

## ANALISIS PENGARUH MINERAL SMEKTIT TERHADAP KESTABILAN LERENG PADA AREA PEMBANGUNAN BENDUNGAN ATAS CISOKAN

MUHAMAD RAIHAN<sup>1,2\*</sup>, IMAM ACHMAD SADISUN<sup>1</sup>, INDRA ANDRA DINATA<sup>1</sup>

1. Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung (ITB), Jl. Ganesha No.10, Bandung, Jawa Barat, Indonesia
  2. Natural Science Program, Faculty of Science and Engineering, Ehime University, Prefektur Ehime, Jepang
- \*Korespondensi: raihan1806@gmail.com

**Sari** – Pembangunan PLTA Cisokan (Upper Cisokan Pumped Storage/UCPS) di Kabupaten Bandung Barat merupakan proyek strategis nasional yang mendukung target *net zero emission*. Kegiatan ekskavasi dalam proyek ini menghasilkan lereng baru yang perlu dikaji kestabilannya berdasarkan sifat keteknikan dan kandungan mineral tanah di daerah tersebut. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh mineral montmorilonit dan saponit terhadap kestabilan lereng pada area bendungan atas Cisokan. Tiga sampel tanah (L-01, L-02, dan L-03) diuji untuk memperoleh berat jenis, kohesi, dan sudut geser dalam, serta dianalisis mineraloginya menggunakan uji *X-Ray Diffraction* (XRD). Analisis kestabilan dilakukan dengan metode kesetimbangan batas menggunakan perhitungan Morgenstern-Price pada kondisi pembebanan seismik. Hasil menunjukkan bahwa tanah L-02 memiliki faktor keamanan terendah dengan 24 dari 27 skenario geometri berada pada kondisi tidak stabil. Berdasarkan hasil analisis XRD, L-02 mengandung jenis montmorilonit yang memiliki potensi *swelling* lebih tinggi dibandingkan saponit yang ditemukan pada L-01 dan L-03.

**Kata kunci:** faktor keamanan, kestabilan lereng, sifat keteknikan tanah, PLTA Cisokan, smektit, XRD.

**Abstract** – *The construction of the Cisokan Hydroelectric Power Plant (Upper Cisokan Pumped Storage/UCPS) in West Bandung Regency is a national strategic project that supports the net-zero emission target. Excavation activities in this project have created new slopes whose stability must be evaluated based on the engineering properties and mineral composition of the local soil. This study aims to analyze the influence of montmorillonite and saponite minerals on the slope stability in the upper Cisokan dam area. Three soil samples (L-01, L-02, and L-03) were tested to determine their specific gravity, cohesion, and internal friction angle, and their mineralogy was analyzed using X-Ray Diffraction (XRD). Slope stability analysis was performed using the limit equilibrium method with the Morgenstern-Price approach under seismic loading conditions. The results show that soil sample L-02 has the lowest factor of safety, with 24 of the 27 geometric scenarios being unstable. From XRD analysis, L-02 contained montmorillonite, which has a higher swelling potential than the saponite found in L-01 and L-03.*

**Key words:** *factor of safety, slope stability, soil engineering properties, Cisokan hydropower plant, smectite, XRD.*

### 1. PENDAHULUAN

Infrastruktur merupakan salah satu komponen yang paling penting dalam proses pembangunan suatu negara berkembang. Salah satu contoh infrastruktur yang sangat dibutuhkan pada saat ini adalah infrastruktur yang berkaitan dengan bidang energi, khususnya energi terbarukan. Untuk memenuhi kebutuhan listrik penduduk tentunya perlu pembangkit listrik yang memadai. PT PLN (Persero) merupakan perusahaan di Indonesia yang dibentuk untuk menyediakan energi listrik yang memadai demi kehidupan bangsa Indonesia. Salah satu usaha PT PLN (Persero) untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah dengan membuat suatu infrastruktur berupa pembangkit listrik tenaga air (PLTA). PT PLN (Persero) saat ini memiliki

banyak PLTA, salah satunya adalah PLTA Cisokan yang juga disebut sebagai *The Upper Cisokan Pumped Storage* (UCPS) yang saat ini masih dalam proses pembangunan.

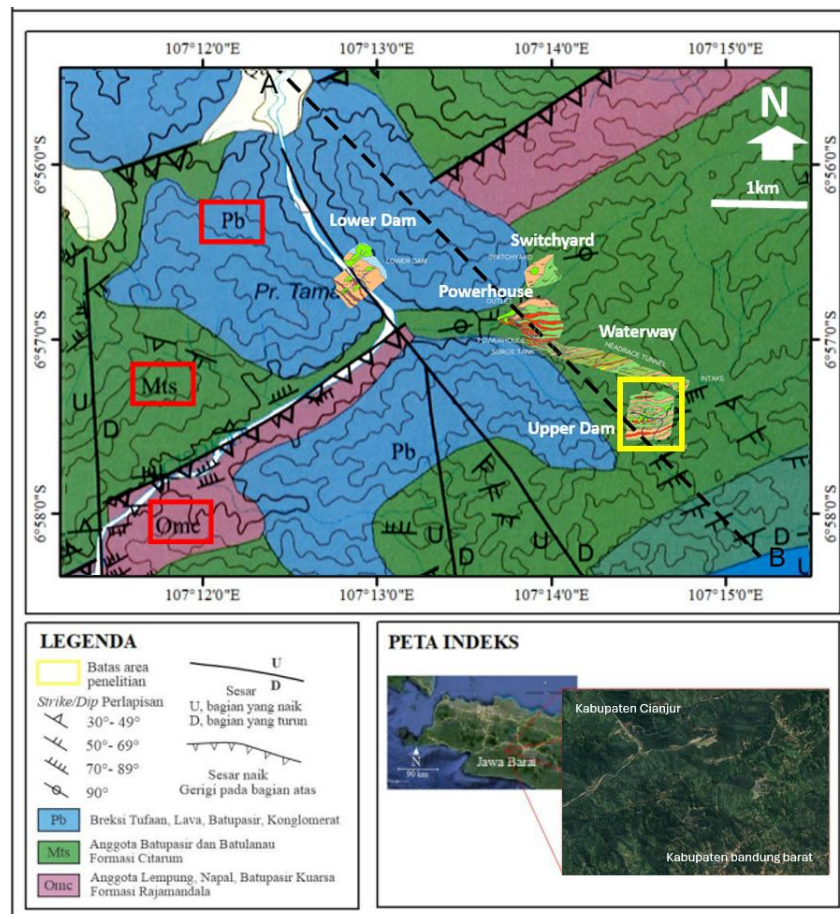
Secara administratif lokasi penelitian terletak pada Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat. Lokasi penelitian merupakan area pembangunan bendungan atas Cisokan/*Upper Dam Cisokan*. Dalam keberjalanan pembangunannya tentu akan ada proses ekskavasi yang akan menghasilkan lereng baru baik untuk keperluan pembuatan jalan akses maupun keperluan infrastruktur bendungan tersebut.

