

DYNAMIC SIMULATION OF SLOPE STABILITY IN THE ZERO-POINT AREA OF CILIWUNG

Solihin¹⁾, Muhammad Agus Karmadi¹⁾, Helmi Setia Ritma Pamungkas¹⁾

Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik – Universitas Pakuan¹⁾

E-mai: solihin@unpak.ac.id

ABSTRAK

Kawasan Titik Nol Ciliwung memiliki tutupan lahan berupa perkebunan teh, tersusun oleh batuan vulkanik, serta memiliki kemiringan lereng yang curam, sehingga kondisi tersebut berpengaruh terhadap kestabilan lereng. Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi pengeboran tangan (hand boring), analisis sifat-sifat tanah, serta analisis nilai faktor keamanan lereng menggunakan perangkat lunak Geoslope/W 2012. Hasil simulasi kestabilan lereng tanpa beban menunjukkan bahwa pada kedalaman muka air tanah sekitar ± 1 m (faktor keamanan 1,910), ± 5 m (faktor keamanan 2,013), maupun pada kondisi tanah jenuh air (faktor keamanan 1,558), nilai faktor keamanan lereng masih berada dalam kondisi stabil. Namun, pada lereng yang menerima beban sebesar 100 kg/cm^2 , dengan kedalaman muka air tanah sekitar ± 5 m (faktor keamanan = 0,818) dan ± 1 m (faktor keamanan 0,696), serta pada kondisi tanah jenuh air (faktor keamanan 0,488), nilai faktor keamanan lereng menunjukkan kondisi tidak stabil. Perubahan tutupan lahan dari vegetasi perkebunan teh menjadi vegetasi atau penggunaan lahan dengan beban yang lebih besar akan meningkatkan beban pada lereng, sehingga berpotensi menurunkan kestabilan lereng.

Kata Kunci: Simulasi dinamik; Kestabilan lereng; Titik Nol; Ciliwung

ABSTRACT

The Ciliwung Zero-Point area has tea plantation land cover, with volcanic rock constituents and steep slopes that will affect slope stability. The method used is hand boring and soil properties also analysis of safety factor values with Geoslope/W 2012 software. The results of the no-load slope safety simulation show that with a groundwater table depth of ± 1 m (safety factor 1.910), ± 5 m (safety factor slope 2.013) even in water-saturated soil conditions (safety factor is 1.558), the slope safety factor is still stable. However, the slope with a load on it of 100 kg/cm^2 , with a groundwater level depth of ± 5 m (safety factor is 0.818) and ± 1 m (safety factor is 0.696), as well as the condition of the slope soil saturated with water (safety factor is 0.488), the value of the slope safety factor is unstable. Changing the land cover from tea vegetation to vegetation with heavy loads will increase the slope load.

Keywords: Dinamic Simulation; Slope stability; Zero Point; Ciliwung

I. PENDAHULUAN

Titik 0 (nol) kilometer dalam konsep hulu sungai merupakan wilayah yang biasanya akan memiliki tutupan lahan lebat dengan jenis tanaman keras seperti pada umumnya sungai-sungai yang hulunya dari pegunungan. Namun lain halnya dengan titik 0 (nol) kilometer Ciliwung, dimana tutupan lahannya merupakan wilayah perkebunan teh. Kawasan Puncak masuk ke dalam DAS (Daerah Aliran Sungai) Ciliwung. Air Sungai Ciliwung mengalir dari hulu (Telaga Saat) ke hilir (D.K.I Jakarta). Dimana Kawasan Perkebunan

Teh Ciliwung termasuk ke dalam kawasan yang menjadi hulu (mata air) Sungai Ciliwung. Dalam Rencana Tata Ruang Kawasan Perkotaan Jabodetabek-Punjur, wilayah hulu Sungai Ciliwung termasuk dalam Zona B4 (Zona dengan karakteristik sebagai kawasan yang memiliki kualitas daya dukung lingkungan rendah tetapi subur dan merupakan kawasan resapan air) [1]. Titik 0 Ciliwung juga merupakan kawasan strategis daerah Puncak yang tertuang dalam Perda Kabupaten Bogor [2] tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Bogor Tahun 2024 – 2044. Tutupan lahan berupa kawasan pertanian lahan kering dan/atau perkebunan. KDB

merupakan perbandingan antara luas bangunan dan luas lahan. Perhitungan KDB ini dimaksudkan agar dapat menjadi acuan dalam mengendalikan luas bangunan agar tidak mengganggu infiltrasi. Namun demikian, walaupun sudah ada penetapan kebijakan besaran KDB, dengan adanya perubahan penggunaan lahan berupa lahan terbuka, badan air, maupun lahan terbangun merupakan faktor terjadinya banjir dan sedimentasi ke daerah hilir sungai serta rawan longsor di beberapa wilayah hulu yang memiliki kemiringan lereng landai-tegak.

Walaupun sudah ada penetapan kebijakan besaran KDB pada wilayah yang renggang dengan prosentase, dengan adanya perubahan penggunaan lahan, berupa lahan terbuka, badan air, maupun lahan terbangun, tentunya makin memperkuat faktor terjadinya banjir dan sedimentasi ke daerah hilir sungai serta rawan longsor di beberapa wilayah hulu yang memiliki kemiringan lereng landai-tegak. Persentase areal di Wilayah Sungai Ciliwung-Cisadane dengan tingkat erosi berat dan sangat berat (>180 ton/ha/tahun) adalah sebesar 15,2% dari luas WS Ciliwung-Cisadane [3]. Lahan kritis di wilayah DAS Ciliwung tercatat mengalami kekritisian lahan, terutama wilayah Bogor Timur Kota Bogor yang dilewati oleh Sungai Ciliwung kategori Kawasan lindung di luar Kawasan hutan lahan kategori sangat kritis tahun 2015 seluas 7,99 ha dan meningkat pada tahun 2022 seluas 10,77 ha [4].

