E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Pengaruh *Fly Ash* Dan Kapur Tohor (CaO) Hasil *Upgrading* Batugamping Dolomit Lokal Terhadap Peningkatan Nilai CBR, Sifat Fisik Dan Mekanis Tanah, Serta Stabilitas Lereng Di Desa Oemasi

Rizhard Ndolu[1], Woro Sundari[2], Andreas Sinuhaji[3], Frengky Banunaek[4]
[1]Universitas Nusa Cendana, rizhardndolu@staf.undana.ac.id
[2]Universitas Nusa Cendana, worosundari@gmail.com
[3]Universitas Nusa Cendana, andreas.sinuhaji@staf.undana.ac.id
[4]Universitas Nusa Cendana, banunaekfrengky@gmail.com

Abstrak

Tanah lempung berplastisitas tinggi memiliki daya dukung dan kuat geser yang relatif rendah sehingga berpotensi menyebabkan kerusakan perkerasan jalan dan ketidakstabilan lereng. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh stabilisasi menggunakan kapur tohor (CaO) hasil *upgrading* batugamping dolomit lokal dan *Fly Ash* terhadap sifat fisik, sifat mekanis, nilai *California Bearing Ratio* (CBR), serta stabilitas lereng di Desa Oemasi, Kabupaten Kupang. Pengujian dilakukan terhadap tanah asli dan tanah yang distabilisasi dengan 5% kapur serta variasi *Fly Ash* 10%, 15%, 20%, dan 25%. Parameter yang dianalisis meliputi sifat indeks, pemadatan, CBR, dan kuat geser langsung. Stabilitas lereng dianalisis menggunakan Rocscience Slide dengan metode *Limit Equilibrium* dan simulasi Monte Carlo berdasarkan parameter geoteknik dari tiga sampel pada bagian atas, tengah, dan dasar lereng dengan beban permukaan 15 kN/m². Hasil menunjukkan peningkatan CBR dari 13,40% menjadi 19,04% serta peningkatan kohesi dan sudut geser dalam. Nilai *Factor of Safety* (FS) meningkat dari 0,568 pada tanah asli menjadi 0,883; 1,122; 1,402; dan 1,615, sedangkan *Probability of Failure* (PF) menurun dari 100% menjadi 0% pada variasi 20% dan 25% *Fly Ash*. Kombinasi 5% kapur dan 25% *Fly Ash* menghasilkan stabilitas tertinggi, sedangkan 5% kapur dan 20% *Fly Ash* telah memenuhi kriteria kestabilan dengan FS > 1,30.

Kata Kunci: *stabilisasi tanah; Fly Ash; kapur tohor (CaO); kestabilan lereng; faktor keamanan*

Abstract

High-plasticity clay soils have relatively low bearing capacity and shear strength, which can potentially cause damage to road pavements and slope instability. This study aims to analyze the effect of stabilization using quicklime (CaO) produced by upgrading local dolomite limestone and Fly Ash on the physical properties, mechanical properties, California Bearing Ratio (CBR) values, and slope stability in Oemasi Village, Kupang Regency. Tests were conducted on the original soil and soil stabilized with 5% lime and varying Fly Ash contents of 10%, 15%, 20%, and 25%. The parameters analyzed included index properties, compaction, CBR, and direct shear strength. Slope stability was analyzed using Rocscience Slide with the Limit Equilibrium method and Monte Carlo simulation based on geotechnical parameters from three samples taken from the top, middle, and base of the slope with a surface load of 15 kN/m². The results showed an increase in CBR from 13.40% to 19.04% as well as an increase in cohesion and internal friction angle. The Factor of Safety (FS) increased from 0.568 in the undisturbed soil to 0.883, 1.122, 1.402, and 1.615, while the Probability of Failure (PF) decreased from 100% to 0% for Fly Ash content variations of 20% and 25%. The combination of 5% lime and 25% Fly Ash produced the highest stability, while 5% lime and 20% Fly Ash met the stability criteria with an FS > 1.30.

Keywords: *soil stabilization; Fly Ash; quicklime (CaO); slope stability; safety factor*

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Corresponding Author:
Rizhard Ndolu

Universitas Nusa Cendana, rizhardndolu@staf.undana.ac.id

PENDAHULUAN

Tanah dasar (*subgrade*) memiliki peranan penting dalam konstruksi perkerasan jalan karena berfungsi sebagai lapisan yang menerima dan meneruskan beban dari lapisan perkerasan maupun lalu lintas di atasnya. Kondisi fisik dan mekanis tanah dasar sangat memengaruhi tingkat kestabilan, daya dukung, serta umur pelayanan suatu konstruksi jalan. Tanah dengan kemampuan dukung rendah, khususnya tanah lempung dengan plastisitas tinggi, sering menimbulkan berbagai persoalan geoteknik seperti deformasi, retak perkerasan, penurunan tanah, hingga ketidakstabilan lereng (Bowles, 1997; Braja, 2010; Abbey et al., 2021; Soltani et al., 2023; Zafar et al., 2023). Permasalahan tersebut umumnya semakin kompleks pada daerah dengan topografi berbukit dan intensitas curah hujan yang tinggi.

Kondisi serupa ditemukan di Desa Oemasi yang memiliki morfologi bergelombang hingga berbukit dengan karakteristik tanah yang kurang stabil untuk mendukung pembangunan infrastruktur. Rendahnya kekuatan tanah pada wilayah tersebut berpotensi menyebabkan kerusakan konstruksi jalan dan meningkatkan kemungkinan terjadinya longsor, terutama ketika tanah mengalami pembebanan serta infiltrasi air hujan. Oleh sebab itu, diperlukan metode perbaikan tanah yang mampu meningkatkan daya dukung dan kestabilan lereng secara efektif.

Salah satu teknik yang banyak digunakan dalam perbaikan tanah adalah metode stabilisasi dengan penambahan bahan tertentu (*stabilizing agents*) (Ingles & John, 1972). Dalam beberapa tahun terakhir, pemanfaatan limbah industri seperti *Fly Ash* semakin banyak diterapkan karena selain dapat memperbaiki sifat teknik tanah, juga mendukung konsep pembangunan berkelanjutan. *Fly Ash* mengandung senyawa silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) yang bersifat pozzolanik sehingga mampu bereaksi dengan unsur berkalsium dan membentuk senyawa pengikat yang dapat memperkuat struktur tanah (ASTM International, 2019).

Selain *Fly Ash*, kapur tohor (CaO) juga dikenal efektif sebagai bahan stabilisasi, terutama untuk tanah lempung. Penggunaan kapur dapat menurunkan plastisitas tanah, meningkatkan kuat geser, serta memperbaiki sifat fisik tanah secara keseluruhan (Bell, 1996). Reaksi kimia antara *Fly Ash* dan kapur menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (CSH) dan kalsium aluminat hidrat (CAH) yang berfungsi sebagai perekat antarpartikel tanah. Proses sementasi tersebut dapat meningkatkan kekakuan, kapasitas dukung, dan stabilitas tanah secara signifikan (Neville, 2011; Abdelbaset et al., 2024).

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kombinasi *Fly Ash* dan kapur mampu meningkatkan nilai *California Bearing Ratio* (CBR), kuat geser, dan stabilitas tanah (Rafiei & Maleki, 2024). Namun demikian, sebagian besar penelitian masih menggunakan kapur komersial, sedangkan pemanfaatan kapur tohor hasil *upgrading* batugamping dolomit lokal belum banyak dikaji. Selain itu, penelitian yang mengombinasikan analisis sifat fisik tanah, parameter mekanis, nilai CBR, dan evaluasi stabilitas lereng secara terpadu masih relatif terbatas, khususnya pada kondisi geologi wilayah timur Indonesia.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh penggunaan *Fly Ash* dan kapur tohor (CaO) yang berasal dari hasil upgrading batugamping dolomit lokal terhadap

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

peningkatan sifat fisik dan mekanis tanah di Desa Oemasi. Analisis dilakukan terhadap perubahan parameter indeks tanah, kuat geser, nilai CBR, serta stabilitas lereng yang dinyatakan melalui nilai faktor keamanan (*factor of safety*) (Michael & Stephen, 2005). Kebaruan penelitian ini terletak pada pemanfaatan material lokal berupa batugamping dolomit sebagai bahan stabilisasi tanah, serta penerapan pendekatan analisis terpadu antara pengujian laboratorium dan evaluasi kestabilan lereng dalam kajian geoteknik.

Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan alternatif metode stabilisasi tanah yang efektif, ekonomis, dan berbasis sumber daya lokal. Selain itu, penelitian ini diharapkan mampu menjadi solusi dalam penanganan tanah lemah untuk pembangunan infrastruktur jalan serta mitigasi ketidakstabilan lereng pada wilayah dengan kondisi geologi yang serupa.

METODE KAJIAN LITERATUR

Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO

Klasifikasi tanah merupakan langkah awal dalam evaluasi sifat teknis tanah untuk kebutuhan rekayasa geoteknik, khususnya pada pekerjaan jalan. Sistem AASHTO digunakan secara luas untuk mengelompokkan tanah berdasarkan distribusi ukuran butir, batas cair, dan indeks plastisitas. Dalam sistem ini, tanah lempung umumnya termasuk kelompok A-6 dan A-7 yang dikategorikan sebagai material subgrade berkualitas rendah. Sistem ini menjadi dasar dalam menentukan tingkat perbaikan tanah yang diperlukan sebelum digunakan dalam konstruksi perkerasan jalan (AASHTO, 1993; Das, 2010).

Tabel. 1. Klasifikasi Tanah Berdasarkan AASHTO

Klasifikasi umum	Material granuler (<35% lolos saringan no. 200)							Tanah-tanah lanau-lempung (>35% lolos saringan no. 200)			
Klasifikasi kelompok	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5/A-7-6
Analisis saringan (% lolos)											
2,00 mm (no. 10)	50 maks	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,425 mm (no. 40)	30 maks	50 maks	51 min	-	-	-	-	-	-	-	-
0,075 mm (no. 200)	15 maks	25 maks	10 maks	35 maks	35 maks	35 maks	35 maks	36 min	36 min	36 min	36 min
Staf fraksi lolos saringan no. 4)											
Batas cair (LL)	-	-	-	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min
Indeks plastis (PI)	6 maks	np	np	10 maks	10 maks	11 min	11 min	10 maks	10 maks	11 min	11 min
Indeks kelompok (GI)	0		0	4 maks				8 maks	12 maks	16 maks	20 maks
Tipe material yang pokok pada umumnya	pecahan batu, kerikil dan pasir		pasir halus	kerikil berlanau atau berlempung dan pasir				tanah berlanau		tanah berlempung	
Penilaian umum sebagai tanah dasar	sangat baik sampai baik							sedang sampai buruk			

Pengujian Sifat Fisik Tanah

Sifat fisik tanah merupakan parameter dasar yang digunakan untuk menggambarkan kondisi awal tanah sebelum dilakukan perlakuan atau stabilisasi. Pengujian sifat fisik bertujuan untuk mengetahui karakteristik alami tanah, menentukan klasifikasinya, serta memahami respons tanah terhadap perubahan lingkungan dan pembebanan (Das, 2010). Parameter yang umum dianalisis meliputi kadar air, berat jenis, berat isi, distribusi ukuran butir, dan batas Atterberg (Bowles, 1991).

1. Kadar Air (Water Content)

Kadar air adalah perbandingan jumlah air yang terkandung dalam tanah terhadap berat tanah kering. Nilai ini sangat berpengaruh terhadap sifat mekanis tanah, terutama pada tanah berbutir halus seperti lempung yang mudah berubah konsistensinya akibat

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

perubahan kadar air. Semakin tinggi kadar air, umumnya kekuatan dan daya dukung tanah akan menurun (Das, 2010). Nilai kadar air dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\%$$

Keterangan:
Ww = berat air (gram)
Ws = berat tanah kering (gram)

2. Berat Jenis (Specific Gravity)

Berat jenis tanah merupakan perbandingan antara berat butiran tanah dengan berat air pada volume yang sama. Parameter ini mencerminkan karakter mineral penyusun tanah dan digunakan dalam berbagai perhitungan sifat fisik tanah lainnya, seperti hubungan volume dan berat (Bowles, 1991).

$$G_s = \frac{W_s}{W_w}$$

Keterangan:
Gs = berat jenis tanah (specific gravity)
Ws= berat butiran tanah
Ww = berat air dengan volume yang sama

3. Berat Isi (Bulk Density)

Berat isi menggambarkan massa tanah per satuan volume dalam kondisi alami. Nilai ini dipengaruhi oleh tingkat kepadatan, susunan butiran tanah, dan kadar air. Tanah dengan berat isi yang lebih besar cenderung memiliki ruang pori yang lebih kecil sehingga memiliki kemampuan dukung yang lebih baik (Terzaghi et al., 1996).
Persamaan berat volume tanah adalah:

$$\gamma = \frac{V}{W}$$

Keterangan:
γ = berat volume tanah
W = berat tanah (gram)
V = volume tanah (cm^3)

4. Distribusi Ukuran Butir (Grain Size Distribution)

Distribusi ukuran butir merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui proporsi ukuran partikel tanah, mulai dari kerikil, pasir, lanau, hingga lempung. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan karakteristik gradasi tanah yang berpengaruh terhadap sifat teknis tanah, seperti permeabilitas, kepadatan, dan kekuatan tanah. Distribusi ukuran butir umumnya dilakukan dengan metode analisis saringan dan analisis hidrometer untuk partikel halus (Das, 2010).
Persentase butiran yang lolos saringan dapat dihitung menggunakan rumus berikut:
Persentase butiran tertahan dihitung dengan rumus:

$$P = \frac{W_t}{W} \times 100\%$$

Keterangan:
Wt = berat tanah yang tertahan pada saringan
W = berat total sampel tanah

5. Batas Atterberg

Batas Atterberg meliputi batas cair, batas plastis, dan indeks plastisitas yang digunakan untuk menggambarkan perubahan perilaku tanah akibat perubahan kadar air. Parameter ini menunjukkan tingkat plastisitas tanah. Tanah dengan nilai plastisitas tinggi

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

cenderung memiliki potensi perubahan volume yang besar dan kestabilan yang rendah sehingga sering memerlukan perbaikan atau stabilisasi (Bowles, 1991).
Rumus indeks plastisitas dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$PI=LL-PL$$

Keterangan:
PI = indeks plastisitas (plasticity index)
LL = batas cair (liquid limit)
PL = batas plastis (plastic limit)

Pengujian Sifat Mekanis Tanah

1. Uji Pemadatan

Pada umumnya, setiap jenis tanah memiliki kadar air optimum tertentu yang dapat menghasilkan berat volume kering maksimum. Hubungan antara berat volume kering (γd), berat volume basah (γb), dan kadar air (w) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Hardiyatmo, 2012):

$$\gamma_d=\frac{\gamma_b}{1+w}$$

keterangan:
γd = berat volume kering (gram/cm³)
γb = berat volume basah (gram/cm³)
w = kadar air (%)

2. California Bearing Ratio (CBR)

Nilai California Bearing Ratio (CBR) digunakan untuk menilai kemampuan tanah dasar dalam menahan beban. Menurut Turnbull (1968) dan The Asphalt Institute (1970), klasifikasi umum nilai CBR untuk material tanah dasar dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Klasifikasi Umum Nilai CBR Material Tanah Dasar

Nilai CBR (%)	Kriteria menurut *Turnbull* (1968)	Kriteria menurut *The Asphalt Institute* (1970)
20 – 30	*Very Good*	*Excellent*
10 – 20	*Good to Fair*	*Good*
5 – 10	*Questionable to Fair*	*Medium*
< 5	*Poor*	*Poor*

California Bearing Ratio merupakan perbandingan antara beban hasil pengujian dengan beban standar yang dinyatakan dalam bentuk persentase. Persamaan CBR dapat dituliskan sebagai berikut:

$$CBR=\frac{P_T}{P_S}\times 100\%$$

dengan keterangan:
CBR = nilai *California Bearing Ratio* (%)
P_T = beban hasil pengujian
P_S = beban standar

Pengujian Kuat Geser Tanah

Pengujian kuat geser tanah dilakukan untuk mengetahui besarnya kemampuan tanah dalam menahan gaya geser hingga kondisi runtuh. Nilai kuat geser tanah dipengaruhi oleh parameter kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ), yang menggambarkan karakteristik mekanik tanah terhadap pembebanan. Hubungan antara tegangan geser dan tegangan normal dinyatakan melalui persamaan Mohr–Coulomb (Hardiyatmo, 2010):

$$\tau=c+\sigma\tan\phi$$

dengan:
τ= tegangan geser tanah

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

c = kohesi tanah
σ = tegangan normal
ϕ= sudut geser dalam

Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah merupakan metode perbaikan tanah untuk meningkatkan sifat fisik dan mekanis tanah agar memenuhi persyaratan konstruksi. Proses ini bertujuan meningkatkan kekuatan dan daya dukung tanah, mengurangi plastisitas, serta meningkatkan kestabilan terhadap pengaruh air dan beban luar (Das, 2010).