Secara regional berdasarkan Peta Geologi Lembar Cianjur (Sudjatmiko, 2003) terdapat tiga formasi yang menyusun daerah penelitian yaitu, Formasi Rajamandala (Omc), Formasi Citarum (Mts), serta batuan breksi tufaan, lava, batupasir, dan konglomerat (Pb) (**Gambar 1**). Kondisi Indonesia yang memiliki iklim tropis mendukung proses pelapukan dari batuan yang menyusun pada daerah tersebut. Proses pelapukan kimiawi batuan menyebabkan perubahan mineral pada batuan menjadi mineral lempung (Wesley, 2009). Mineral lempung sering kali berperan dalam kegagalan suatu lereng dikarenakan mineral lempung cenderung memiliki parameter keteknikan yang lebih rendah dibanding batuan.

Kondisi buruknya parameter keteknikan yang dimiliki oleh tanah dapat disebabkan oleh berbagai hal, salah satu yang paling sering dijumpai adalah adanya sifat mengembang (*swelling*) atau menyusut (*shrinkage*) akibat pengaruh dari air (Wesley, 2009).

Mineral lempung yang umum dijumpai memiliki sifat tersebut adalah mineral smektit, khususnya jenis montmorillonit (Sadisun dkk., 2002). Mineral smektit dibagi ke dalam beberapa jenis sesuai dengan kandungan ion yang mengisi mineral tersebut. Mineral smektit yang memiliki banyak Mg adalah saponit, sedangkan yang memiliki banyak Ca atau Na adalah montmorillonit, yang memiliki banyak Fe adalah nontronit, dan yang memiliki banyak Al adalah beidelit (Fulignati, 2020; Murray, 2006).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh mineral saponit dan montmorillonit terhadap kestabilan lereng, khususnya pada area pembangunan *Upper Dam Cisokan*. Hal tersebut dilakukan dengan melakukan pengujian lereng tunggal untuk jenis tanah dengan kandungan mineral lempung yang berbeda. Kemudian hasil yang didapat akan digunakan untuk menjadi bahan pertimbangan untuk pembuatan lereng yang ada pada area pembangunan *Upper Dam Cisokan*



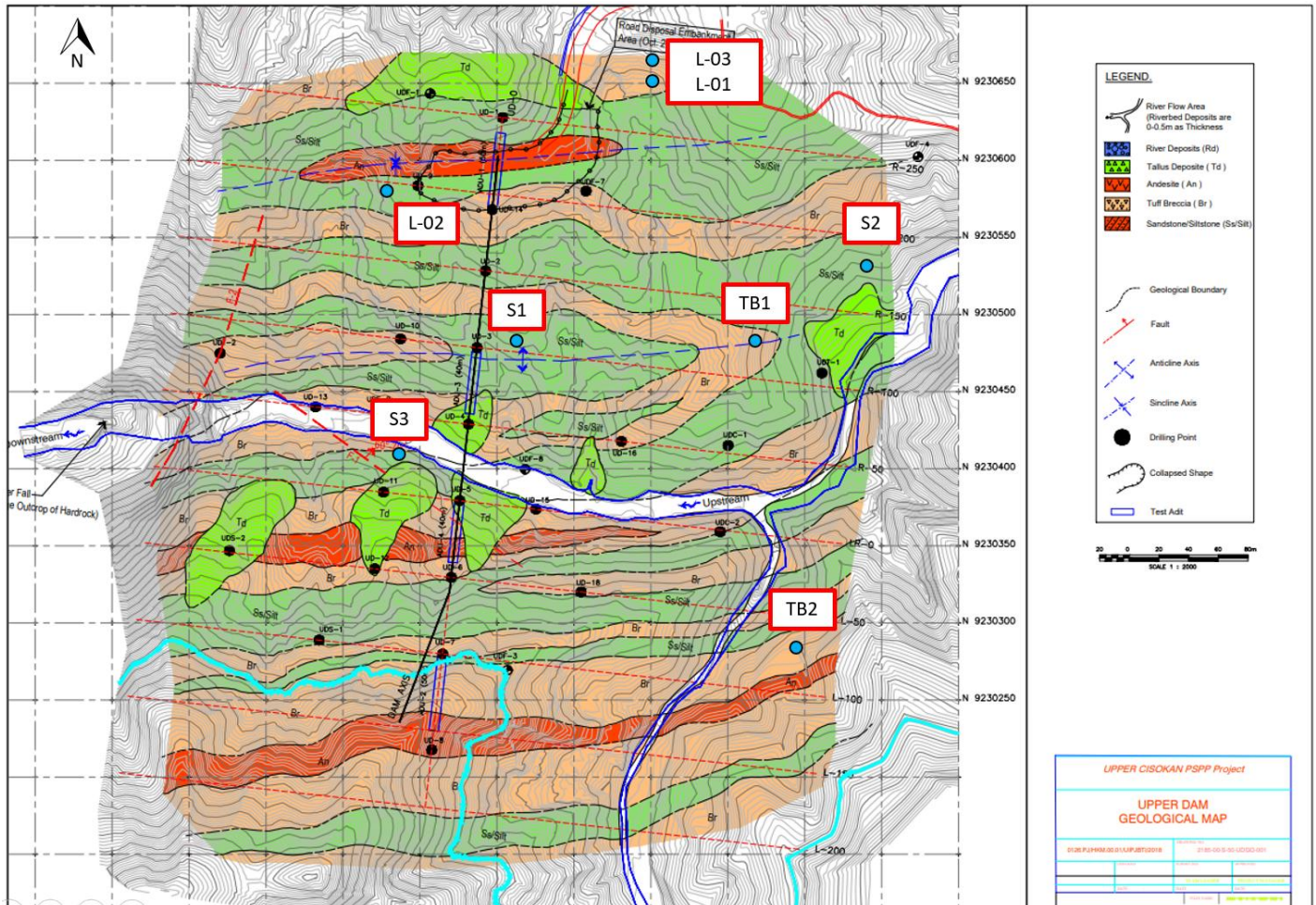
**Gambar 1** Peta geologi regional, daerah penelitian ditandai dengan kotak berwarna kuning (Sudjatmiko, 2003).

