelan menunjukkan metode shotcrete dalam melindungi permukaan lereng yang didominasi oleh material tanah Clay Shale. Penelitian diambil dari Proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Seksi 6B Ibu Kota Nusantara (IKN) STA 2+850. Lokasi tersebut dipilih karna adanya kandungan tanah Clay Shale pada lereng sebagai zona merah dalam penanganan Proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Seksi 6B Ibu Kota Nusantara (IKN) yang dapat dilihat pada gambar dibawah:



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder yang saling melengkapi untuk mendukung analisis stabilitas lereng. Data sekunder diperoleh dari hasil penelitian terdahulu, literatur teknis, serta dokumen perencanaan yang relevan, meliputi parameter material shotcrete dan data penampang melintang (*cross section*) lereng yang digunakan sebagai dasar pemodelan dan evaluasi kestabilan. Sementara itu, data primer diperoleh melalui pengujian lapangan berupa data borelog, yang memberikan informasi kondisi stratigrafi tanah, kedalaman lapisan clay shale, serta karakteristik tanah di lokasi penelitian. Data borelog ini menjadi dasar utama dalam penentuan parameter geoteknik dan penyusunan model analisis numerik dalam penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan difokuskan pada evaluasi kinerja lereng galian dengan berbagai variasi kemiringan, baik pada kondisi awal tanpa perkuatan maupun setelah diterapkan metode mitigasi berupa shotcrete. Analisis dilakukan untuk mengetahui sejauh mana pengaruh perkuatan permukaan terhadap peningkatan faktor keamanan lereng serta untuk menentukan kemiringan lereng yang memenuhi kriteria stabilitas yang dipersyaratkan.

4.1 Gambaran Umum Analisis

Penelitian ini menganalisis stabilitas lereng yang tersusun oleh tanah Clay Shale pada Proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Seksi 6B IKN STA 2+850. Analisis dilakukan menggunakan metode numerik berbasis elemen hingga dengan perangkat lunak PLAXIS 2D, serta menerapkan shotcrete sebagai metode mitigasi pada permukaan lereng.

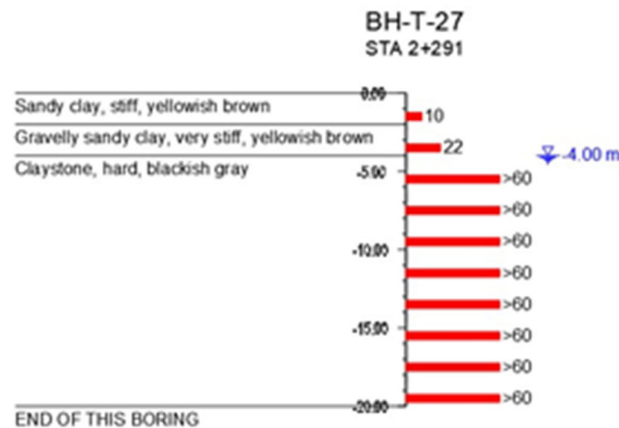
Evaluasi stabilitas dilakukan pada empat variasi kemiringan lereng, yaitu 1V:0.5H, 1V:1H, 1V:1.5H, dan 1V:2H. Fokus utama analisis adalah nilai faktor keamanan (*safety factor/SF*) pada setiap kondisi, sehingga dapat ditentukan kemiringan lereng yang paling aman dan efektif untuk diterapkan pada lereng dengan kondisi Clay Shale yang rentan terhadap pelapukan dan longsor.

4.2 Parameter dan Kondisi Tanah

Pada lokasi STA 2+850 teridentifikasi lapisan Clay Shale yang tersingkap akibat aktivitas galian lereng. Keterlambatan penutupan lereng menyebabkan material Clay Shale mengalami pelapukan (weathering), sehingga memicu terjadinya longsor. Kondisi ini menjadikan lereng berada pada keadaan tidak stabil sebelum dilakukan mitigasi.

Parameter tanah Clay Shale mengacu pada penelitian AK Somantri (2018), yang menjelaskan variasi sifat mekanik Clay Shale berdasarkan kondisi pelapukan. Dalam penelitian ini, parameter dipilih dengan pertimbangan bahwa nilai safety factor pada kondisi gravity loading berada di bawah 1,5, yang menunjukkan kondisi lereng tidak aman secara teknis.