Stabilisasi tanah dapat dilakukan secara mekanis maupun kimiawi. Stabilisasi mekanis dilakukan melalui pemadatan atau pencampuran tanah, sedangkan stabilisasi kimiawi dilakukan dengan penambahan bahan seperti semen, kapur, dan *Fly Ash* yang bereaksi membentuk senyawa pengikat (Bowles, 1991). Pada tanah berplastisitas tinggi, stabilisasi bertujuan menurunkan plastisitas dan meningkatkan kuat geser tanah. Keberhasilan proses stabilisasi dipengaruhi oleh jenis tanah, jenis dan kadar bahan tambah, kadar air, serta waktu pemeraman (*curing time*).

Fly Ash

Fly Ash merupakan material sisa hasil pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap yang memiliki sifat pozzolan. Material ini tersusun terutama oleh silika (SiO2SiO_2SiO2) dan alumina (Al2O3Al_2O_3Al2O3) yang dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida sehingga menghasilkan senyawa pengikat yang mampu meningkatkan kekuatan tanah (Ibrahim, 2014). Selain itu, ukuran partikel *Fly Ash* yang sangat halus juga berperan dalam mengisi rongga antarbutiran tanah sehingga meningkatkan kerapatan tanah.

Berdasarkan standar ASTM C618, *Fly Ash* dibedakan menjadi dua jenis, yaitu kelas F dan kelas C, berdasarkan kandungan kalsium oksida (CaO). Perbedaan kedua jenis *Fly Ash* tersebut disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Klasifikasi *Fly Ash* Berdasarkan ASTM C618

Kelas *Fly Ash*	Komposisi Utama	Karakteristik	Sifat Reaksi
Kelas F	Dominan silika (SiO2) dan alumina (Al2O3), kandungan CaO rendah	Tidak bersifat mengikat secara langsung dan memerlukan bahan aktivator	Bersifat pozzolan
Kelas C	Mengandung CaO relatif tinggi selain silika dan alumina	Memiliki kemampuan mengeras secara mandiri saat bereaksi dengan air	Bersifat pozzolan dan memiliki karakter sementasi

Pemanfaatan *Fly Ash* dalam stabilisasi tanah sangat dipengaruhi oleh jenis tanah yang digunakan. Pada tanah dengan plastisitas tinggi, penggunaan *Fly Ash* tanpa bahan tambahan umumnya belum memberikan hasil yang optimal. Oleh karena itu, *Fly Ash* sering dikombinasikan dengan bahan lain seperti kapur untuk mempercepat reaksi pozzolan dan meningkatkan efektivitas stabilisasi tanah (Iyer & Scott, 2001).

Kapur

Kapur, terutama kapur tohor (CaO), merupakan bahan yang sering digunakan dalam stabilisasi tanah karena memiliki kandungan kalsium oksida tinggi. Reaksi kapur dengan air menghasilkan kalsium hidroksida yang dapat mengurangi plastisitas tanah dan meningkatkan kemudahan pemadatan melalui proses pertukaran ion dan flokulasi (Bell, 1996).

Selain memperbaiki sifat fisik tanah, kapur juga meningkatkan kekuatan dan daya dukung tanah melalui pembentukan senyawa sementasi hasil reaksi dengan silika dan

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

alumina (Sherwood, 1993). Kombinasi kapur dan *Fly Ash* mampu mempercepat reaksi pozzolanik sehingga menghasilkan tanah yang lebih padat, stabil, dan tahan terhadap perubahan volume.

Faktor Keamanan Lereng dan Analisis Probabilistik Monte Carlo

Analisis kestabilan lereng dilakukan menggunakan Limit Equilibrium Method (LEM) melalui perangkat lunak ROCscience Slide2. Metode ini menghitung Factor of Safety (FoS) sebagai perbandingan antara gaya penahan (*resisting forces*) dan gaya penggerak (*driving forces*) pada bidang longsor potensial (Duncan & Wright, 2005). Secara umum, faktor keamanan dinyatakan sebagai:

$$FoS = \frac{\sum R}{\sum D}$$

Dengan ∑R adalah total gaya penahan dan ∑D adalah total gaya penggerak. Lereng dinyatakan stabil apabila FoS > 1, sedangkan dalam perencanaan geoteknik umumnya digunakan FoS ≥ 1,30 sebagai batas minimum keamanan (Abramson et al., 2002). Kriteria faktor keamanan lereng yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 4

Tabel 4. Kriteria Faktor Keamanan Lereng

Nilai FoS	Kondisi Lereng	Tingkat Risiko
FoS < 1,00	Tidak stabil, diperkirakan telah atau akan mengalami longsor	Sangat tinggi
1,00 ≤ FoS < 1,25	Stabil marginal (kritis)	Tinggi
1,25 ≤ FoS < 1,50	Stabil dengan tingkat keamanan cukup	Sedang
FoS ≥ 1,50	Stabil dan aman untuk kondisi statis	Rendah

Sumber: Dimodifikasi dari Bowles (1996), Abramson et al. (2002), dan Duncan & Wright (2005)

Untuk mempertimbangkan ketidakpastian parameter geoteknik, seperti kohesi (ccc), sudut geser dalam (ϕ), dan berat isi tanah (γ), digunakan Monte Carlo Simulation. Nilai parameter dibangkitkan secara acak berdasarkan distribusi probabilitas menggunakan persamaan:

$$X = \mu + \sigma Z$$

di mana X adalah nilai parameter hasil simulasi, μ adalah nilai rata-rata, σ adalah simpangan baku, dan Z adalah bilangan acak berdistribusi normal standar.

Probabilitas kegagalan lereng (*Probability of Failure* atau PoF) dihitung dari jumlah simulasi dengan FoS < 1**,** menggunakan persamaan:

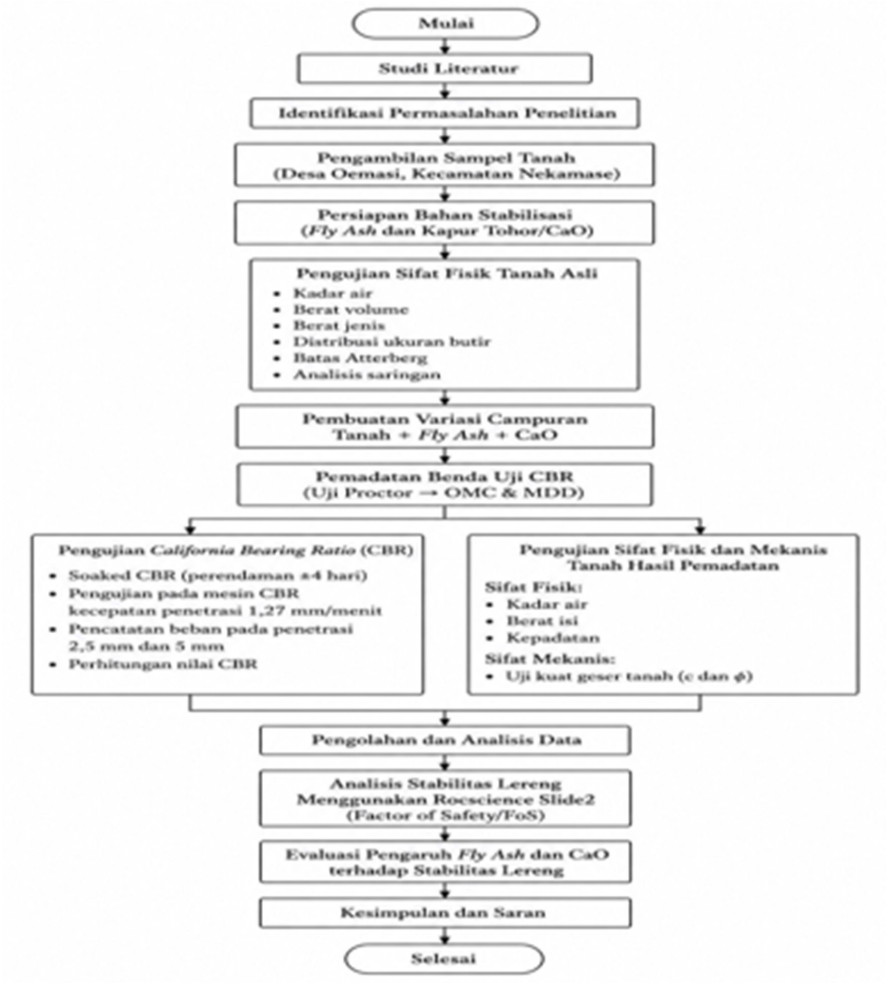
$$PoF = \frac{n(FoS < 1)}{N} \times 100\%$$

dengan n(FoS<1) adalah jumlah simulasi yang menghasilkan nilai FoS < 1, sedangkan NNN adalah jumlah total simulasi Monte Carlo. Nilai PoF digunakan untuk mengevaluasi tingkat risiko kelongsoran akibat variasi parameter geoteknik, sehingga memberikan penilaian kestabilan lereng yang lebih realistis dibandingkan analisis deterministik semata (Fenton & Griffiths, 2008; Rocscience Inc., 2024).