## 2. DATA DAN METODE PENELITIAN

### 2.1 Data Penelitian

Terdapat delapan sampel tanah yang diambil pada penelitian ini (**Gambar 2**), yang diambil berdasarkan pelapukan batuan induknya. Sampel L-01, S1, S2, dan S3 diambil dari hasil pelapukan batupasir-batulempung, sampel L-01, L-03, TB1,

dan TB 2 diambil dari hasil pelapukan batu breksi tufan. Semua sampel diambil dengan menggunakan pipa paralon kemudian dibungkus dengan kertas *aluminium foil*, untuk menjaga kondisi tanah agar tetap seperti pada kondisi aslinya (*undisturbed sample*).



**Gambar 2** Peta geologi daerah penelitian yang menunjukkan lokasi pengambilan sampel (PT PLNE, 2019).

Pada sampel L-01, L-02, dan L-03 dilakukan uji kuat geser langsung/*direct shear* serta uji berat jenis untuk mendapatkan nilai bobot isi, kohesi,

serta sudut geser dalam. **Tabel 1** merupakan tabulasi data parameter keteknikan yang didapatkan dari uji yang telah dilakukan.

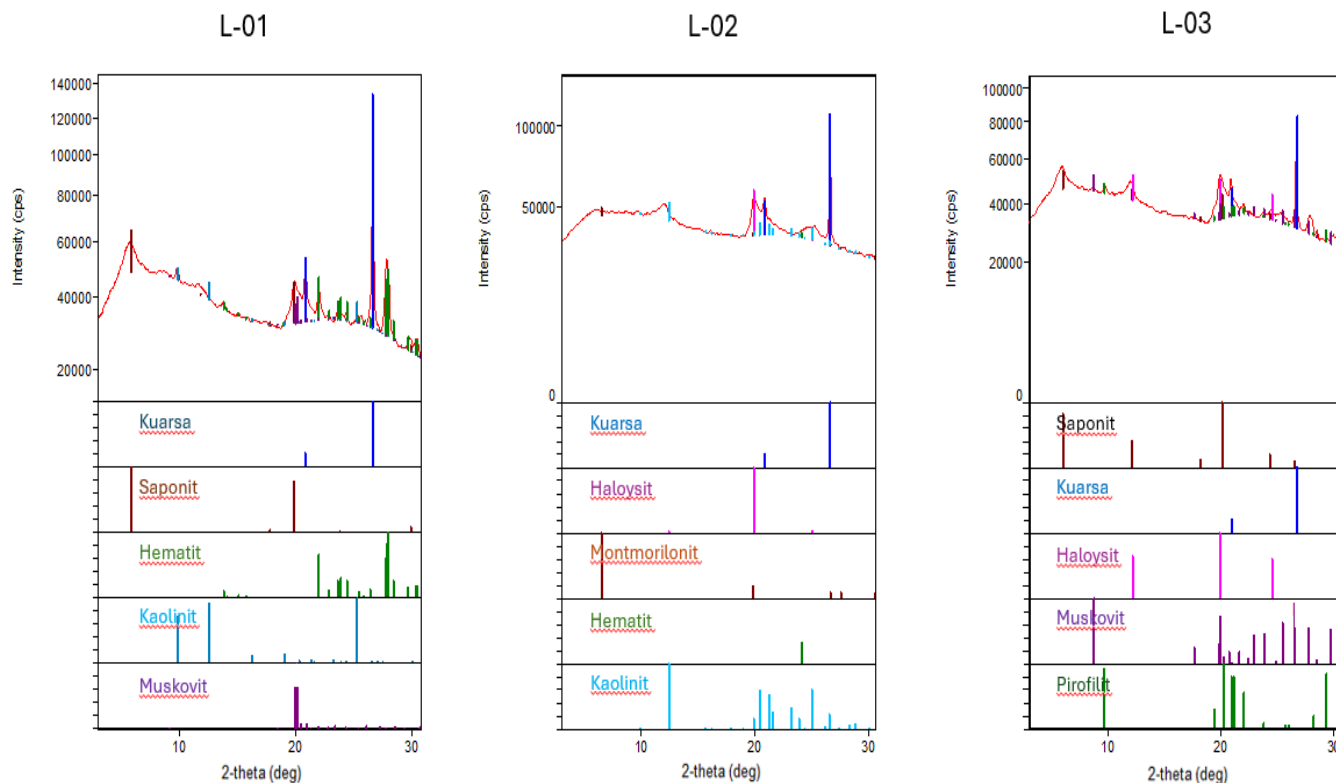
**Tabel 1** Tabulasi data parameter keteknikan setiap sampel.

Kode Sampel	Bobot isi (kN/m <sup>3</sup> )	C (Kpa)	$\phi$ (°)
L-01	14,63	10,40	17,97
L-02	14,70	5,00	19,45
L-03	17,21	7,40	27,53

Ketiga sampel tersebut kemudian dilakukan pengujian *X-Ray diffraction* (XRD) untuk mengetahui komposisi mineral lempung yang terkandung pada setiap sampel. Pengujian XRD dilakukan dengan menggunakan sampel berjenis serbuk yang dianalisis pada nilai rentang 2-theta 0°–30° (**Gambar 3**). Berdasarkan uji tersebut

didapatkan hasil sebagai berikut (**Tabel 2**).