Perubahan lahan sangat mempengaruhi debit rata-rata di DAS hulu Ciliwung, sedangkan perubahan curah hujan rata-rata pada periode 1983-1992 (periode 1) dan periode 2004-2013 (periode 2) tidak cukup bukti mempengaruhi perubahan debit DAS hulu Ciliwung [5]. Perubahan lahan tersebut juga menyebabkan kualitas air sehingga status mutu air sungai Ciliwung dikategorikan tercemar sedang hingga tercemar berat, [6] dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa lahan terbangun dan lahan terbuka berpengaruh negatif terhadap kualitas air di DAS Ciliwung. Sehingga dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional, DAS Ciliwung menjadi prioritas dalam pembangunan dan peningkatan check dam penahan banjir dan sedimen [7]. Namun dalam Putusan Kepmenhut [8], menunjuk kawasan

puncak sebagai hutan produksi, cagar alam dan taman nasional. Dari regulasi tersebut nampak jelas perbedaan isi dari peraturan, sehingga beberapa lahan hutan sudah beralih fungsi menjadi lahan terbuka dan lahan terbangun sehingga memperbesar potensi kejadian bencana banjir di bagian hilir DAS Ciliwung dan potensi longsor di bagian hulu DAS Ciliwung. Di daerah Puncak dan sekitarnya termasuk zona graben, yang diisi oleh batuan dengan rapat massa rendah, yaitu batuan gunung api Kuartar dan dikontrol oleh sesar aktif bawah permukaan, sehingga daerah ini sangat potensial terjadi tanah longsor. Jalan raya Cianjur-Puncak-Bogor secara umum terletak di zona graben yang terisi batuan gunungapi kuartar, sehingga tidak terlalu kompak, dan pada umumnya membentuk morfologi tinggi dengan kelerengan curam [9].

Karena daerah Puncak merupakan yang rawan longsor, maka pada tahun 2015 ketersediaan lahan DAS Ciliwung Hulu mengalami defisit seluas 32.016,61 ha dengan rumus Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan melalui pendekatan kebutuhan hidup layak UMR ketersediaan lahan akan mengalami defisit 3.128,78 ha, serta ketersediaan air di wilayah DAS Ciliwung Hulu mengalami defisit sampai dengan 259.930.889,51 m³. Status neraca ketersediaan lahan di DAS Ciliwung Hulu pada 20 tahun yang akan datang adalah defisit seluas 127.911,09 ha dan dengan pendekatan UMR neraca tetap defisit seluas 21.077,29 ha. Dalam kesimpulannya Wijaya menambahkan bahwa peningkatan nilai lahan di DAS Ciliwung Hulu melalui strategi yang optimal dengan mengurangi tekanan terhadap kawasan lindung [10].

Jenis tanah yang berada di wilayah Ciliwung hulu didominasi oleh latosol [11] dan berdasarkan Peta Geologi Regional Lembar Bogor [12], bahwa Lokasi termasuk dalam sebaran batuan lava dan breksi Gunung Kencana dan Gunung Limo dengan ciri bongkahan andesit dan breksi andesit dengan banyak sekali fenokris piroksen dan lava basal. Maka dapat disimpulkan bahwa tanah daerah penelitian hasil pelapukan batuan breksi dan lava. Tanah tebal dengan tekstur geluh pasir, batuan tuff sebagai bidang gelincir, dan kemiringan lereng sangat terjal merupakan faktor pengontrol serta faktor pemicu berupa intensitas

hujan lebat dan pola tanam yang tidak cocok [13].

Dalam laporan singkat yang dilakukan oleh Badan Geologi Kementerian ESDM [14], terjadi 18 (delapan belas) gerakan tanah terjadi di Desa Tugu Utara dan Desa Batulayang, Kecamatan Cisarua, Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat serta terjadi 4 (empat) gerakan tanah terjadi di Desa Tugu Selatan, Kecamatan Cisarua, Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat. Lokasi sebagian berada di wilayah 10 titik di pemukiman dan 12 titik berada di tebing jalan utama yaitu Jl. Labuan-Cianjur.

Kadar air merupakan faktor terpenting yang mempengaruhi stabilitas lereng, jika kadar air mendekati batas cair maka stabilitas lereng menjadi kritis [15]. Walaupun curah hujan memiliki faktor penting dalam kejadian banjir maupun longsor, namun paling tidak, ada upaya meminimalisir penggunaan lahan dari hutan menjadi lahan terbangun atau lahan terbuka. Berdasarkan data BNPB tahun 2024 [16], kejadian bencana longsor di Kabupaten Bogor memiliki tren naik (lihat Gambar 1). Muka air tanah sangat berpengaruh terhadap penurunan faktor keamanan [17], hal ini dapat memicu gerakan tanah. Namun dalam Peta Hidrogeologi Indonesia Lembar 1209-1 bogor, bahwa lokasi termasuk dalam daerah nir akuifer atau daerah airtanah langka/tak berarti [18].