METODE

Penelitian ini dilaksanakan untuk menganalisis pengaruh penggunaan *Fly Ash* dan kapur tohor (CaO) terhadap peningkatan daya dukung tanah lunak pada lokasi longsor di Desa Oemasi, Kecamatan Nekamase, Kabupaten Kupang. Metode penelitian dilakukan melalui serangkaian pengujian laboratorium guna mengetahui perubahan sifat fisik, sifat mekanis, dan nilai daya dukung tanah setelah proses stabilisasi. Tahapan pelaksanaan penelitian disusun secara sistematis dan digambarkan dalam bentuk diagram alir penelitian berikut.

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X



Penelitian ini secara umum dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang saling berkaitan untuk mencapai tujuan penelitian. Tahapan-tahapan tersebut meliputi studi literatur, pengambilan sampel, pengujian laboratorium, pengolahan data, hingga analisis hasil penelitian.

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan dan mempelajari berbagai sumber referensi yang berkaitan dengan topik penelitian, seperti buku, jurnal ilmiah, artikel, laporan penelitian, serta publikasi akademik lainnya. Tahap ini bertujuan untuk memperoleh dasar teori yang mendukung penelitian, memahami hasil-hasil penelitian terdahulu, serta mengidentifikasi permasalahan dan pengembangan penelitian yang masih perlu dikaji lebih lanjut. Selain itu, studi literatur juga digunakan sebagai acuan dalam penyusunan metode penelitian dan analisis data yang akan diterapkan.

Sampel tanah pada penelitian ini berasal dari lokasi longsor di Desa Oemasi, Kecamatan Nekamase, Kabupaten Kupang. Tanah yang digunakan merupakan tanah asli yang kemudian distabilisasi menggunakan bahan tambahan berupa *Fly Ash* dan kapur tohor. Lokasi pengambilan tanah asli dapat dilihat pada Gambar 1.

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X



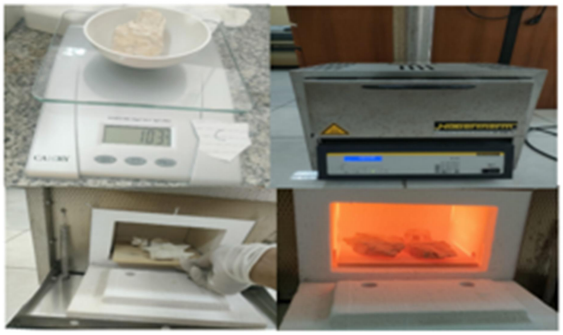
Gambar 1. Lokasi Pengambilan Sampel Tanah

Fly Ash yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari PLTU Bolok, Kecamatan Kupang Barat, Kabupaten Kupang. Material *Fly Ash* diambil langsung dari area penampungan abu hasil pembakaran batu bara untuk digunakan sebagai bahan stabilisasi tanah. Proses pengambilan *Fly Ash* dapat dilihat pada Gambar 2



Gambar 2. Lokasi Pengambilan Sampel *Fly Ash*

Kapur tohor yang digunakan diperoleh dari hasil proses kalsinasi batugamping lokal di Kabupaten Kupang. Proses kalsinasi dilakukan dengan membakar batugampung pada suhu tinggi hingga menghasilkan kapur tohor (CaO) yang digunakan sebagai bahan campuran stabilisasi tanah. Proses kalsinasi batu kapur dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Proses Kalsinasi batugamping

Pengambilan sampel tanah dilakukan menggunakan dua metode, yaitu sampel tanah terganggu (*disturbed soil*) dan sampel tanah tak terganggu (*undisturbed soil*). Sampel tanah tak terganggu digunakan untuk pengujian berat volume tanah, sedangkan sampel tanah terganggu digunakan untuk pengujian laboratorium lainnya, seperti kadar air, berat

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

jenis, analisis saringan, hidrometer, batas Atterberg, uji pemadatan (*Proctor*), dan pengujian daya dukung tanah menggunakan metode CBR laboratorium.

Pengujian awal dilakukan terhadap tanah asli untuk mengetahui karakteristik fisik dan mekanis tanah. Pengujian sifat fisik meliputi kadar air, berat jenis, berat isi, distribusi ukuran butir, serta batas-batas Atterberg. Selain itu, dilakukan pula pengujian sifat mekanis berupa uji kuat geser tanah asli guna mengetahui kemampuan tanah dalam menahan tegangan geser.

Pembuatan benda uji dilakukan dengan mencampurkan tanah asli, kapur, dan *Fly Ash* berdasarkan variasi komposisi yang telah ditentukan. Persentase kapur dan *Fly Ash* dihitung terhadap berat kering tanah asli. Variasi campuran yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Variasi Campuran Kapur dan *Fly Ash* terhadap Berat Kering Tanah Asli

Jenis Sampel	Komposisi Campuran
Variasi I	Tanah asli + 5% kapur + 10% *Fly Ash*
Variasi II	Tanah asli + 5% kapur + 15% *Fly Ash*
Variasi III	Tanah asli + 5% kapur + 20% *Fly Ash*
Variasi IV	Tanah asli + 5% kapur + 25% *Fly Ash*



Gambar 4. Pencampuran *Fly Ash*, kapur dan Tanah Asli

Pengujian sifat fisik dan mekanis tanah setelah distabilisasi dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat fisik dan mekanis tanah setelah proses stabilisasi menggunakan campuran kapur tohor (CaO) dan *Fly Ash*. Seluruh prosedur pengujian mengacu pada standar ASTM yang relevan. Pengujian sifat fisik meliputi berat jenis (*specific gravity*) berdasarkan ASTM D854, distribusi ukuran butir tanah berdasarkan ASTM D2487, serta batas-batas Atterberg yang meliputi batas cair berdasarkan ASTM D423, batas plastis berdasarkan ASTM D424, dan batas susut berdasarkan ASTM D427. Sementara itu, pengujian sifat mekanis meliputi pemadatan menggunakan metode Proctor standar berdasarkan ASTM D698, pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) berdasarkan ASTM D1883, dan pengujian kuat geser tanah untuk memperoleh parameter kohesi dan sudut geser dalam. Pengujian CBR dilakukan terhadap sampel tanah yang telah dicampur dengan kapur tohor (CaO) dan *Fly Ash* sesuai variasi komposisi yang telah ditentukan. Sampel kemudian dipadatkan dalam cetakan CBR menggunakan kadar air optimum yang diperoleh dari hasil pengujian Proctor. Benda uji selanjutnya direndam selama kurang lebih empat hari (*soaked CBR*) untuk mensimulasikan kondisi tanah dalam keadaan jenuh. Setelah proses perendaman selesai, benda uji diuji menggunakan mesin CBR dengan kecepatan penetrasi 1,27 mm/menit. Beban penetrasi dicatat pada penetrasi 2,5 mm dan 5 mm, kemudian nilai CBR ditentukan berdasarkan perbandingan antara beban hasil pengujian dan beban standar pada masing-masing penetrasi.