Selain pengujian sifat mekanik, dilakukan juga pengujian sifat fisik berupa densitas, kadar air, *specific gravity*, bobot isi kering, *void ratio*, porositas, derajat kejenuhan, serta uji *atterberg limit* pada sampel S1, S2, S3, TB1, dan TB2 (**Tabel 3**).



**Gambar 3** Hasil grafik XRD setiap sampel.

**Tabel 2** Tabulasi berat persen mineral setiap sampel.

Kode Sampel	Smektit (%)	Haloisit (%)	Kaolinit (%)	Kuarsa (%)	Mika/ Muskovit (%)	Lain-lain (%)	Total (%)
L-01	34,0 (Saponit)	–	25,5	18,5	20,0	2,0 (Albit, Hematit)	100
L-02	28,0 (Montmorillonit)	32,0	4,0	33,0	–	3,0 (Hematit)	100
L-03	50,0 (Saponit)	28,0	–	10,0	6,5	5,5 (Pirofilit)	100

**Tabel 3** Tabulasi hasil uji sifat fisik seluruh sampel.

Kode Sampel			S 1	S 2	S 3	TB 1	TB 2
Batuan Asal			Batulanau-batupasir (L-02)			Breksi Tufan (L-01)	Breksi Tufan (L-03)
Properti	Simbol	Satuan					
Densitas	$\rho$	g/m <sup>3</sup>	1,55	1,71	1,45	1,46	1,68
Kadar air	w	%	43,12	39,2	37,92	26,83	30,64
<i>Spesific of gravity</i>	G	-	2,64	2,66	2,66	2,64	2,68
Bobot isi kering	$\gamma_d$	g/cm <sup>3</sup>	1,11	1,25	1,07	1,18	1,31
<i>Void Ratio</i>	e	-	1,55	1,40	1,65	1,046	1,046
Porositas	n	%	0,61	0,58	0,58	0,55	0,51
Derajat kejenuhan	Sr	%	73,20	74,50	61,70	56,9	78,8
<i>Plastic limit</i>	PL	%	16,10	16,20	16,53	30,62	33,66
<i>Liquid limit</i>	LL	%	52,31	51,49	51,20	51,57	51,9
<i>Plasticity index</i>	PI	%	36,21	35,29	34,67	20,95	18,24
<i>Grain size Gravel</i>	Gs	%	0	5,74	6,84	6,95	0
<i>Sand</i>	S	%	5,99	7,21	7,75	25,16	13,16
<i>Silt</i>	M	%	72,78	61,29	65,73	67,89	86,84
<i>Clay</i>	C	%	21,23	25,76	19,68	0	0
<i>Soil Classification</i>	USCS		CH	CH	CH	MH	MH

## 2.2 Metode Penelitian

### 2.2.1 Metode Kesetimbangan Batas

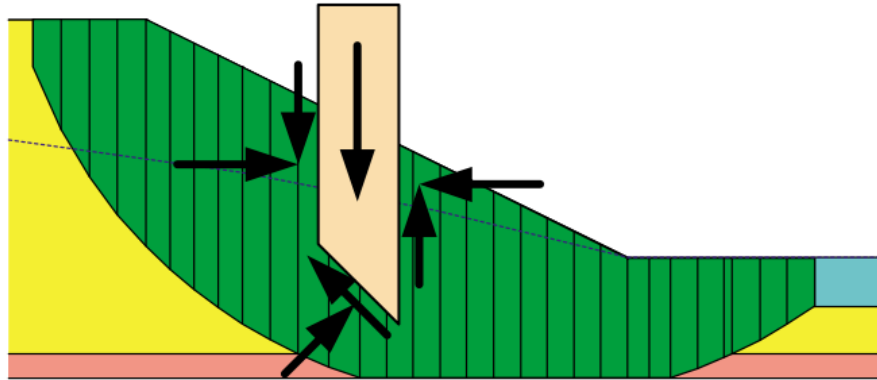
Data yang telah diperoleh kemudian digunakan untuk melakukan analisis kestabilan lereng menggunakan perangkat lunak *Slide2* dengan menggunakan metode kesetimbangan batas/*limit equilibrium method*. Metode kesetimbangan batas ini memperhitungkan gaya dan momen yang berperan terhadap terjadinya longsor pada suatu lereng (**Gambar 4**) (Krahn, 2003). Terdapat beberapa jenis persamaan yang bisa digunakan untuk melakukan metode kesetimbangan batas tergantung dari gaya dan/atau momen apa yang diperhitungkan (**Tabel 4**) (Krahn, 2003). Persamaan yang digunakan dalam penelitian ini adalah

persamaan Morgenstern dan Price (1965) yang memperhitungkan semua kesetimbangan baik momen dan gaya serta juga mempertimbangkan gaya normal dan gaya geser antar irisan.

Untuk mendapatkan hasil geometri lereng paling optimal dilakukan optimasi geometri lereng terhadap nilai faktor keamanan. Pengoptimasian dilakukan dengan melakukan pengujian lereng tunggal sesuai dengan parameter keteknikan yang didapatkan dari masing – masing sampel. Pengujian ini dilakukan dengan membuat beberapa skenario yang dilakukan dengan membuat variasi pada ketinggian lereng, lebar lereng, serta sudut lereng.

Terdapat total 27 skenario geometri lereng tunggal dengan memvariasikan ketinggian lereng 3m, 4m,

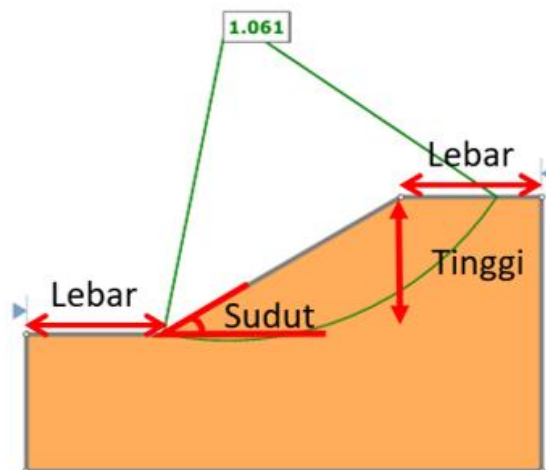
dan 5m; lebar lereng 3m, 4m, dan 5m; serta sudut lereng 30°, 40°, dan 50° (**Gambar 5**).