Walaupun daerah penelitian termasuk nir akuifer, akan tetapi perlu adanya rekayasa lahan pada saat merubah fungsi lahan. Perangkat lunak geoteknik dapat memberikan dukungan keputusan yang lebih baik dengan menghitung probabilitas kegagalan/indeks keandalan sebagai salah satu output dasar selain tegangan, regangan, gaya, dan perpindahan [19]. Secara mekanik dapat dilakukan perkuatan lereng, tentu dengan analisis software Geoslope/w 2012 [20] dengan simulasi soil nailing pada kemiringan lereng terjadi peningkatan keamanan lereng dengan rekayasa perkuatan lereng berupa soil nailing sebesar 4 hingga 6 kali lipat keamanan lereng semula.



Gambar 1. Tren kejadian bencana tanah longsor tahun 2015-2023 berdasarkan data dari BNPB tahun 2024.

II. METODE PENELITIAN

Analisis kestabilan lereng dilakukan dengan mengidentifikasi faktor keamanan atau disingkat FK pada lokasi penelitian. Proses analisis ini memanfaatkan piranti lunak GEOSLOPE/W 2012 dengan menggunakan data dimensi lereng dan data sifat fisik dari tanah penyusun lereng tersebut. Analisis kestabilan lereng Metode Janbu dilakukan dengan perangkat lunak GEOSLOPE/W 2012. Analisis tersebut menghasilkan tiga kelas nilai faktor keamanan lereng, yaitu: nilai faktor keamanan (F) $> 1,25$ termasuk stabil, $F < 1,07$ termasuk labil, dan $F = 1,07-1,25$ termasuk kritis [21]. Dari hasil pengujian pada Tabel 1 tersebut didapatkan nilai berat isi, kohesi dan sudut geser dari tanah titik 0 Ciliwung.

Adapun data sifat fisik tanah lereng didapatkan dari hasil pengujian hand boring di lapangan dan pengujian laboratorium dengan metode ASTM D 4318-84 (attemberg limits), ASTM D-2216 90 (water content), ASTM D-2216 (Volumetric Weight), dan ASTM D-3080 (direct Shear). Analisis faktor keamanan dilakukan pada satu lintasan, yaitu pada bagian utara daerah penelitian. Lintasan dibuat memanjang memotong lereng (lihat Gambar 2 b.), dengan tingkat kerawanan gerakan tanah sedang sampai tinggi. Lintasan A – B memanjang dari arah barat ke timur sepanjang 228 meter. Kemiringan lereng berkisar 8 – 16 %. Puncak lereng berada pada elevasi 1400 mdpl dan kaki lereng berada pada elevasi 1359 mdpl. Tutupan lahan berupa perkebunan.

Tabel 1. nilai berat isi, kohesi dan sudut geser pada sample hand boring

Titik Hand Boring	Direct Shear (ϕ)	Kohesi (C) Kg/cm ²	Berat Isi Tanah Kg/cm ²
BH-1	23	0,256	2,6
BH-2	22	0,249	2,577

Selain itu, sample tanah dianalisis kemungkinan ekspansif atau tidaknya dengan klasifikasi Chen [22] pada Tabel 2 dan Holtz & Kovacs [23] mengatakan bahwa tanah ekspansif dapat diketahui berdasarkan kadar colloid. Tanah lempung aktif kemungkinan terdiri dari mineral illite dan montmorilonit memiliki potensi tinggi untuk mengembang (ekspansif).



Gambar 2 a. Peta wilayah sub DAS Ciliwung; b. Wilayah studi analisis kestabilan lereng

Tabel 2. Hubungan Indeks Plastisitas terhadap Potensial Pengembangan

Index plastisitas (%)	Liquid Limit (%)	Potensial Pengembangan
<18	<30	Rendah
15-28	30-40	Sedang
25-41	40-60	Tinggi
>35	>60	Sangat tinggi

Batuan lava ini lebih mudah lapuk akibat penurunan suhu lava terlalu cepat sehingga mineral tidak terbentuk dengan sempurna/baik. Apalagi didukung oleh kondisi cuaca di daerah ini yang memiliki curah hujan tinggi dan pada musim kemarau sangat terik.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Geologi Titik 0 Ciliwung

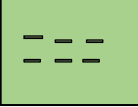
Berdasarkan hasil pengamatan di lokasi titik 0 Ciliwung dijumpai breksi tufan dengan bongkah lava basalt andesit di beberapa tempat. Litologi breksi tufan yang berumur relatif muda dan dalam kondisi lapuk. Ketebalan breksi tufan bervariasi dari 20 cm hingga >3 meter. Bongkah lava andesit tersingkap akibat longsoran di beberapa anak Sungai Ciliwung yang berada di lokasi penelitian. Lava andesit memiliki lapisan semu atau pseudostratification sehingga menyerupai lapisan pada batuan sedimen. Pola lapisan semu ini mencerminkan pola aliran lava berupa seeting joint.

Secara fisik lempung hitam dapat diremas, pejal, dan tidak ada batas jelas dengan lapisan atas maupun di bawahnya. Secara megaskopis dapat dilihat berwarna hitam, ukuran lempung, porositas buruk, sementasi silikaan. Diduga lempung hitam ini merupakan lapisan yang diendapkan pada lingkungan danau. Hal ini juga didukung oleh hasil analisa tanah di Lab mekanika tanah Universitas Pakuan, lempung ini merupakan tanah liat organik dari plastisitas menengah sampai tinggi, lumpur organik dan lumpur anorganik, tanah berpasir atau berlumpur berpori mikro atau diatomik halus, dan lumpur elastis. Secara stratigrafi, litologi daerah PT SSBP dapat dilihat pada Tabel 3. Perkebunan teh Ciliwung memiliki tanah dengan tingkat kesuburan rendah baik secara mineralogi dan kimia dengan 3 titik sampel pemboran tanah dan satu sampel pemboran tanah memiliki kesuburan sedang. Tingkat kesuburan rendah sangat mempengaruhi

produktivitas teh. Di lokasi perkebunan teh ini banyak dijumpai tumbuhan teh yang mengalami kekeringan pada setiap blok Selain faktor tingkat

kesuburan rendah, di lokasi ini dijumpai dibawah lapisan tanah terdapat lempung hitam yang memiliki liat tinggi seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Stratigrafi litologi di lokasi PT SSBP