Sementara itu, parameter lapisan tanah lainnya diperoleh dari hasil uji borehole, kemudian dikorelasikan untuk mendapatkan nilai kohesi efektif (c'), sudut geser dalam (ϕ'), berat isi (γ), dan koefisien permeabilitas (k)

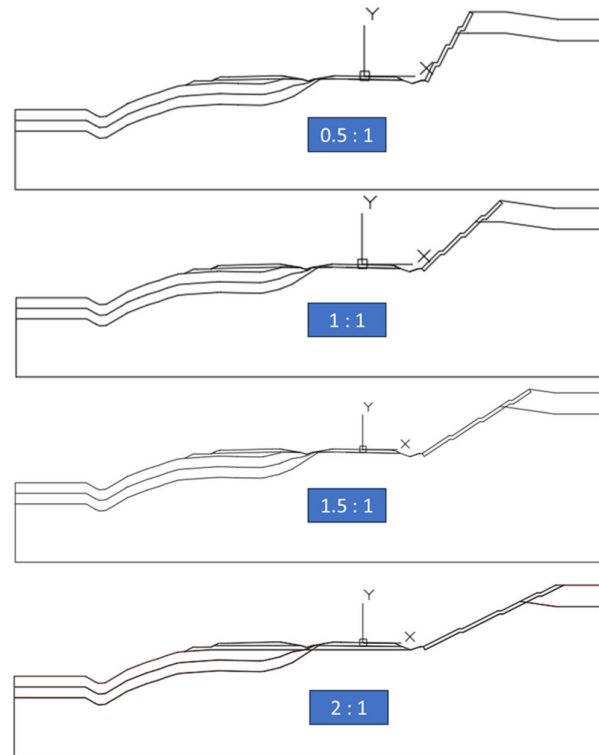


Gambar 2. Profil stratigrafi tanah hasil pengujian borehole di STA terdekat.

4.3 Pemodelan Geometri Lereng

Untuk mempermudah proses pemodelan numerik, geometri lereng dan tahapan konstruksi terlebih dahulu digambar menggunakan AutoCAD. Sketsa geometri tersebut kemudian disimpan dalam format DXF dan diimpor ke PLAXIS 2D sebagai input model. Empat model geometri dibuat

sesuai variasi kemiringan lereng, yaitu 1V:0.5H, 1V:1H, 1V:1.5H, dan 1V:2H.



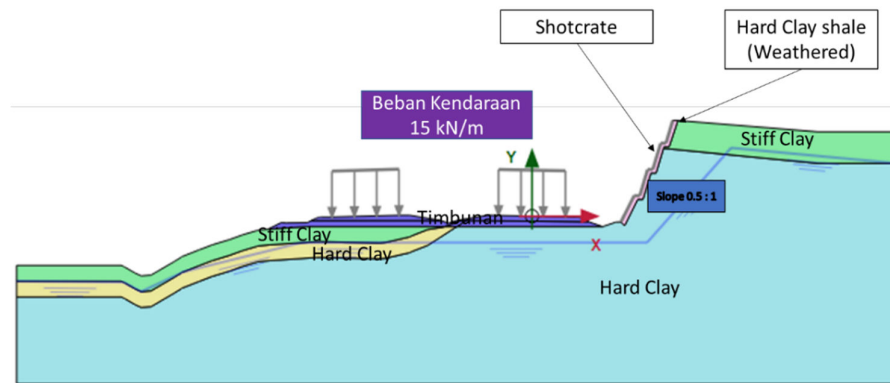
Gambar 3. Pemodelan geometri lereng dengan variasi kemiringan menggunakan AutoCAD.