Analisis stabilitas lereng dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan data parameter tanah hasil pengujian laboratorium, yang meliputi kadar air, berat isi, nilai CBR, serta

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

parameter kuat geser tanah. Data tersebut digunakan sebagai parameter input dalam pemodelan menggunakan perangkat lunak Rocscience Slide2**.** Tahapan analisis dilanjutkan dengan penyusunan geometri lereng sesuai kondisi penelitian, kemudian dilakukan perhitungan kestabilan menggunakan metode *Limit Equilibrium Method* untuk memperoleh nilai faktor keamanan (FoS) secara numerik. Dalam analisis geoteknik, stabilitas lereng merupakan kondisi kestabilan suatu lereng, sedangkan faktor keamanan (FoS) digunakan sebagai parameter kuantitatif untuk menilai kondisi tersebut. Hasil analisis digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi campuran terhadap nilai CBR optimum yang mampu meningkatkan kestabilan lereng serta mengurangi potensi kelongsoran pada lereng jalan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Komposisi Unsur Batugamping Lokal Berdasarkan Analisis SEM-EDS

Karakterisasi batugamping lokal dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (SEM-EDS) untuk mengetahui komposisi unsur sebelum proses kalsinasi. Hasil analisis menunjukkan keberadaan unsur C, O, Mg, Al, Si, Ca, Cu, dan Zn sebagaimana disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Komposisi Unsur Batugamping Berdasarkan Analisis SEM-EDS

No.	Unsur	Garis Spektrum	Konsentrasi (wt.%)	Konsentrasi (at.%)
1	Karbon (C)	K	35,50 ± 0,08	46,54 ± 0,10
2	Oksigen (O)	K	46,67 ± 0,18	45,93 ± 0,18
3	Magnesium (Mg)	K	0,21 ± 0,01	0,13 ± 0,01
4	Aluminium (Al)	K	0,53 ± 0,01	0,31 ± 0,01
5	Silikon (Si)	K	3,32 ± 0,03	1,86 ± 0,02
6	Kalsium (Ca)	K	12,56 ± 0,06	4,93 ± 0,02
7	Tembaga (Cu)	K	0,68 ± 0,03	0,17 ± 0,01
8	Seng (Zn)	K	0,54 ± 0,03	0,13 ± 0,01
	Total		100,00	100,00

Catatan: wt.% = persentase berat; at.% = persentase atom.
Sumber: Hasil analisis SEM-EDS, diolah oleh penulis.

Karakterisasi Komposisi Unsur *Fly Ash* Berdasarkan Analisis SEM-EDS

Hasil analisis SEM-EDS terhadap *Fly Ash* disajikan pada Tabel 7. Hasil analisis menunjukkan bahwa *Fly Ash* tersusun atas unsur utama oksigen (O), karbon (C), besi (Fe), silikon (Si), aluminium (Al), dan kalsium (Ca), serta sejumlah unsur minor lainnya.

Tabel 7. Komposisi Unsur *Fly Ash* Berdasarkan Analisis SEM-EDS

No	Unsur	Garis Spektrum	Mass (%)	Atomic (%)
1	Karbon (C)	K	22,10 ± 0,05	33,10 ± 0,08
2	Oksigen (O)	K	44,00 ± 0,09	49,48 ± 0,10
3	Magnesium (Mg)	K	3,17 ± 0,02	2,34 ± 0,01
4	Aluminium (Al)	K	5,72 ± 0,02	3,82 ± 0,02
5	Silikon (Si)	K	6,54 ± 0,03	4,19 ± 0,02
6	Kalium (K)	K	1,59 ± 0,01	0,89 ± 0,01
7	Kalsium (Ca)	K	5,67 ± 0,02	2,55 ± 0,01
8	Titanium (Ti)	K	0,26 ± 0,01	0,10 ± 0,00
9	Besi (Fe)	K	9,78 ± 0,04	3,15 ± 0,01
10	Tembaga (Cu)	K	0,86 ± 0,02	0,24 ± 0,01

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

	Total		100,00	100,00

Catatan: Mass (wt.%) = persentase berat; Atomic (at.%) = persentase atom.

Berdasarkan Tabel 7, *Fly Ash* didominasi oleh O (44,00 wt.%), C (22,10 wt.%), Fe (9,78 wt.%), Si (6,54 wt.%), Al (5,72 wt.%), dan Ca (5,67 wt.%). Kandungan Si, Al, dan Fe sebesar 22,04 wt.% menunjukkan keberadaan unsur pembentuk aluminosilikat dan oksida, sedangkan Ca berpotensi mendukung pembentukan senyawa pengikat. Komposisi tersebut menunjukkan potensi *Fly Ash* sebagai bahan tambahan untuk stabilisasi tanah.

Hasil Analisis Komposisi Kimia *Fly Ash* Menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF)

Analisis X-Ray Fluorescence (XRF) dilakukan untuk mengidentifikasi komposisi kimia *Fly Ash* berdasarkan kandungan oksida utamanya. Hasil analisis menunjukkan bahwa *Fly Ash* didominasi oleh SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, CaO, MgO, dan SO_3, sebagaimana disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Komposisi Unsur *Fly Ash* Berdasarkan Analisis SEM-EDS

No.	Komponen Utama	Kadar (%)
1	SiO_2	29,943
2	Fe_2O_3	24,349
3	Al_2O_3	19,229
4	CaO	11,966
5	MgO	5,389
6	SO_3	5,068
	Total	95,944

Sumber: Hasil analisis XRF, diolah oleh penulis.

Berdasarkan Tabel 8, *Fly Ash* didominasi oleh SiO_2 (29,943%), Fe_2O_3 (24,349%), dan Al_2O_3 (19,229%), dengan total 73,521%, serta CaO (11,966%), MgO (5,389%), dan SO_3 (5,068%). Dominasi SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3 menunjukkan karakter aluminosilikat-besi, sedangkan CaO berpotensi mendukung proses pengikatan dalam stabilisasi tanah. Secara keseluruhan, kandungan SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, dan CaO menunjukkan potensi *Fly Ash* sebagai bahan stabilisasi tanah.

Hasil Analisis Komposisi Kimia Kapur Tohor Hasil Kalsinasi Batugamping Menggunakan XRF

Kapur tohor sebagai bahan stabilisasi diperoleh melalui proses kalsinasi batugamping pada temperatur berbeda untuk Sampel A dan B. Perbedaan kondisi kalsinasi menghasilkan karakteristik kimia yang dianalisis menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) untuk menentukan komposisi oksida utama, terutama CaO sebagai komponen dominan. Hasil analisis kedua sampel disajikan pada Tabel 9

Tabel 9. Komposisi oksida utama kapur tohor hasil kalsinasi batugamping berdasarkan analisis XRF

Komponen oksida	**Sampel A (%)**	**Sampel B (%)**	**Nilai rerata (%)**
Kalsium oksida (CaO)	84,465	85,001	84,733
Magnesium oksida (MgO)	1,044	0,901	0,973
Silikon dioksida (SiO_2)	8,555	8,246	8,401
Aluminium oksida (Al_2O_3)	2,697	2,830	2,764
Besi (III) oksida (Fe_2O_3)	1,531	1,464	1,498

Sumber**:** Hasil analisis XRF, diolah oleh penulis.

Berdasarkan Tabel 9, CaO merupakan oksida dominan, dengan kadar 84,465% pada Sampel A dan 85,001% pada Sampel B, serta rata-rata 84,733%. Selisih 0,536

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

poin persentase menunjukkan kandungan CaO kedua sampel relatif seragam. Oksida lainnya terdiri atas SiO_2 (8,555–8,246%), Al_2O_3 (2,697–2,830%), Fe_2O_3 (1,531–1,464%), dan MgO (1,044–0,901%). Tingginya kandungan CaO menunjukkan keberhasilan proses kalsinasi dalam menghasilkan kapur tohor berkadar kalsium oksida tinggi. CaO hasil dekomposisi $CaCO_3$ berperan dalam pembentukan $Ca(OH)_2$ dan reaksi pengikatan pada stabilisasi tanah, sehingga kapur dengan kadar CaO rata-rata 84,733% berpotensi digunakan sebagai bahan stabilisasi tanah.

Pengujian Sifat Fisik dan Mekanis Tanah Asli

Pengujian sifat fisik tanah dilakukan untuk mengetahui karakteristik dasar tanah asli sebelum proses stabilisasi. Pengujian yang dilakukan meliputi kadar air tanah, berat jenis partikel tanah (*specific gravity*), distribusi ukuran butir melalui analisis saringan dan hidrometer, serta pengujian batas Atterberg yang terdiri atas batas cair (*liquid limit*), batas plastis (*plastic limit*), dan indeks plastisitas (*plasticity index*). Hasil dari seluruh pengujian sifat fisik tanah tersebut kemudian dianalisis dan disajikan secara rinci pada Tabel 10.