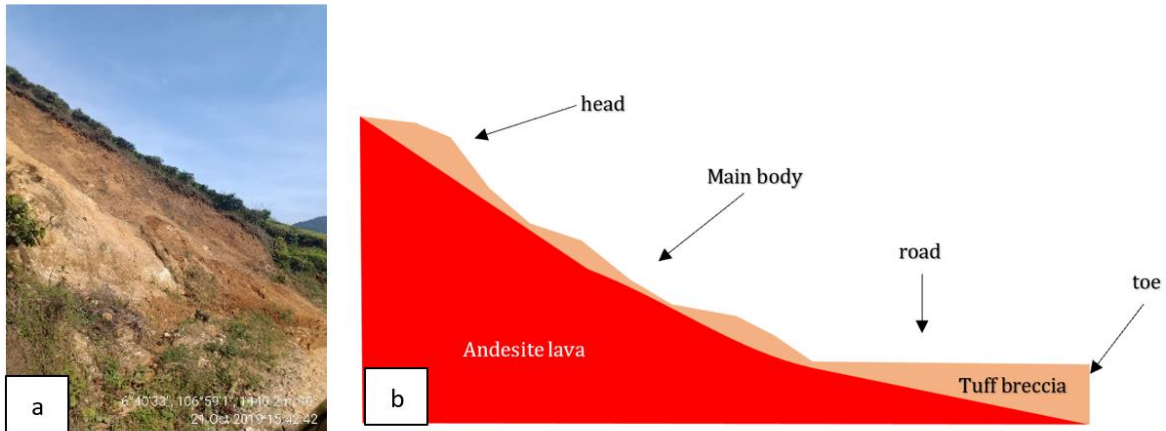
Litology	koordinat	Symbol	Photo	Thickness (m)
Breksi tufan	6°40'32", 106°59'3"			20 - >3
Lempung hitam	6°40'43", 106°59'22"			± 1
Lava andesit	6°40'33", 106°59'3"			>5 meter

3.2. Gerakan Tanah

Kejadian tanah longsor di lokasi penelitian terlihat di beberapa lokasi. Longsor yang paling besar dimensinya berada di anak Sungai Ciliwung yang berbatasan langsung dengan akses perkebunan. Tebing-tebing yang berada di tepi jalan mengalami longsor. Pada lokasi longsor ini kontak antara soil dengan lempung hitam. Berdasarkan uji fisik tanah, lempung hitam memiliki batas plastis tinggi dan potensi mengembang tinggi jika terkena air, sehingga sangat mempengaruhi soil yang diatasnya. Lempung hitam dapat dikatakan sebagai bidang gelincir pada lokasi ini. Adapun jenis longsor berdasarkan pergerakannya pada lokasi

ini merupakan tipe aliran bahan rombakan karena longsor didorong oleh air.

Gambar 3a menunjukkan longsor yang sudah mengekspos hingga lapisan batuan lava andesit yang memiliki perlapisan semu. Pola kemiringan lava andesit searah dengan kemiringan lereng, sehingga litologi breksi vulkanik yang diatasnya akan mudah mengalami longsor jika curah hujan tinggi. Lava andesit ini dapat dikatakan sebagai bidang gelincir pada zona longsor. Model longsor dapat digambarkan pada Gambar 3.b. Jenis longsor di lokasi ini berdasarkan tipe pergerakannya termasuk kategori sliding/translasi/luncuran yang mengikuti kemiringan batuan 45°.



Gambar 3. a. Longsor berupa material berukuran bongkah lava andesit di tepi jalan yang dilalui oleh anak sungai Ciliwung, b. Ilustrasi model longsor

Pada lokasi ini lebih disebabkan oleh kondisi lapuk akibat tingkat porositas tanah tinggi sehingga jenuh air dan kemiringan lereng sangat curam. Tipe longsor di daerah ini adalah debris flow atau aliran bahan rombakan.

3.3. Sifat Fisik Tanah

Berdasarkan hasil analisis atterberg limits (Tabel 4) pada 2 contoh sampel tanah, didapatkan hasil Batas cair (liquid limit) sebesar 68,59%-69,31%. Batas plastis didapati angka 40,4%-43,25%, dan Indeks Plastis sebesar 26,06%-28,18%. Sifat potensi pengembangan dapat dihitung dari nilai indeks plastisitas [22]. Berdasarkan nilai Indeks plastisitas memiliki nilai 26,06%-28,18% sehingga dapat disimpulkan bahwa tingkat pengembangan tanah/lempung hitam ini memiliki kategori tinggi, namun didasarkan pada Liquid limit, maka lempung ini memiliki sifat pengembangan sangat tinggi. Dalam klasifikasi Holtz & Kovacs [23], nilai Indeks Plastis 19,79% sampai 38,91% termasuk tanah yang memiliki derajat pengembangan yang tinggi.