**Gambar 4** Arah gaya dan momen yang bekerja pada suatu irisan lereng yang diterapkan pada perhitungan metode kesetimbangan batas (Krahn, 2003).

**Tabel 4** Tabulasi persamaan yang dapat digunakan pada metode kesetimbangan batas beserta kesetimbangan dan gaya yang dipertimbangkan pada perhitungannya (Krahn, 2003).

Persamaan	Kesetimbangan		Gaya antar irisan		Sudut resultan X dan E
	Momen	Gaya	Normal (E)	Geser (X)	
Fellenius	Ya	Tidak	Tidak	Tidak	-
Bishop	Ya	Tidak	Ya	Tidak	Horizontal
Janbu	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Horizontal
Spencer	Ya	Ya	Ya	Ya	Konstan
Morgenstern-Price	Ya	Ya	Ya	Ya	Variabel
Corps of Engineer – 1	Tidak	Ya	Ya	Ya	Sudut dari kaki ke puncak lereng
Corps of Engineer – 2	Tidak	Ya	Ya	Ya	Sudut irisan teratas
Lowe-Karafath	Tidak	Ya	Ya	Ya	Rata-rata dari permukaan dasar lereng dan sudut dasar irisan



**Gambar 5** Ilustrasi sudut, lebar, serta tinggi yang digunakan pada geometri lereng tunggal.

### 2.2.1 Beban Seismik

Setiap skenario disertai dengan adanya faktor beban seismik yang dipengaruhi oleh sesar serta gempa pada daerah penelitian untuk mengetahui penurunan nilai faktor keamanan. Berdasarkan SNI 1726:2019, kondisi tanah pada daerah penelitian termasuk ke dalam kelas situs SD (tanah sedang), nilai tersebut ditentukan berdasarkan nilai Vs30 yang berkisar antara 175-350 m/s berdasarkan peta tapak lokal (Vs30). Kemudian dihitung nilai beban seismik pada daerah penelitian yang diperoleh sebagai berikut.

$$PGAm = PGA \times FPGA$$

$$PGAm = 0,3 \times 1,3$$

$$Kh = PGAm \times 0,5$$

$$Kh = 0,195$$

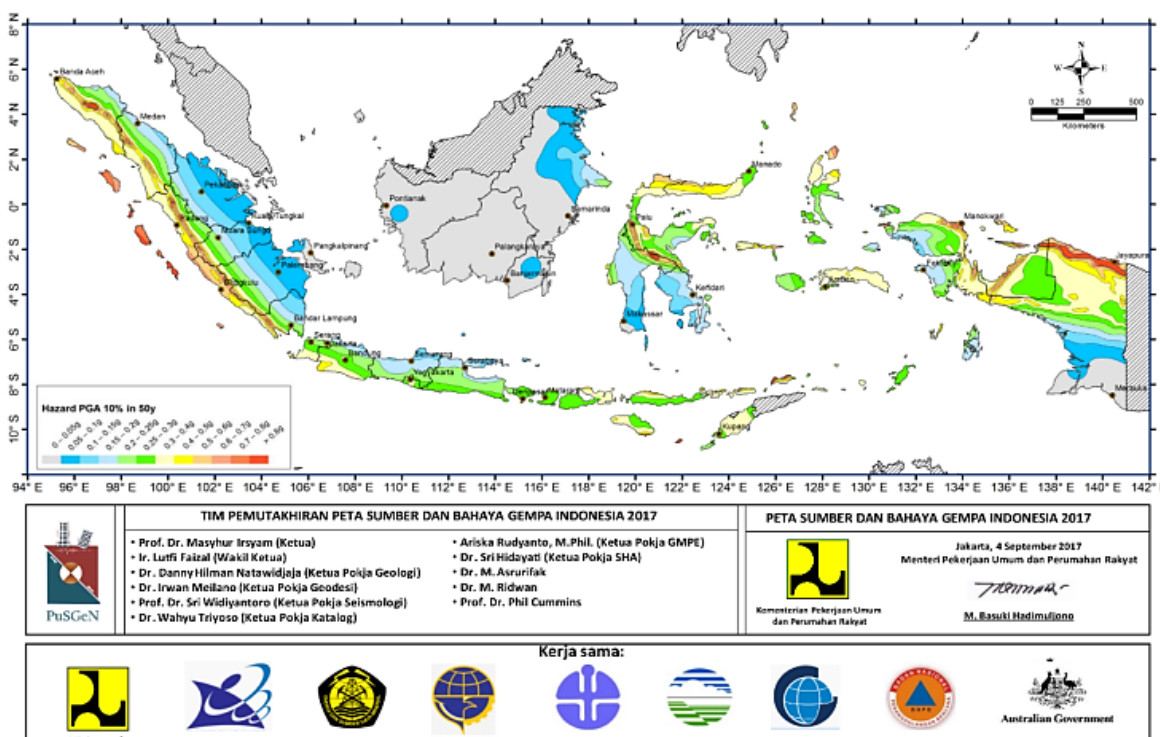
dengan:

PGAm = puncak percepatan batuan dasar dengan pengaruh kelas situs.

PGA = puncak percepatan batuan dasar yang dipetakan (**Gambar 6**).

FPGA = koefisien situs (**Tabel 5**).

Kh = koefisien horizontal



**Gambar 6** Peta percepatan puncak batuan (*Peak Ground Acceleration*) dengan periode ulang 10% dalam 50 tahun (Kementerian PUPR, 2017). Daerah penelitian memiliki nilai 0,3g.

**Tabel 5** Koefisien situs berdasarkan kelas dan nilai PGA pada daerah penelitian yang ditunjukkan dengan kolom berwarna kuning (SNI 1726:2019).