4.4 Hasil Analisis Stabilitas Lereng

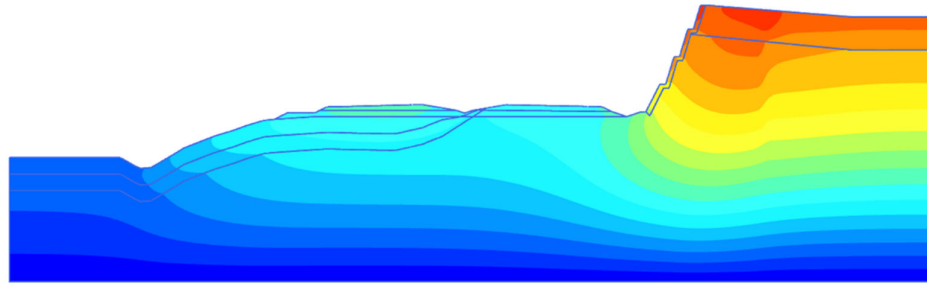
Dalam analisis ini, lereng dimodelkan pada empat variasi kemiringan, yaitu 1:0,5; 1:1; 1:1,5; dan 1:2. Setiap model dianalisis melalui beberapa tahap perhitungan, meliputi kondisi awal (initial phase) dengan pembebanan gravitasi, tahap pemasangan shotcrete, tahap service load akibat beban lalu lintas, serta tahap konsolidasi jangka pendek dan jangka panjang. Nilai faktor keamanan pada setiap tahap digunakan sebagai parameter utama untuk menilai tingkat kestabilan lereng dan potensi terjadinya kelongsoran. Uraian lebih rinci mengenai hasil analisis pada masing-masing variasi kemiringan lereng disajikan pada subbab berikutnya.

4.4.1 Lereng dengan Kemiringan 1V:0.5H

Pada kemiringan 1V:0.5H, kondisi initial phase menunjukkan kegagalan total dengan nilai SF jauh di bawah 1,5. Analisis tidak dapat dilanjutkan ke tahap berikutnya karena lereng mengalami runtuh sejak tahap awal.



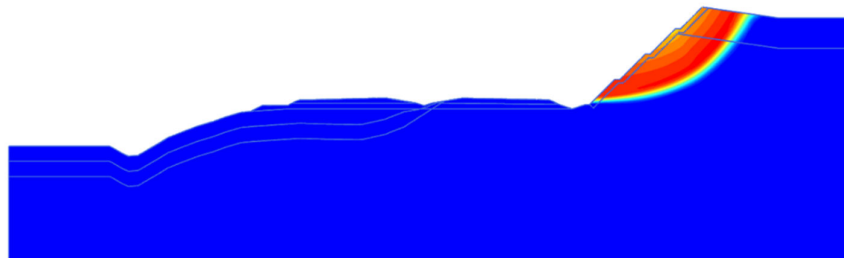
Gambar 4. Permodelan Kemiringan Lereng 1:0.5



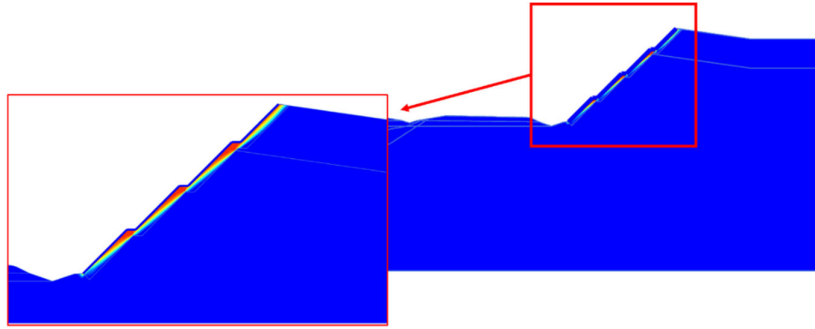
Gambar 5. Kegagalan lereng pada kemiringan 1V:0.5H