Tabel 10. Rekapitulasi Hasil Pengujian Sifat Fisik dan Mekanik Tanah Asli

No.	Kelompok Pengujian	Parameter	Tanah Asli	Satuan
1	Pengujian Sifat Fisik			
a)	Karakteristik Material Tanah	Berat Jenis (Specific Gravity, Gs)	2,71	–
		Berat Isi Tanah Kering (γd) (Rata-rata)	1,60	g/cm³
		Sampel 1	1,58	g/cm³
		Sampel 2	1,60	g/cm³
		Sampel 3	1,62	g/cm³
		Kadar Air (Water Content, w)	25,31	%
b)	Konsistensi Atterberg	Batas Cair (Liquid Limit, LL)	58,20	%
		Batas Plastis (Plastic Limit, PL)	29,36	%
		Indeks Plastisitas (Plasticity Index, PI)	28,83	%
c)	Analisis Saringan	Persentase Tertahan Ayakan No. 200	97,93	%
		Persentase Lolos Ayakan No. 200	2,07	%
2	Pengujian Sifat Mekanik			
a.	Uji Geser Langsung (Direct Shear Test)	Sudut Geser Dalam (φ) (Rata-rata)	10,57	°
		Sampel 1	9,30	°
		Sampel 2	10,80	°
		Sampel 3	11,60	°
		Kohesi (**c**) (Rata-rata)	0,17	kg/cm²
		Sampel 1	0,15	kg/cm²
		Sampel 2	0,17	kg/cm²
		Sampel 3	0,18	kg/cm²

Sumber: Hasil pengujian laboratorium, diolah oleh penulis.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa tanah asli memiliki berat jenis (Gs) sebesar 2,71, berat isi tanah kering rata-rata 1,60 g/cm³, dan kadar air 25,31%. Nilai LL sebesar 58,20%, PL sebesar 29,36%, dan PI sebesar 28,83% menunjukkan bahwa tanah

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

tergolong lempung berplastisitas tinggi. Hasil uji geser langsung memberikan sudut geser dalam (φ) rata-rata sebesar 10,57° dan kohesi (c) rata-rata sebesar 0,17 kg/cm², yang menunjukkan kuat geser tanah relatif rendah. Secara keseluruhan, tanah asli memiliki daya dukung dan kestabilan yang kurang baik, sehingga memerlukan stabilisasi untuk meningkatkan kekuatan geser dan stabilitas lereng.

Stabilisasi Tanah Menggunakan Kapur dan *Fly Ash*

Setelah proses stabilisasi menggunakan kapur dan *Fly Ash*, hasil pengujian sifat fisik dan mekanis tanah dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11. Nilai Sifat Fisik dan Mekanis Tanah Hasil Stabilisasi Menggunakan Campuran Kapur dan *Fly Ash*

No.	Parameter Pengujian	Satuan	Sampel	Variasi I	Variasi II	Variasi III	Variasi IV
1	Karakteristik Fisik Tanah						
a)	Berat jenis (Specific Gravity)	-	Rata-rata	2,31	2,41	2,52	2,63
b)	Kadar air	%	Rata-rata	17,13	14,97	15,90	11,83
c)	Berat isi tanah kering	g/cm³	1	1,56	1,54	1,52	1,50
			2	1,58	1,56	1,54	1,52
			3	1,60	1,58	1,55	1,54
2	Analisis Saringan						
a.	Persentase tertahan ayakan No. 200	%	Rata-rata	36,69	31,15	29,48	25,11
b.	Persentase lolos ayakan No. 200	%	Rata-rata	63,31	68,85	70,52	74,89
3	Pegujian Sifat Mekanis						
a)	Kadar air optimum (OMC)	%	Rata-rata	11,15	13,60	14,60	15,84
b)	Berat volume kering maksimum (MDD)	g/cm³	Rata-rata	1,73	1,71	1,66	1,63
c)	Nilai California Bearing Ratio (CBR)	%	Rata-rata	13,40	15,31	17,77	19,04
4	Uji Geser Langsung (Direct Shear Test)						
a.	Sudut geser dalam (φ)	°	1	17,1	21,2	25,2	28,2
			2	18,8	22,6	26,9	29,5
			3	19,9	23,8	27,8	30,6
b.	Kohesi (c)	kg/cm²	1	0,23	0,30	0,39	0,46
			2	0,25	0,33	0,42	0,50
			3	0,27	0,36	0,45	0,52

Sumber: *Hasil pengujian laboratorium, diolah oleh penulis.*

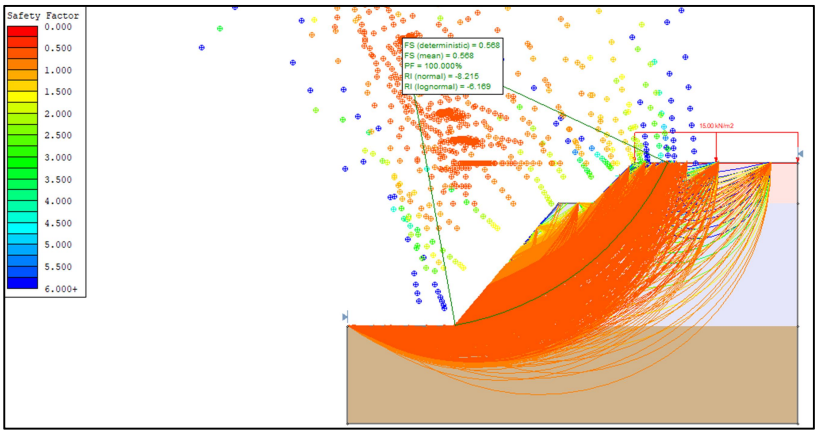
Hasil pengujian Laboratorium menunjukkan bahwa penambahan 5% kapur dan peningkatan kadar *Fly Ash* dari 10% hingga 25% meningkatkan kualitas fisik dan mekanik tanah. Nilai berat jenis meningkat dari 2,31 menjadi 2,63, sedangkan kadar air menurun dari 17,13% menjadi 11,83%. Pada uji pemadatan, kadar air optimum (OMC) meningkat dari 11,15% menjadi 15,84%, sementara berat volume kering maksimum (MDD) menurun dari 1,73 menjadi 1,63 g/cm³.

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Peningkatan kadar *Fly Ash* juga meningkatkan nilai CBR dari 13,40% menjadi 19,04%, serta memperbaiki parameter kuat geser, yaitu sudut geser dalam (φ) dari 17,1–19,9° menjadi 28,2–30,6° dan kohesi (c) dari 0,23–0,27 kg/cm² menjadi 0,46–0,52 kg/cm². Hasil tersebut menunjukkan bahwa campuran 5% kapur dan 25% *Fly Ash* (Variasi IV) memberikan peningkatan daya dukung dan kuat geser terbesar, sehingga menjadi komposisi yang paling efektif untuk meningkatkan stabilitas tanah.

Hasil Analisis Kestabilan Lereng pada Tanah Asli dan Tanah yang Distabilisasi

Analisis kestabilan lereng dilakukan pada tanah asli dan tanah yang telah distabilisasi menggunakan kapur 5% dengan variasi *Fly Ash* 10% (Variasi I), 15% (Variasi II), 20% (Variasi III), dan 25% (Variasi IV). Analisis menggunakan parameter geoteknik hasil pengujian laboratorium yang meliputi berat isi tanah kering (γ), kohesi (c), dan sudut geser dalam (φ). Nilai parameter tersebut diperoleh dari rata-rata tiga sampel pengujian yang mewakili bagian atas, tengah, dan dasar lereng, kemudian digunakan sebagai input dalam analisis kestabilan lereng dengan beban permukaan sebesar 15 kN/m². Evaluasi dilakukan berdasarkan perubahan Factor of Safety (FS) untuk membandingkan kondisi lereng sebelum dan sesudah stabilisasi. Peningkatan nilai FS menunjukkan bahwa penambahan kapur dan *Fly Ash* efektif meningkatkan kuat geser tanah, sehingga mampu meningkatkan stabilitas lereng dan mengurangi potensi terjadinya kelongsoran.