Situs Kelas	PGA ≤ 0,1	PGA = 0,2	PGA = 0,3	PGA = 0,4	PGA = 0,5	PGA ≥ 0,6
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1
SE	2,4	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1
SF	SS (a)					

### 3. HASIL

#### 3.1 Perhitungan Faktor Keamanan

Berdasarkan data yang ada kemudian dilakukan perhitungan nilai faktor keamanan pada setiap jenis tanah dengan variasi geometri lereng yang dibuat. Perhitungan nilai faktor keamanan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Slide2* yang tabulasi perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 6, 7, dan 8.

**Tabel 6** menunjukkan tabulasi hasil perhitungan Faktor Keamanan (FK) lereng L-01 pada setiap variasi geometri yang dibuat. Terlihat bahwa sebagian besar variasi geometri masih memiliki nilai FK yang aman yakni lebih dari satu ( $FK > 1$ )

dengan catatan terdapat dua jenis variasi geometri yang memiliki nilai FK hanya sedikit di atas 1 yang diberi warna kuning. Sementara itu, pada sudut  $40^\circ$ , lebar 5 dan tinggi 5 meter serta pada sudut  $50^\circ$  dengan tinggi 5 meter semuanya menunjukkan nilai FK di bawah 1 ( $FK < 1$ ) yang artinya lereng akan mengalami longsor dengan geometri tersebut.

**Tabel 7** menunjukkan tabulasi hasil perhitungan FK lereng L-02 pada setiap variasi geometri yang dibuat. Berdasarkan perhitungan tersebut, sebagian besar variasi geometri yang ada memiliki nilai  $FK < 1$  yang berarti akan terjadi longsor pada geometri lereng tersebut, hanya pada sudut  $30^\circ$  dan pada tinggi lereng 3 meter saja yang memiliki  $FK > 1$ .

**Tabel 6** Tabulasi faktor keamanan setiap variasi geometri tanah L-01.

Sudut lereng $30^\circ$				
FK		Tinggi (m)		
		3	4	5
Lebar (m)	3	1,53	1,29	1,15
	4	1,52	1,29	1,14
	5	1,51	1,29	1,14
Sudut lereng $40^\circ$				
FK		Tinggi (m)		
		3	4	5
Lebar (m)	3	1,44	1,20	1,06
	4	1,44	1,20	1,05
	5	1,44	1,20	0,96
Sudut lereng $50^\circ$				
FK		Tinggi (m)		
		3	4	5
Lebar (m)	3	1,35	1,11	0,97
	4	1,35	1,11	0,96
	5	1,35	1,11	0,96

**Tabel 7** Tabulasi faktor keamanan setiap variasi geometri tanah L-02.

Sudut lereng 30°				
FK		Tinggi (m)		
		3	4	5
Lebar (m)	3	1,06	0,93	0,84
	4	1,06	0,93	0,84
	5	1,06	0,93	0,84
Sudut lereng 40°				
FK		Tinggi (m)		
		3	4	5
Lebar (m)	3	0,96	0,83	0,74
	4	0,96	0,83	0,74
	5	0,96	0,83	0,66
Sudut lereng 50°				
FK		Tinggi (m)		
		3	4	5
Lebar (m)	3	0,87	0,74	0,66
	4	0,87	0,74	0,66
	5	0,87	0,74	0,66

**Tabel 8** menunjukkan tabulasi hasil perhitungan FK lereng L-03 pada setiap variasi geometri yang dibuat. Berdasarkan perhitungan tersebut hanya pada geometri dengan sudut 40°, ketinggian 5 meter, lebar 5 meter serta sudut 50°, tinggi 5 meter yang memiliki

nilai  $FK < 1$  yang berarti pada variasi geometri tersebut akan terjadi longsor. Sementara itu, sebagian besar memiliki nilai  $FK > 1$  dengan catatan ada beberapa variasi geometri yang memiliki nilai FK hanya sedikit di atas 1 yang diberi warna kuning.

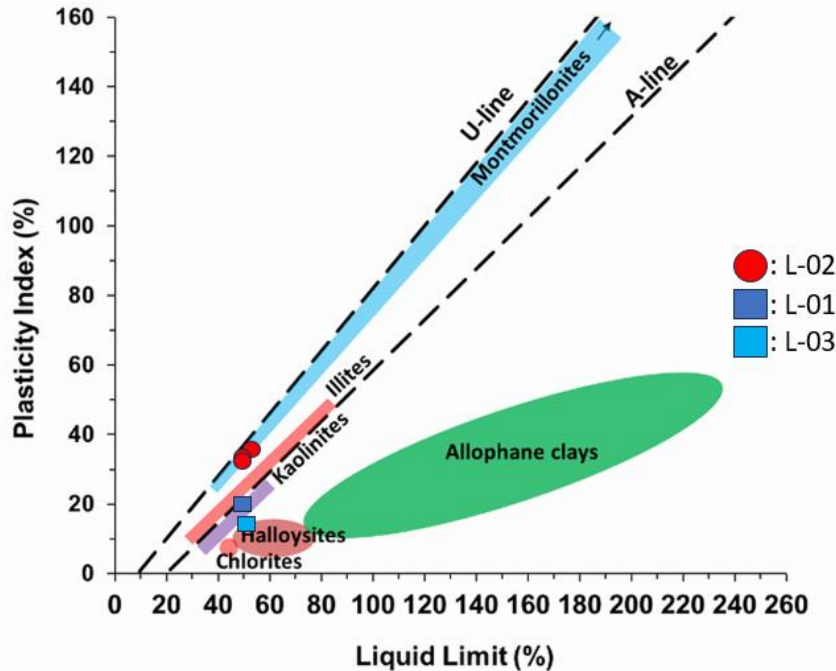
**Tabel 8** Tabulasi faktor keamanan setiap variasi geometri tanah L-03.