4.4.2 Lereng dengan Kemiringan 1V:1H

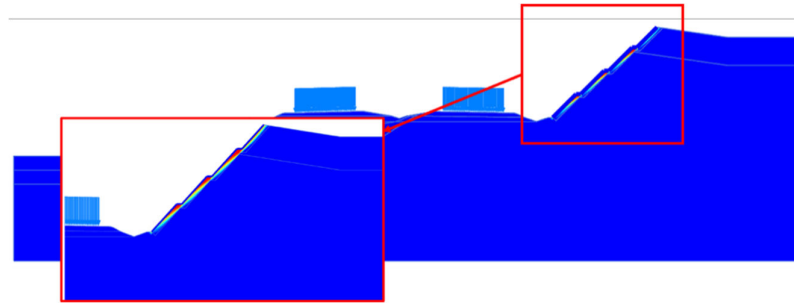
Pada kemiringan 1V:1H, nilai SF pada initial phase sebesar 0,995, menunjukkan kondisi kritis. Setelah instalasi shotcrete, SF meningkat menjadi 1,14, dan pada kondisi service load meningkat menjadi 1,27. Namun nilai ini masih berada di bawah kriteria aman.



Gambar 6. Safety factor Initial Phase Kemiringan Lereng 1 : 1



Gambar 7. Safety Factor Pada Instal Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 1

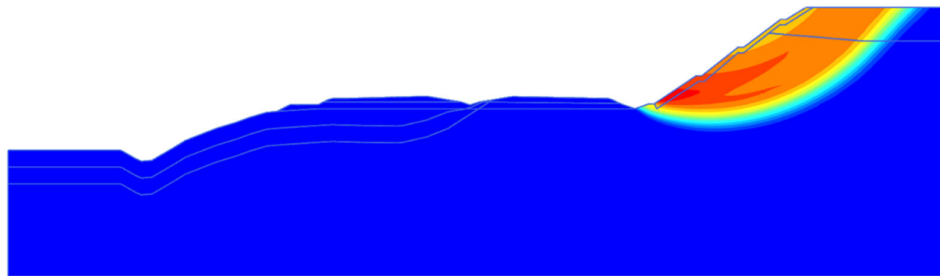


Gambar 8. Safety Factor Pada Service Load Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 1

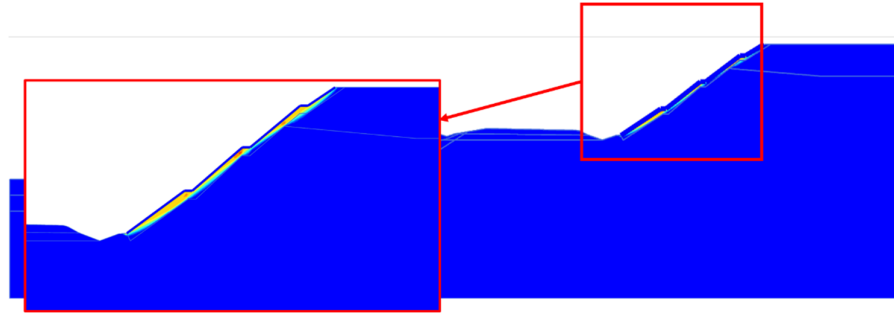
Hasil konsolidasi menunjukkan ketidakstabilan lanjutan, sehingga kemiringan ini dinilai tidak direkomendasikan.

4.4.3 Lereng dengan Kemiringan 1V:1.5H

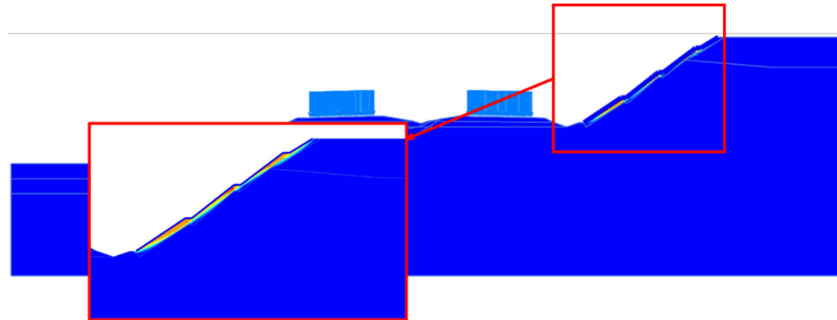
Pada kemiringan 1V:1.5H, nilai SF initial phase sebesar 1,325. Setelah pemasangan shotcrete dan pemberian service load, nilai SF meningkat menjadi 1,572, Konsolidasai tahun pertama SF masih meningkat menjadi 1,600 dan terus meningkat pada kondisi konsolidasi hingga mencapai 1,634 pada konsolidasi 10 tahun.