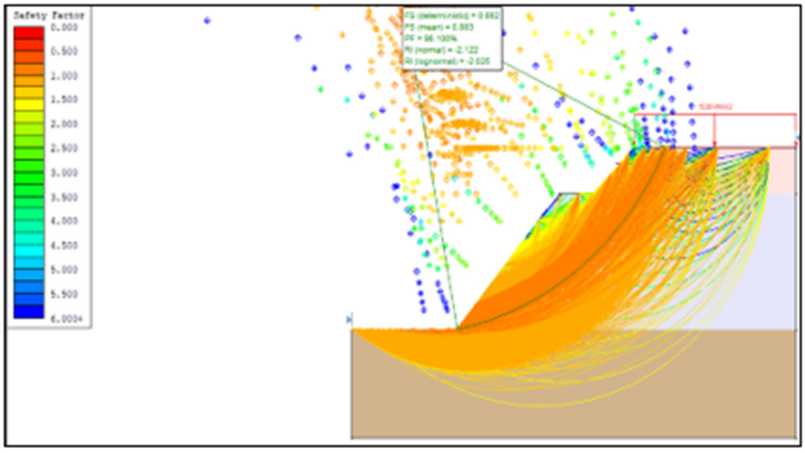


Gambar 5. Hasil analisis probabilistik faktor keamanan lereng pada kondisi tanah asli (tanpa stabilisasi)

Berdasarkan hasil analisis probabilistik menggunakan metode Monte Carlo pada Rocscience Slide, analisis dilakukan pada tanah asli (tanpa stabilisasi) dengan menggunakan nilai rata-rata parameter geoteknik yang diperoleh dari tiga sampel pengujian yang mewakili bagian atas, tengah, dan dasar lereng. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai Factor of Safety (FS) deterministik sebesar 0.568, sedangkan FS rata-rata sebesar 0.568, yang mengindikasikan bahwa lereng berada dalam kondisi tidak stabil karena nilai FS lebih kecil dari 1.00. Nilai Probability of Failure (PF) sebesar 100.000% menunjukkan bahwa seluruh simulasi Monte Carlo menghasilkan kondisi gagal, sehingga probabilitas terjadinya kelongsoran sangat tinggi. Selain itu, nilai Reliability Index (RI) pada distribusi Normal sebesar −8.251 dan distribusi Lognormal sebesar −8.769 mengindikasikan tingkat keandalan lereng yang sangat rendah. Bidang longsor kritis yang terbentuk merupakan longsoran rotasional dengan bidang gelincir yang memotong massa tanah hingga melewati kaki lereng. Hasil ini menunjukkan bahwa parameter geoteknik tanah asli (tanpa stabilisasi), geometri lereng, dan beban permukaan sebesar 15 kN/m² belum mampu menghasilkan faktor keamanan

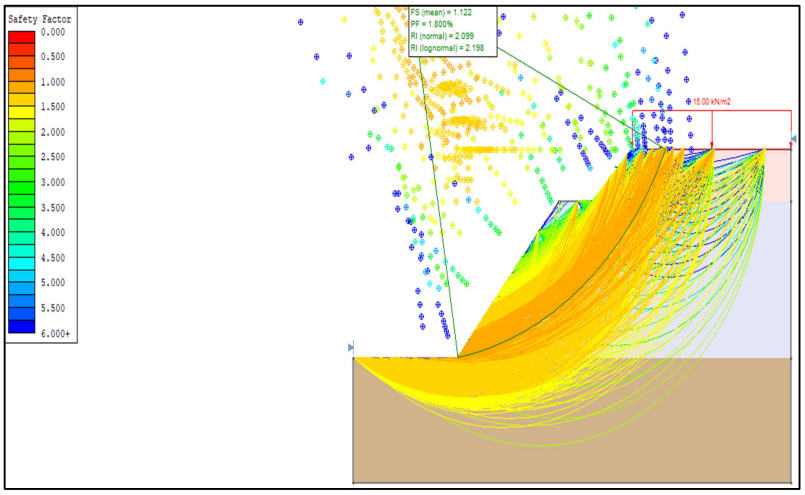
E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

lereng yang memenuhi kriteria stabilitas, sehingga lereng memiliki potensi kelongsoran yang sangat tinggi.



Gambar 6. Hasil analisis probabilistik faktor keamanan lereng pada tanah hasil stabilisasi Variasi I (Tanah Asli + 5% Kapur + 10% *Fly Ash*)

Hasil Analisis probabilistik menggunakan metode Monte Carlo pada Rocscience Slide untuk Variasi I (tanah asli + 5% kapur + 10% *Fly Ash*) dilakukan berdasarkan nilai rata-rata parameter geoteknik dari tiga sampel pengujian (bagian atas, tengah, dan dasar lereng). Hasil analisis menunjukkan nilai Factor of Safety (FS) deterministik sebesar 0,882 dan FS rata-rata sebesar 0,883, yang mengindikasikan lereng berada dalam kondisi tidak stabil (FS < 1,0). Nilai Reliability Index (RI) Normal sebesar −2,111 dan RI Lognormal sebesar −2,015 menunjukkan probabilitas kegagalan yang tinggi. Bidang longsor kritis berbentuk rotasional dan melewati kaki lereng, sehingga geometri lereng, parameter kuat geser tanah, dan beban permukaan 15 kN/m² belum mampu memberikan stabilitas lereng yang memadai.

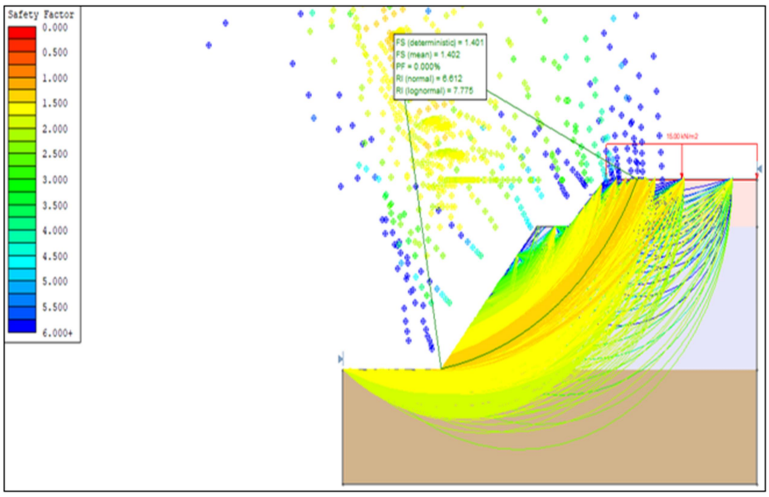


Gambar 7. Hasil analisis probabilistik faktor keamanan lereng pada tanah hasil stabilisasi Variasi II (Tanah Asli + 5% Kapur + 15% *Fly Ash*)

Analisis probabilistik Monte Carlo pada Variasi II (Tanah Asli + 5% Kapur + 15% *Fly Ash*) menggunakan parameter geoteknik yang diperoleh dari tiga sampel pengujian (bagian atas, tengah, dan dasar lereng) dengan pembebanan permukaan

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

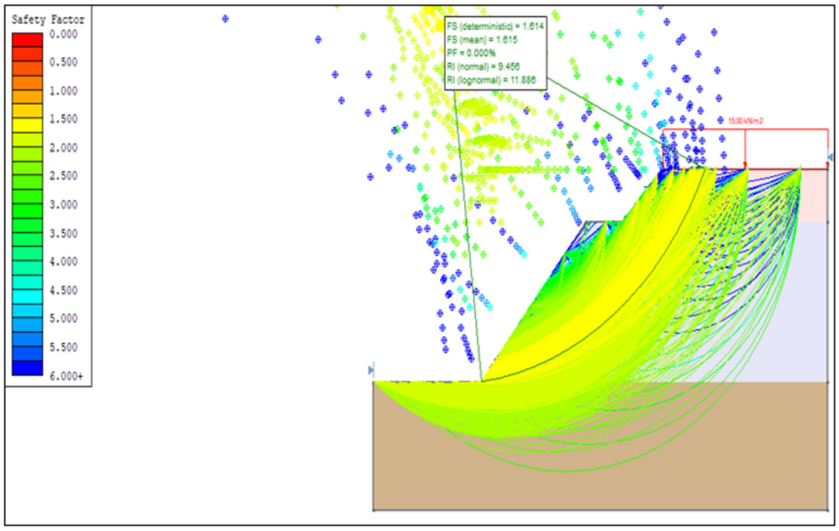
(surcharge load) sebesar 15 kN/m². Hasil analisis menunjukkan faktor keamanan rata-rata (FS) sebesar 1,122, Probability of Failure (PF) sebesar 1,800%, serta Reliability Index (RI) sebesar 2,099 (normal) dan 2,198 (lognormal). Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan 5% kapur dan 15% *Fly Ash* mampu meningkatkan kuat geser tanah sehingga lereng berada pada kondisi cukup stabil dengan risiko kelongsoran yang rendah meskipun menerima beban permukaan sebesar 15 kN/m².