Tabel 4. Nilai hasil analisis *atterberg limits*

Bore hole ID	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plasticity Index (%)	Jenis Tanah (Unified Soil Classification)
BH_1	68,59	40,4	28,18	Organic clays of medium to high plasticity, organic silt and Inorganic silts, micaceous or diatomaceous

Bore hole ID	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plasticity Index (%)	Jenis Tanah (Unified Soil Classification)
				fine sandy or silty soils, elastic silts

BH_2	69,31	43,25	26,06	Organic clays of medium to high plasticity, organic silt and Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts
------	-------	-------	-------	--

Sifat yang menonjol dari tanah ekspansif adalah daya dukungnya yang sangat rendah, kekakuannya menurun drastis pada kondisi basah dan kembang susutnya sangat tinggi bila mengalami perubahan kadar air sehingga akan retak-retak pada kondisi kering dan mengembang pada kondisi basah. Hal ini disebabkan tanah ekspansif banyak mengandung mineral montmorillonite bermuatan negatif yang besar, menyerap air yang banyak dengan mengisi rongga pori sehingga tanahnya mengembang dan akibat selanjutnya adalah kekuatannya menurun drastis. Oleh karena itu salah satu cara untuk mengatasi perilaku tanah ekspansif yang kurang menguntungkan tersebut perlu dilakukan stabilisasi dengan mencampur kapur.

Berdasarkan hasil analisis ASTM D-2216- 90 pada dua sampel didapat nilai kadar air pada lokasi PT

SSBP. Setiap 60 cm dihitung kadar air rata-ratanya seperti pada Tabel 5. Kadar air dalam tanah/litologi di wilayah titik Ciliwung nilai prosentasenya mengalami kenaikan. Artinya semakin ke dalam kadar airnya semakin tinggi contoh dari kedalaman 1,8 - 2,4 meter terjadi peningkatan kadar air sebesar 2,98% pada BH 1, kecuali pada lokasi BH 2 yang mengalami penurunan kadar air di kedalaman 2,4 meter sebesar 6,56%. Lokasi BH 1 berada di pinggir danau yang kondisi tanahnya akan selalu basah, namun lokasi BH 2 berada di lokasi dengan kemiringan lereng curam, jadi kemungkinan lapisan tanah yang berada di bawahnya kurang maksimum menyerap air karena air hujan terus run off.

Tabel 5. Kadar air (*water content*)

Kedalaman (m)	<i>Water</i> <i>Content (%)</i>	<i>Water Content</i> (%)
	BH 1	BH 2
0,6	30,43	35,77
1,2	35,04	36,95
1,8	44,37	41,28
2,4	47,35	34,72

Menurut Chen [22] perubahan volume tidak akan terjadi jika kadar air dalam suatu tanah tidak berubah, perubahan volume dapat terjadi apabila terjadi perubahan 1% – 2% kadar air. Kemungkinan besar litologi yang berada di

kedalaman 1,8-2,4 meter adalah memiliki nilai kembang dan susut yang besar jika dilihat dari perubahan kadar airnya. Sehingga perlu diwaspadai potensi longsor pada lereng karena sifat fisik tanah yang memiliki mengembang tinggi. Gempa bumi menyebabkan kemungkinan keruntuhan bangunan sebesar 1% dalam 50 tahun. Pada lokasi penelitian, jenis tanah yang dibandingkan dengan kadar air (*water content*) >40% dan nilai PI >20. Maka klasifikasi situs merupakan tanah lunak atau tipe SE [24]. Tanah lunak (*soft soil*) yang termasuk dalam tipe E dapat meningkatkan *long period ground response* sampai dengan 350% [25].

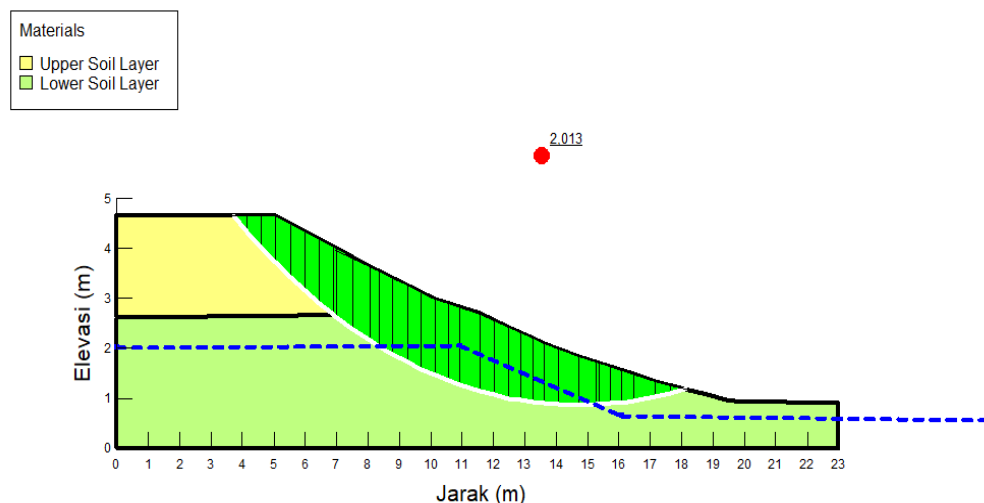
3.4. Simulasi Dinamis Stabilitas Lereng

Simulasi dinamis ini menggunakan perangkat lunak Geoslope/W 2012 dengan menganalisis kestabilan lereng dengan 2 kondisi yaitu:

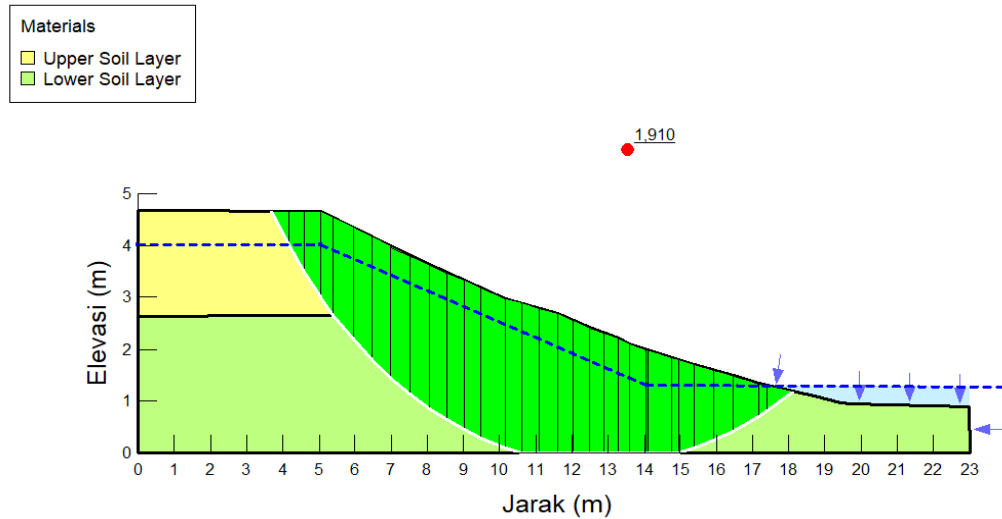
1. Kondisi lereng tanpa beban
2. Kondisi lereng dengan beban

a. Kondisi Lereng Tanpa Beban

Dari hasil analisis piranti lunak Geoslope/W 2012 faktor keamanan lereng pada kondisi lereng tanpa beban didapatkan nilai faktor keamanan lereng 2,013, dengan kedalaman muka air tanah ± 5 m.



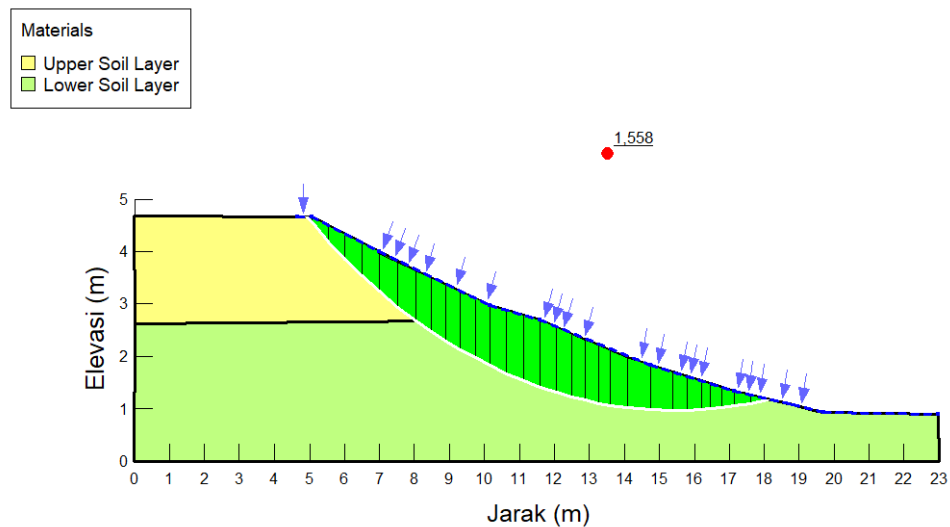
Gambar 4. Hasil analisis fk dengan kondisi lereng tanpa beban dengan MAT pada kedalaman ± 5 m. Kemudian simulasi kondisi lereng dengan kedalaman MAT ± 1 m di bawah permukaan, nilai kewanaman lereng adalah 1,910, dimana nilai ini menggambarkan kondisi lereng yang stabil, hal ini dapat terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil analisis FK dengan kondisi lereng tanpa beban dengan MAT pada kedalaman ± 1 m

Simulasi kondisi lereng kondisi tanah jenuh air dengan adanya aliran air permukaan atau *run off*, nilai keamanan lereng adalah 1,558, dimana

nilai ini masih menggambarkan kondisi lereng yang stabil. Kondisi keamanan lereng daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 6.

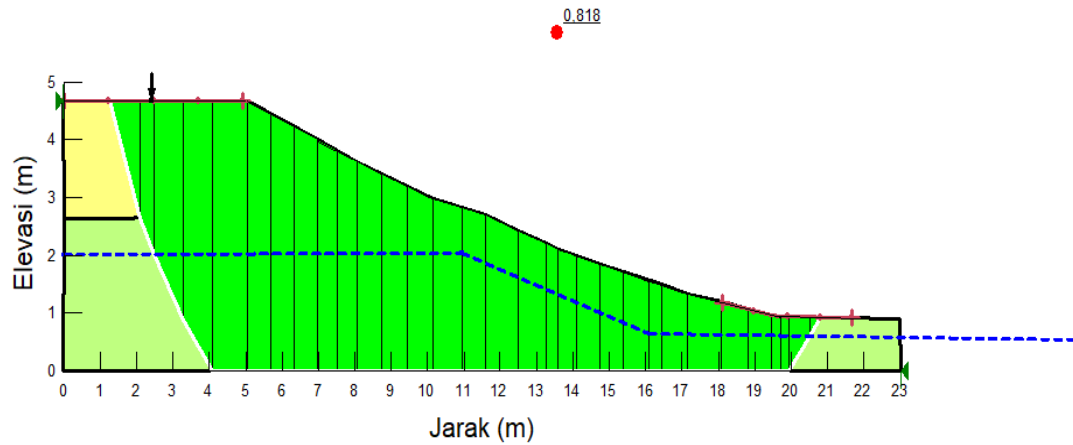
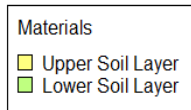