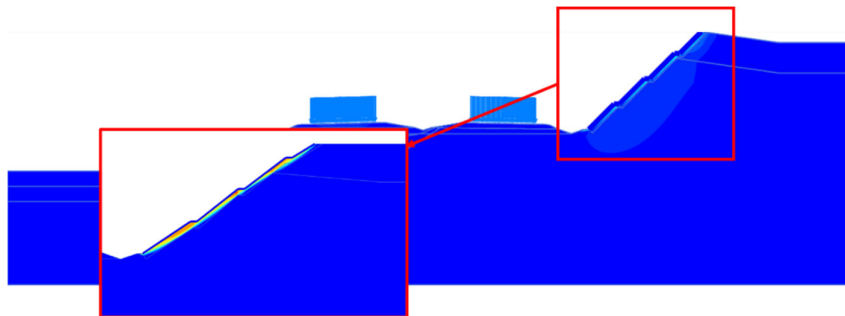
Gambar 9. Safety Factor Pada Initial Phase Kemiringan Lereng 1 : 1.5



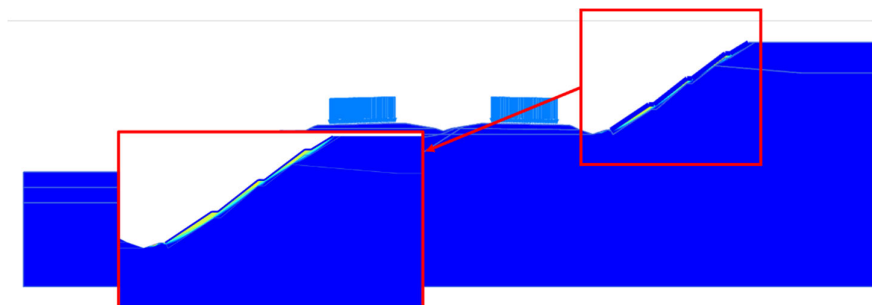
Gambar 10. Safety Factor Pada Instal Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 1.5



Gambar 11. Safety Factor Pada Service Load Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 1.5



Gambar 12. Safety Factor Pada Konsolidasi 1 Tahun Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 1.5

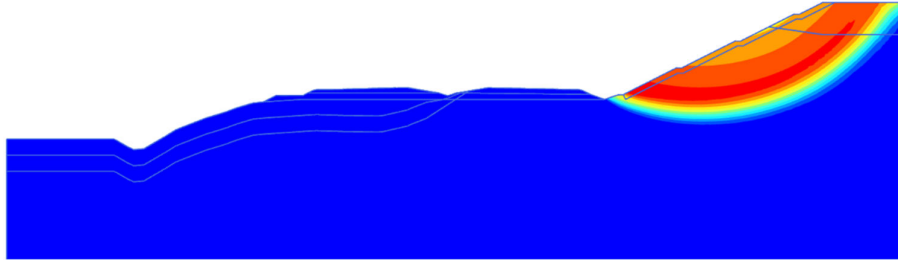


Gambar 13. Safety Factor Pada Konsolidasi 10 Tahun Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 1.5

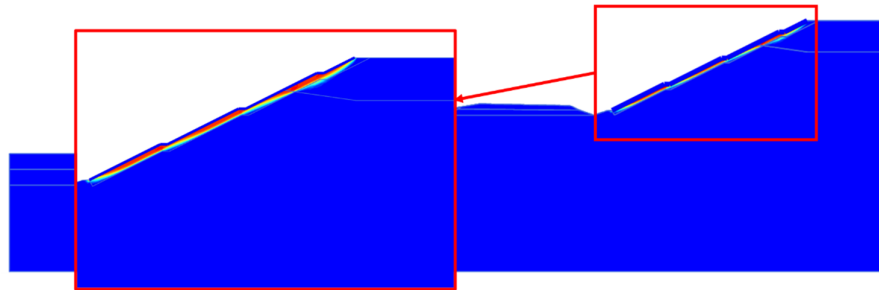
Hasil pada variasi ini menunjukkan bahwa kemiringan 1V:1.5H telah memenuhi kriteria stabilitas desain.