Sudut lereng 30°				
FK		Tinggi (m)		
		3	4	5
Lebar (m)	3	1,46	1,28	1,17
	4	1,46	1,28	1,17
	5	1,46	1,28	1,17
Sudut lereng 40°				
FK		Tinggi (m)		
		3	4	5
Lebar (m)	3	1,31	1,13	1,02
	4	1,31	1,13	1,02
	5	1,31	1,13	0,90
Sudut lereng 50°				
FK		Tinggi (m)		
		3	4	5
Lebar (m)	3	1,18	1,00	0,90
	4	1,18	1,00	0,90
	5	1,18	1,00	0,901

### 3.2 Hubungan Faktor Keamanan Dengan Sifat Fisik

Rendahnya nilai kohesi yang dimiliki oleh sampel L-02 jika dibandingkan dengan dua sampel lainnya juga dapat diakibatkan oleh nilai *liquid limit*, *plasticity limit*, serta *plasticity index*. Hal tersebut diperlihatkan pada plot grafik plastisitas (Okkels, 2019) (**Gambar 7**). Pada plot tersebut sampel L-02

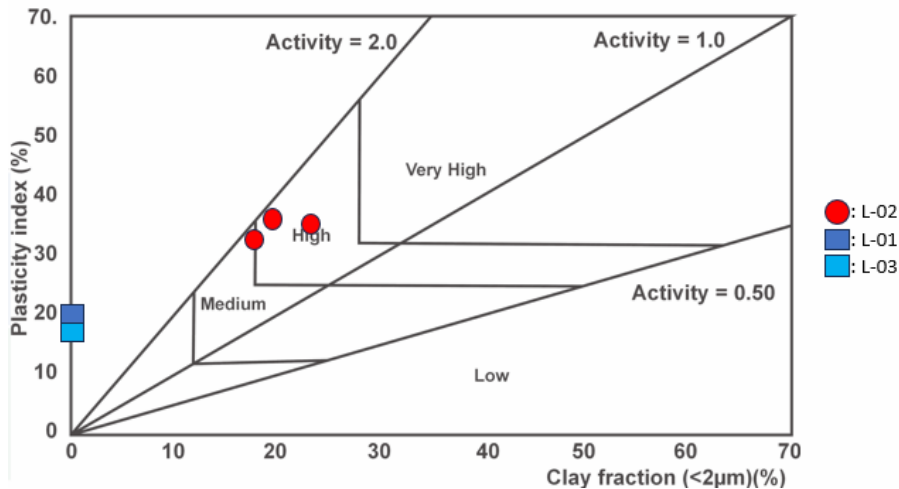
terletak di atas garis A yang menandakan bahwa sampel L-02 memiliki parameter keteknikan yang buruk dan dapat menunjukkan perilaku *swelling*, sedangkan sampel L-01 dan L-03 terletak di bawah garis A yang menandakan kedua sampel tersebut memiliki parameter keteknikan yang lebih baik (Wesley, 2009).



**Gambar 7** Plot grafik plastisitas (Okkels, 2019) yang menunjukkan perbedaan mineral. L-01 terletak pada jenis kaolinit, L-02 terletak pada jenis montmorillonit, dan L-03 terletak pada jenis halloysit.

Berdasarkan plot grafik potensi *swelling* (Van Der Merwe, 1964), mineral lempung pada sampel L-02 memiliki tingkat potensi *swelling* yang tinggi, sehingga membuktikan bahwa sampel tersebut

memiliki potensi *swelling*. Pada sisi lain, sampel L-01 dan L-03 memiliki fraksi lempung 0% sehingga pada grafik tersebut tidak menunjukkan adanya potensi *swelling* (**Gambar 8**).



**Gambar 8** Grafik potensi *swelling* (Van Der Merwe, 1964) yang menunjukkan sampel L-02 memiliki potensi *swelling* yang tinggi, sedangkan L-01 dan L-03 tidak menunjukkan adanya potensi *swelling*.

#### 4. DISKUSI

Berdasarkan hasil perhitungan nilai faktor keamanan yang telah dilakukan, tanah L-02 menunjukkan nilai FK paling rendah pada seluruh variasi geometri yang dianalisis dibandingkan dengan dua jenis tanah lainnya. Kondisi ini berkaitan dengan nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah L-02 yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan tanah L-01 dan L-03, sehingga kapasitas kekuatan geser tanah L-02 menjadi lebih rendah dalam analisis kestabilan lereng.

Ditinjau dari aspek mineralogi, ketiga sampel memiliki komposisi mineral lempung yang berbeda. Meskipun ketiganya sama-sama mengandung mineral smektit yang secara umum berpotensi menunjukkan perilaku *swelling*, jenis mineral smektit yang terkandung pada masing-masing sampel berbeda. Pada sampel L-01 dan L-03, mineral smektit yang terkandung adalah saponit, sedangkan pada sampel L-02 dijumpai mineral smektit berjenis montmorillonit. Mineral smektit jenis montmorillonit diketahui memiliki potensi *swelling* yang lebih tinggi (Lan dkk., 2022), sementara smektit jenis saponit umumnya menunjukkan potensi *swelling* yang relatif lebih rendah (Klik dkk., 2023).

Interpretasi mineralogi tersebut juga didukung oleh hasil klasifikasi berdasarkan diagram plastisitas dan diagram potensi *swelling*. Pada diagram plastisitas, sampel L-02 terletak di atas garis A, yang umumnya diasosiasikan dengan tanah berplastisitas tinggi dan karakteristik keteknikan yang kurang menguntungkan serta kecenderungan perilaku *swelling*. Sebaliknya, sampel L-01 dan L-03 berada di bawah garis A, yang menunjukkan karakter plastisitas yang relatif lebih stabil. Hasil ini konsisten dengan klasifikasi pada diagram potensi *swelling* (Van der Merwe, 1964), yang mengklasifikasikan sampel L-02 pada potensi *swelling* yang lebih tinggi, sedangkan sampel L-01 dan L-03 tidak menunjukkan potensi *swelling* yang signifikan. Konsistensi antara klasifikasi empiris ini dengan data mineralogi dan sifat mekanik memperkuat interpretasi bahwa perbedaan perilaku keteknikan antar sampel dikontrol oleh karakter lempung aktif yang terkandung di dalamnya.