Gambar 6 Hasil analisis FK dengan kondisi lereng tanpa beban dengan MAT tanah jenuh air dengan adanya aliran air permukaan atau run off

b. Kondisi Lereng dengan Beban

Kondisi lereng dengan beban di asumsikan dengan adanya beban di atasnya sebesar 100 kg/cm². Dari hasil analisis menggunakan piranti lunak *GEOSLOPE/W 2012* faktor keamanan

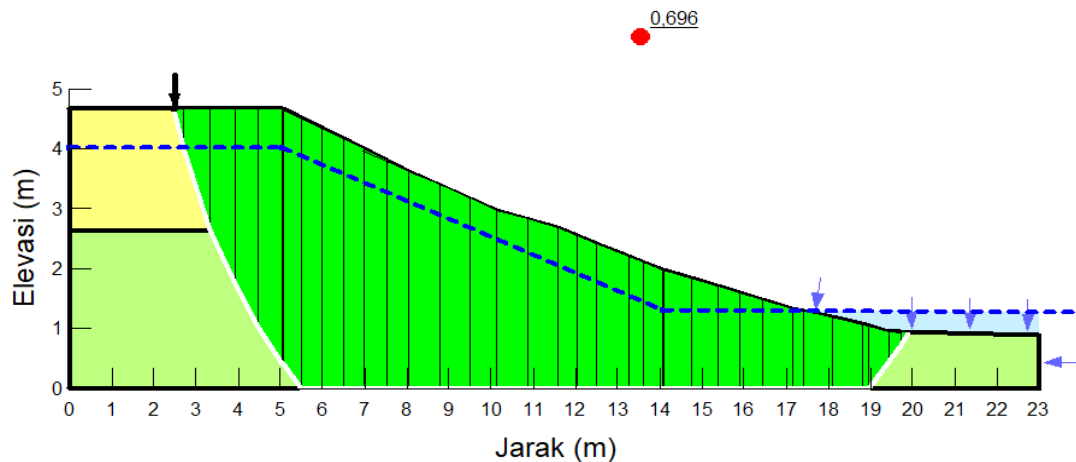
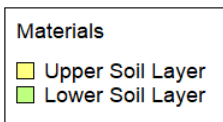
lereng pada kondisi lereng dengan beban digambarkan kondisi lereng dengan kedalaman muka air tanah ± 5 m di bawah permukaan, nilai kewanaman lereng adalah 0,818, dimana nilai ini menggambarkan kondisi lereng yang kritis menurut Korah [21].



Gambar 7. Hasil analisis FK dengan kondisi lereng dengan tambahan beban 100 kg/cm^2 dan MAT pada kedalaman $\pm 5 \text{ m}$.

Kondisi lereng kondisi tanah jenuh air dengan adanya aliran air permukaan atau run off, nilai keamanan lereng adalah 0,488, dimana nilai ini

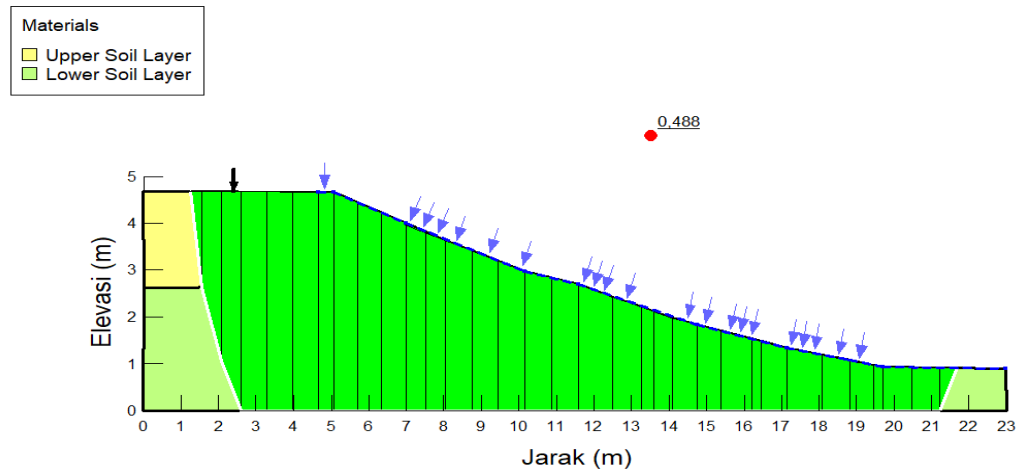
menggambarkan kondisi lereng termasuk kritis, seperti yang terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil analisis FK dengan kondisi lereng dengan tambahan beban 100 kg/cm^2 dan MAT pada kedalaman $\pm 1 \text{ m}$.

Kondisi lereng dengan kedalaman muka air tanah $\pm 1 \text{ m}$ di bawah permukaan, nilai fk lereng adalah

0,696, dimana nilai ini menggambarkan kondisi lereng yang tidak stabil.



Gambar 9 Hasil analisis FK dengan kondisi lereng dengan tambahan beban 100 kg/cm^2 dan MAT tanah jenuh air dengan adanya aliran air permukaan atau *run off*.