4.4.4 Lereng dengan Kemiringan 1V:2H

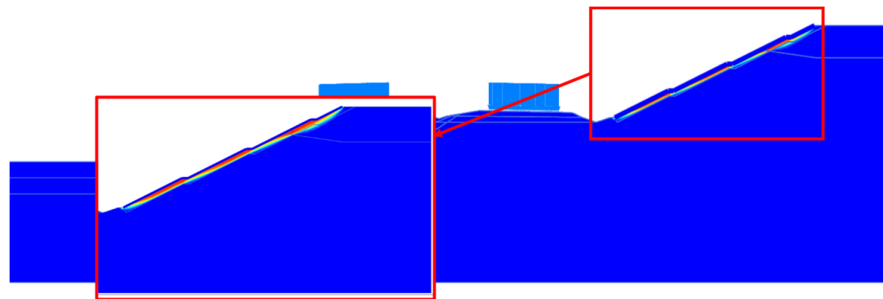
Kemiringan 1V:2H memberikan hasil paling stabil, diantara variasi yang lainnya dengan nilai SF pada kondisi eksisting yaitu 1,335. Pada pemasangan shotcrete memiliki nilai SF 1,482, service load sebesar 1,834, dan meningkat hingga 1,881 pada konsolidasi 10 tahun. Bidang gelincir relatif dangkal dan terkendali.



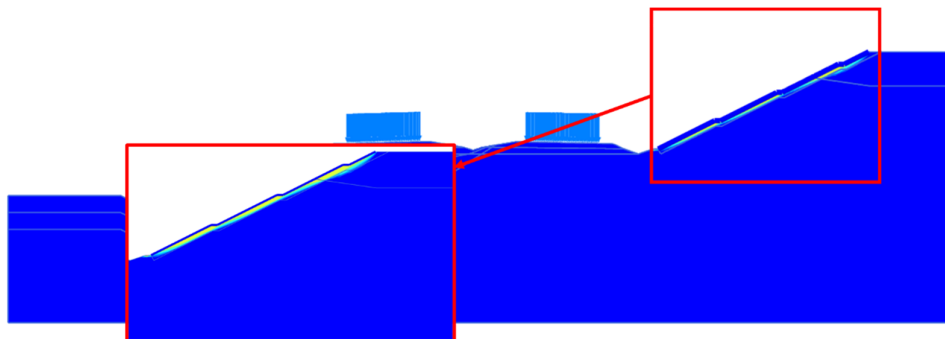
Gambar 5. Safety Factor Pada Initial Phase Kemiringan Lereng 1 : 2



Gambar 14. Safety Factor Pada Instal Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 2



Gambar 15. Safety Factor Pada Service Load Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 2



Gambar 16. Safety Factor Pada Konsolidasi 10 Tahun Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 2

4.5 Perbandingan dan Pembahasan

Rekapitulasi hasil analisis ditunjukkan pada Tabel 4.3, yang memperlihatkan bahwa kemiringan 1V:1.5H dan 1V:2H memberikan nilai SF yang memenuhi kriteria keamanan ($>1,5$), baik pada kondisi operasi maupun jangka panjang. Sebaliknya, kemiringan 1V:0.5H dan 1V:1H tidak disarankan untuk diterapkan pada lereng dengan tanah Clay Shale.

4.6. Diskusi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa lereng clay shale tanpa perkuatan memiliki nilai Safety Factor (SF) di bawah batas aman 1,5, sejalan dengan konsep stabilitas lereng yang dikemukakan oleh Hoek & Bray (1981), bahwa material batuan lempung berlapis dengan tingkat pelapukan tinggi cenderung mengalami penurunan kekuatan geser akibat degradasi struktur internal. Karakteristik clay shale yang mengalami slaking dan fissility menyebabkan penurunan kohesi efektif dan meningkatkan potensi kelongsoran pada lereng galian.