Gambar 8. Hasil analisis probabilistik faktor keamanan lereng pada tanah hasil stabilisasi Variasi III (Tanah Asli + 5% Kapur + 20% *Fly Ash*)

Hasil Analisis probabilistik menggunakan metode Monte Carlo pada Rocscience Slide untuk Variasi III (Tanah asli + 5% kapur + 20% *Fly Ash*) dilakukan berdasarkan nilai rata-rata parameter geoteknik dari tiga sampel pengujian yang mewakili bagian atas, tengah, dan dasar lereng. Hasil analisis menunjukkan Factor of Safety (FS) deterministik sebesar 1.401, sedangkan FS rata-rata sebesar 1.402, yang mengindikasikan bahwa lereng berada dalam kondisi stabil. Nilai Probability of Failure (PF) sebesar 0.000%, dengan Reliability Index (RI) distribusi Normal sebesar 6.612 dan Lognormal sebesar 7.775, menunjukkan tingkat keandalan lereng yang sangat tinggi. Bidang longsor kritis yang terbentuk berupa longsoran rotasional, namun kombinasi parameter kuat geser tanah hasil stabilisasi, geometri lereng, serta beban permukaan sebesar 15 kN/m² telah mampu memberikan faktor keamanan lereng yang memenuhi kriteria stabilitas (FS > 1.30) sehingga potensi kelongsoran sangat kecil.

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X



Gambar 9. Hasil analisis probabilistik faktor keamanan lereng pada tanah hasil stabilisasi Variasi IV (Tanah Asli + 5% Kapur + 25% *Fly Ash*)

Berdasarkan hasil analisis probabilistik menggunakan metode Monte Carlo pada Rocscience Slide untuk Variasi IV (Tanah asli + 5% kapur + 25% *Fly Ash*) dilakukan berdasarkan nilai rata-rata parameter geoteknik dari tiga sampel pengujian yang mewakili bagian atas, tengah, dan dasar lereng. Hasil analisis menunjukkan Factor of Safety (FS) deterministik sebesar 1.614, sedangkan FS rata-rata sebesar 1.615, yang mengindikasikan bahwa lereng berada dalam kondisi stabil karena nilai FS telah melebihi batas minimum yang direkomendasikan (FS > 1.30). Nilai Probability of Failure (PF) sebesar 0.000% menunjukkan bahwa peluang terjadinya kelongsoran sangat kecil. Selain itu, Reliability Index (RI) distribusi Normal sebesar 9.456 dan Lognormal sebesar 11.880 mengindikasikan tingkat keandalan lereng yang sangat tinggi. Bidang longsor kritis yang terbentuk berupa longsoran rotasional, namun seluruh bidang gelincir memiliki nilai faktor keamanan yang tinggi sehingga tidak berkembang menjadi kondisi kritis. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi parameter geoteknik hasil stabilisasi, geometri lereng, serta beban permukaan sebesar 15 kN/m² mampu memberikan kestabilan lereng yang sangat baik, sehingga penggunaan 5% kapur dan 25% *Fly Ash* terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas lereng dan menurunkan potensi terjadinya kelongsoran.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium dan analisis kestabilan lereng menggunakan metode Monte Carlo pada Rocscience Slide, dapat disimpulkan bahwa kapur tohor hasil kalsinasi memiliki kandungan CaO yang tinggi, yaitu 84,465% pada Sampel A dan 85,001% pada Sampel B, dengan nilai rata-rata 84,733%. Kandungan tersebut menunjukkan bahwa kapur hasil kalsinasi memiliki karakteristik kimia yang mendukung pemanfaatannya sebagai bahan stabilisasi tanah. Tanah asli menunjukkan karakteristik fisik dan mekanis yang relatif rendah, dengan berat isi kering sebesar 1,60 g/cm³, kohesi rata-rata 0,17 kg/cm², dan sudut geser dalam 10,57°. Kondisi tersebut menghasilkan nilai *Factor of Safety* (FS) sebesar 0,568 dan *Probability of Failure* (PF) sebesar 100%, yang menunjukkan bahwa lereng berada dalam kondisi tidak stabil dengan tingkat potensi longsor yang sangat tinggi.

Stabilisasi menggunakan 5% kapur tohor dan variasi *Fly Ash* sebesar 10–25% terbukti meningkatkan karakteristik mekanis tanah, yang ditunjukkan melalui

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

peningkatan nilai CBR, kohesi, dan sudut geser dalam. Peningkatan parameter mekanis tersebut berkontribusi terhadap peningkatan nilai FS dan penurunan PF pada lereng. Variasi I dengan komposisi 5% kapur dan 10% *Fly Ash* menghasilkan FS sebesar 0,883 sehingga belum memenuhi kriteria kestabilan, sedangkan Variasi II dengan 5% kapur dan 15% *Fly Ash* menghasilkan FS sebesar 1,122 dengan PF sebesar 1,8% dan masih belum memenuhi kriteria kestabilan yang ditetapkan. Variasi III dengan 5% kapur dan 20% *Fly Ash* menghasilkan FS sebesar 1,402 dan PF sebesar 0%, sehingga telah mencapai kondisi kestabilan yang lebih baik. Variasi IV dengan komposisi 5% kapur dan 25% *Fly Ash* memberikan hasil terbaik dengan FS sebesar 1,615, PF sebesar 0%, serta *Reliability Index* tertinggi.

Secara keseluruhan, kombinasi kapur tohor hasil kalsinasi dan *Fly Ash* mampu memperbaiki karakteristik tanah lempung sekaligus meningkatkan daya dukung dan kestabilan lereng. Variasi IV dengan komposisi 5% kapur dan 25% *Fly Ash* merupakan komposisi paling efektif berdasarkan keseluruhan parameter yang dianalisis dan dapat dipertimbangkan sebagai alternatif stabilisasi tanah lempung di Desa Oemasi. Temuan ini menunjukkan bahwa pemanfaatan kapur tohor berbasis batugamping dolomit lokal yang dikombinasikan dengan *Fly Ash* berpotensi menjadi alternatif material stabilisasi berbasis sumber daya lokal untuk meningkatkan kinerja tanah dasar dan mengurangi risiko ketidakstabilan lereng.

DAFTAR PUSTAKA

Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2002). *Slope stability and stabilization methods* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Abdelbaset, A. M., Katunský, D., Zeleňáková, M., & El-Feky, M. H. (2024). Mechanical properties stabilization of low plasticity Kaolin soil using *Fly Ash* and hydrated lime. *Case Studies in Construction Materials, 21*, e03662. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03662

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Guide for design of pavement structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

ASTM International. (2019). *ASTM C618-19: Standard specification for coal Fly Ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM International.

Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology, 42*(4), 223–237.

Bowles, J. E. (1991). *Engineering properties of soils and their measurement* (4th ed.). McGraw-Hill.

Bowles, J. E. (1997). *Foundation analysis and design* (5th ed.). McGraw-Hill.

Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7th ed.). Cengage Learning.

Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons.

Fenton, G. A., & Griffiths, D. V. (2008). *Risk assessment in geotechnical engineering*. John Wiley & Sons.

Hardiyatmo, H. C. (2010). *Mekanika tanah II* (Edisi ke-5). Gadjah Mada University Press.

Hardiyatmo, H. C. (2012). *Mekanika tanah I* (Edisi ke-6). Gadjah Mada University Press.

Ibrahim, B. (2014). Pemanfaatan *Fly Ash* untuk stabilisasi tanah lempung. *Jurnal Teknik Sipil*.

Ingles, O. M., & Metcalf, J. A. (1972). *Soil stabilization: Principles and practice*. Butterworths.

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Iyer, R. S., & Scott, J. A. (2001). Power station *Fly Ash*—A review of value-added utilization outside of the construction industry. *Resources, Conservation and Recycling, 31*(3), 217–228.

Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education.

Rafiei, H., & Maleki, M. (2024). An experimental study to investigate the mechanical behaviour of low plasticity fine-grained soil stabilized with different contents of lime and *Fly Ash*. *International Journal of Geotechnical Engineering, 18*(3), 249–261. https://doi.org/10.1080/19386362.2024.2377446

Rocscience Inc. (2024). *Slide2 user guide*. Rocscience Inc.

Sherwood, P. (1993). *Soil stabilization with cement and lime*. HMSO.

Soltani, A., Deng, A., Taheri, A., Sridharan, A., & Gharabaghi, B. (2023). Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review. *Construction and Building Materials, 398*, 132435. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132435

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

The Asphalt Institute. (1970). *Soil manual for design of asphalt pavement structures*. The Asphalt Institute.

Turnbull, W. J. (1968). *A review of the California Bearing Ratio test*. U.S. Army Corps of Engineers.

Zafar, T., Ansari, M. A., & Husain, A. (2023). Soil stabilization by reinforcing natural and synthetic fibers—A state of the art review. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.503