Perbedaan potensi *swelling* antar jenis mineral smektit tersebut berimplikasi terhadap perbedaan sifat mekanik tanah. Tanah yang mengandung mineral montmorillonit umumnya menunjukkan penurunan nilai kohesi yang lebih signifikan akibat interaksi air dan lempung dan kecenderungan perilaku ekspansif (Ahlinhan dkk., 2025; Charkley dkk., 2019). Sebaliknya, tanah yang didominasi oleh mineral saponit cenderung mengalami penurunan kohesi yang lebih kecil, sejalan dengan potensi *swelling* yang lebih rendah dibandingkan montmorillonit (Klik dkk., 2023; Sato, 1996).

Dengan demikian, rendahnya nilai kohesi dan sudut geser dalam pada sampel L-02 dibandingkan dengan sampel L-01 dan L-03 sejalan dengan perbedaan jenis mineral smektit yang terkandung di dalamnya. Sampel L-02 didominasi oleh smektit berjenis montmorillonit, sedangkan sampel L-01 dan L-03 didominasi oleh smektit berjenis saponit, yang secara umum memiliki karakteristik mekanik yang lebih stabil.

#### 5. KESIMPULAN

Penelitian ini membandingkan nilai faktor keamanan lereng pada tiga jenis tanah dengan komposisi mineral lempung yang berbeda. Hasil analisis menunjukkan bahwa tanah L-02 secara konsisten memiliki nilai faktor keamanan paling rendah pada seluruh variasi geometri yang dianalisis. Kondisi ini berkaitan dengan karakteristik mineralogi tanah L-02 yang didominasi oleh mineral smektit berjenis montmorillonit, yang secara umum berasosiasi dengan plastisitas tinggi dan penurunan parameter nilai kohesi. Rendahnya nilai kohesi tersebut berimplikasi pada menurunnya nilai faktor keamanan lereng dengan material tanah L-02.

Berdasarkan hasil perhitungan faktor keamanan, pembangunan lereng pada litologi tanah L-02 disarankan menggunakan sudut lereng yang lebih landai, yaitu kurang dari 30°, serta tinggi lereng kurang dari 3 meter, guna menjaga kestabilan lereng.

#### 6. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis sampaikan pada pihak PT PLN dan PT PLNE khususnya pada UPP PLTA Cisokan yang telah memberikan kesempatan untuk

melakukan pengambilan data di area proyek tersebut.

## REFERENSI

- Ahlinhan, M. F., Dansou, O. J., Djenou, B. D., Sounouvou, L., dan Adjovi, E. C. (2025): Swelling and Shrinkage Performance of Expansive Soils under Repeated Moisture Variations, *Current Journal of Applied Science and Technology*, **44**(4), 91–110. <https://doi.org/10.9734/cjast/2025/v44i44517>.
- Badan Standarisasi Nasional Indonesia. (2019): SNI 1726: 2019 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung. Indonesia.
- Charkley, F. N., Zhang, K., dan Mei, G. (2019): Shear Strength of Compacted Clays as Affected by Mineral Content and Wet-Dry Cycles, *Advances in Civil Engineering*, **2019**(1), 8217029. <https://doi.org/10.1155/2019/8217029>.
- Fulignati, P. (2020): Clay Minerals in Hydrothermal Systems, *Minerals*, **10**(10), 919. <https://doi.org/10.3390/min10100919>.
- Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2017): *Peta Sumber Dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Jakarta.
- Klik, B., Brtnicky, M., Jaskulska, I., Gusiatin, M. Z., Jaskulski, D., Holatko, J., Baltazar, T., Liniauskiene, E., dan Radziemska, M. (2023): Unlocking the Saponite Potential in Aided Phytostabilisation of Multi-Metal-Contaminated Soils, *Minerals*, **13**(11), 1354. <https://doi.org/10.3390/min13111354>.
- Krahn, J. (2003): The 2001 R.M. Hardy Lecture: The limits of limit equilibrium analyses, *Canadian Geotechnical Journal*, **40**(3), 643–660. <https://doi.org/10.1139/t03-024>.
- Lan, T., Zhang, R., Yang, B., dan Meng, X. (2022): Influence of Swelling on Shear Strength of Expansive Soil and Slope Stability, *Frontiers in Earth Science*, **10**, 849046. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.849046>
- Morgenstern, N. R., dan Price, V. E. (1965): The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces, *Géotechnique*, **15**(1), 79–93. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>.
- Murray (2006): *Applied Clay Mineralogy - Occurrences, Processing and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays* (Developments in Clay Science), Elsevier, **2**. [https://doi.org/10.1016/S1572-4352\(06\)X0200-3](https://doi.org/10.1016/S1572-4352(06)X0200-3).
- Okkels, N. (2019): Modern guidelines for classification of fine soils, *Proceedings of the XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, (Geotechnical Engineering, foundation of the future), 3237–3244. <https://doi.org/10.32075/17ECMGE-2019-0651>.
- PT PLNE (2019): *GBR review report (for waterway and powerhouse)*, Nippon Koei Co. Ltd., NEWJEC Inc., PT Indokoei International, dan PT Wiratman.
- Sadisun, I. A., Shimada, H., Ichinose, M., dan Matsui, K. (2002): An experimental study of swelling strain in some argillaceous rocks by means of an improved unconfined swelling test. *Choi, Ryu, Jeon & Moon (eds) Rock engineering problems and approaches in underground construction*, pp.227-234.
- Sato, T. (1996): Hydration and Structure of Adsorbed Water on Clay Minerals., *Journal of the Mineralogical Society of Japan*, **25**(3), 99–110. <https://doi.org/10.2465/gkk1952.25.99>.
- Sudjatmiko (2003): *Peta geologi lembar Cianjur, Jawa*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Van Der Merwe, D.H. (1964): The Prediction of Heave from the Plasticity Index and Percentage Clay Fraction of Soil. *South African Institute of Civil Engineers*, **6**, 103-107.
- Wesley, L. D. (2009): *Fundamentals of Soil Mechanics for Sedimentary and Residual Soils* (1 ed.), Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470549056>.