Temuan ini juga konsisten dengan Galan et al. (2019) yang menyatakan bahwa pada material clay shale, perlindungan permukaan seperti shotcrete dapat meningkatkan kestabilan jangka pendek dengan mengurangi infiltrasi air dan erosi permukaan, namun efektivitasnya sangat bergantung pada geometri lereng dan kondisi drainase. Studi-studi clay shale di Indonesia pada proyek jalan di Kalimantan dan Jawa juga menunjukkan bahwa peningkatan faktor keamanan lebih signifikan dicapai melalui kombinasi pengaturan kemiringan lereng dan sistem drainase dibandingkan hanya melalui perkuatan permukaan. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat temuan sebelumnya bahwa stabilitas lereng clay shale tidak dapat hanya mengandalkan perkuatan struktural, tetapi memerlukan pendekatan desain geometri yang tepat.

Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan shotcrete meningkatkan nilai SF, namun pada beberapa variasi kemiringan belum mencapai kriteria aman 1,5. Hal ini menunjukkan bahwa shotcrete lebih berfungsi sebagai proteksi permukaan yang mengurangi pelapukan dan infiltrasi air, bukan sebagai elemen perkuatan struktural utama yang meningkatkan kapasitas geser massa tanah secara signifikan.

Secara mekanis, shotcrete bekerja dengan memberikan lapisan pelindung terhadap permukaan lereng sehingga mengurangi erosi dan degradasi akibat siklus basah-kering. Namun, pada clay shale yang telah mengalami rekahan internal, peningkatan stabilitas lebih ditentukan oleh perubahan geometri lereng dan sistem drainase dibandingkan oleh ketebalan lapisan shotcrete itu sendiri. Dengan demikian, penggunaan shotcrete harus diposisikan sebagai bagian dari strategi mitigasi risiko jangka pendek hingga menengah, bukan sebagai solusi tunggal terhadap ketidakstabilan lereng pada material sensitif air.

Rekomendasi kemiringan lereng 1:1,5 hingga 1:2 menunjukkan peningkatan stabilitas yang lebih baik dibandingkan kemiringan yang lebih curam. Namun, pemilihan kemiringan tersebut memiliki implikasi langsung terhadap kebutuhan ruang (right of way) dan efisiensi penggunaan lahan.

Lereng dengan kemiringan 1:2 memerlukan ruang lateral yang lebih luas dibandingkan 1:1, sehingga berdampak pada lebar koridor infrastruktur dan potensi pembebasan lahan tambahan. Dalam konteks perencanaan kawasan IKN, hal ini mempengaruhi konfigurasi spasial koridor jalan, tata guna lahan di sekitarnya, serta efisiensi pemanfaatan ruang.

Terdapat trade-off antara peningkatan faktor keamanan lereng dengan kebutuhan ruang yang lebih besar. Kemiringan yang lebih landai meningkatkan stabilitas dan mengurangi risiko jangka panjang, namun memerlukan alokasi lahan lebih luas. Sebaliknya, lereng yang lebih curam lebih hemat ruang tetapi memiliki risiko stabilitas yang lebih tinggi dan potensi biaya pemeliharaan jangka panjang yang lebih besar.

Dalam konteks Ibu Kota Nusantara sebagai Kawasan Strategis Nasional, stabilitas lereng merupakan bagian integral dari pembangunan infrastruktur yang resilien dan berkelanjutan. Ketidakstabilan lereng tidak hanya berdampak pada aspek teknis konstruksi, tetapi juga berpotensi mengganggu konektivitas jaringan jalan dan sistem mobilitas kawasan. Rekomendasi desain lereng dalam penelitian ini dapat menjadi dasar teknis dalam perencanaan koridor jalan pada kawasan dengan karakteristik geologi sensitif seperti clay shale. Integrasi antara analisis stabilitas lereng dan perencanaan ruang penting untuk memastikan bahwa pembangunan kota baru berbasis mitigasi risiko geologi dan hidrologi dapat terwujud secara berkelanjutan.

Dengan demikian, urgensi penelitian ini tidak hanya terletak pada peningkatan nilai Safety Factor, tetapi pada kontribusinya dalam mendukung pengambilan keputusan desain infrastruktur yang mempertimbangkan aspek teknis, spasial, dan keberlanjutan pembangunan IKN.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng pada empat variasi kemiringan lereng dengan penerapan perkuatan shotcrete menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D, dapat disimpulkan bahwa kondisi lereng tanpa perkuatan menunjukkan tingkat kestabilan yang rendah dan berpotensi mengalami kegagalan. Pada kondisi awal (tanpa perkuatan), seluruh variasi kemiringan lereng memiliki nilai faktor keamanan (safety factor/SF) di bawah kriteria aman sebesar 1,5, dengan nilai SF masing-masing sebesar 0,6 untuk lereng 1:0,5 (mengalami runtuh), 0,995 untuk lereng 1:1,

1,325 untuk lereng 1:1,5, dan 1,335 untuk lereng 1:2. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan tanah Clay Shale yang mengalami pelapukan sangat memengaruhi stabilitas lereng hasil galian. Penerapan perkuatan shotcrete pada permukaan lereng terbukti meningkatkan nilai faktor keamanan pada hampir seluruh model yang dianalisis. Meskipun demikian, pada kemiringan lereng 1:0,5 dan 1:1, peningkatan nilai SF setelah pemasangan shotcrete belum mampu memenuhi kriteria keamanan, di mana nilai SF maksimum yang diperoleh pada kondisi service load masih berada di bawah 1,5. Sebaliknya, pada kemiringan lereng 1:1,5 dan 1:2, hasil analisis menunjukkan bahwa kombinasi kemiringan lereng dan perkuatan shotcrete mampu menghasilkan nilai SF di atas 1,5 pada kondisi operasi dan konsolidasi jangka panjang hingga 10 tahun. Dengan demikian, kemiringan lereng 1:1,5 dan 1:2 dinilai layak dan aman untuk diterapkan pada lereng galian yang tersusun oleh tanah Clay Shale dengan mitigasi shotcrete.

Referensi

- Bell, F. G. (1994). *Engineering geology of weak rock*. Elsevier.
- Bell, F. G. (2007). *Engineering geology and construction*. Spon Press.
- Dearman, W. R. (1991). Weathering classification in engineering geology. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 24(3), 211–227. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1991.024.03.02>
- Fitri, A., Yudhyantoro, Y., & Chairullah, B. (2023). Karakteristik geoteknik clay shale pada proyek infrastruktur jalan. *Jurnal Teknik Sipil*, 30(2), 115–124.
- Franklin, J. A., & Chandra, R. (1972). The slake-durability test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 9(3), 325–341. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(72\)90001-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(72)90001-0)
- Gaboreau, S., et al. (2012). In-situ interaction of cement paste and shotcrete with claystones. *American Journal of Science*, 312(4), 314–356. <https://doi.org/10.2475/03.2012.03>
- Galan, I., Baldermann, A., Kusterle, W., Dietzel, M., & Mittermayr, F. (2019). Durability of shotcrete for underground support. *Construction and Building Materials*, 202, 465–493. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.018>
- Gamble, J. C. (1971). *Durability–plasticity classification of shales and other argillaceous rocks*. PhD Dissertation, University of Illinois.
- Hoek, E., & Bray, J. (1981). *Rock slope engineering* (3rd ed.). Institution of Mining and Metallurgy.
- Putro, A. E. N., & Agustina, D. H. (2023). Analisis kestabilan lereng dengan perkuatan shotcrete menggunakan Plaxis. *Sigma Teknika*, 6(1), 223–230.
- Rusdy, I., Sugiyanto, D., & Munandar, I. (2016). Geological aspect of slope failure and mitigation Anton Sangaji, Abdul Rochim, Rifqi Brilyant Arief - 116 Analisis Metode Shortcrete Dalam Proteksi Permukaan Lereng Tanah...

- approach. *Aceh International Journal of Science and Technology*, 5(1), 30–37.
- Sabrina, A., Yudhyantoro, Y., & Chairullah, B. (2023). Stabilisasi kapur terhadap sifat fisis tanah clay shale. *Jurnal Rekayasa Geoteknik*, 12(1), 45–54.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). Wiley.
- Wilson, M. J., & Wilson, L. (2014). Clay mineralogy and shale instability. *Clay Minerals*, 49(2), 127–145. <https://doi.org/10.1180/claymin.2014.049.2.01>