3.5. Pengaruh Kedalaman Muka Air Tanah terhadap Stabilitas Lereng

Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak GEOSLOPE/W 2012 menunjukkan bahwa kondisi lereng tanpa pembebanan masih berada dalam kategori stabil pada seluruh skenario kedalaman muka air tanah. Nilai faktor keamanan meningkat dari 1,910 pada kedalaman muka air tanah $\pm 1 \text{ m}$ menjadi 2,013 pada kedalaman $\pm 5 \text{ m}$. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa semakin dalam posisi muka air tanah, semakin kecil tekanan air pori (*pore water pressure*) yang bekerja pada massa tanah. Penurunan tekanan air pori akan meningkatkan tegangan efektif (*effective stress*), sehingga kuat geser tanah bertambah dan faktor keamanan lereng meningkat. Fenomena ini sesuai dengan prinsip kuat geser tanah menurut kriteria keruntuhan Mohr–Coulomb yang menyatakan bahwa peningkatan tegangan efektif akan meningkatkan kemampuan tanah dalam menahan gaya geser [25].

Meskipun demikian, peningkatan nilai faktor keamanan antara kedua skenario relatif kecil, yaitu sekitar 5%. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan kedalaman muka air tanah bukan merupakan faktor pengontrol utama kestabilan lereng pada lokasi penelitian. Kondisi tersebut diduga berkaitan dengan karakter hidrogeologi kawasan yang termasuk daerah nir akuifer sehingga fluktuasi muka air tanah relatif terbatas. Ariesta (2019) juga menjelaskan bahwa pengaruh muka air

tanah terhadap kestabilan lereng sangat bergantung pada karakteristik geologi dan sistem aliran air bawah permukaan. Pada daerah dengan sistem airtanah terbatas, perubahan muka air tanah belum tentu menyebabkan penurunan faktor keamanan secara signifikan.

Selain itu, hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi tanah jenuh air faktor keamanan masih berada pada nilai 1,558, yang berarti lereng tetap berada pada kondisi stabil meskipun mengalami penurunan dibandingkan kondisi kering. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa infiltrasi air hujan memang meningkatkan tekanan air pori, tetapi belum cukup untuk menyebabkan kegagalan lereng apabila tidak disertai adanya pembebanan tambahan di atas permukaan tanah. Temuan ini sejalan dengan penelitian Asnur et al. [15] yang menyatakan bahwa peningkatan kadar air akan menurunkan kestabilan lereng melalui peningkatan tekanan air pori dan penurunan kuat geser tanah, namun besarnya pengaruh sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi dan sifat fisik material penyusun lereng.

3.6. Pengaruh Pembebanan terhadap Faktor Keamanan Lereng

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan beban sebesar 100 kg/cm^2 menyebabkan penurunan faktor keamanan secara signifikan pada seluruh skenario muka air tanah. Nilai faktor keamanan turun menjadi 0,818 pada kedalaman muka air

tanah ± 5 m, 0,696 pada kedalaman ± 1 m, dan mencapai 0,488 pada kondisi tanah jenuh air. Nilai tersebut berada di bawah batas kestabilan lereng menurut Korah et al. [21], sehingga menunjukkan bahwa lereng telah memasuki kondisi tidak stabil hingga kritis.

Secara mekanika tanah, penambahan beban meningkatkan gaya penggerak (*driving force*) pada massa tanah sehingga keseimbangan antara gaya penahan (*resisting force*) dan gaya penggerak menjadi terganggu. Walaupun secara teoritis peningkatan tegangan normal dapat meningkatkan kuat geser tanah berdasarkan kriteria Mohr–Coulomb, kondisi tersebut tidak terjadi secara optimal pada lokasi penelitian karena tanah penyusun lereng merupakan hasil pelapukan breksi tufan dengan plastisitas tinggi dan struktur yang relatif lepas. Material seperti ini cenderung mengalami penurunan kuat geser ketika menerima pembebanan dalam kondisi kadar air tinggi akibat meningkatnya tekanan air pori dan berkurangnya tegangan efektif [26].

Penurunan faktor keamanan yang sangat signifikan pada seluruh skenario pembebanan menunjukkan bahwa perubahan penggunaan lahan berpotensi memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap kestabilan lereng dibandingkan perubahan muka air tanah pada kondisi alami. Hasil tersebut memperkuat konsep yang dikemukakan oleh Phoon et al. [19], bahwa evaluasi kestabilan lereng sebaiknya tidak hanya mempertimbangkan parameter geoteknik deterministik, tetapi juga perubahan kondisi pembebanan dan ketidakpastian karakteristik tanah sebagai dasar dalam pengambilan keputusan rekayasa geoteknik.

3.7. Hubungan Karakteristik Geologi dengan Hasil Simulasi

Respon faktor keamanan terhadap perubahan pembebanan tidak dapat dipisahkan dari kondisi geologi daerah penelitian. Breksi tufan yang telah mengalami pelapukan intensif menghasilkan tanah residual dengan porositas relatif tinggi sehingga air hujan mudah meresap ke dalam massa tanah. Di bawah lapisan tanah tersebut berkembang lempung hitam berplastisitas tinggi serta lava andesit yang memiliki permeabilitas relatif rendah. Perbedaan permeabilitas antar litologi tersebut menyebabkan

akumulasi air pada bidang kontak litologi sehingga meningkatkan tekanan air pori dan membentuk bidang gelincir potensial.

Interpretasi tersebut konsisten dengan hasil pengamatan lapangan yang menunjukkan bahwa sebagian besar longsoran berkembang pada kontak antara tanah pelapukan dengan lava andesit atau lempung hitam. Kondisi ini juga menjelaskan mengapa nilai liquid limit yang tinggi (68,59–69,31%) dan *plasticity index* sebesar 26,06–28,18% memberikan kontribusi terhadap penurunan kekuatan geser tanah ketika kadar air meningkat. Peningkatan kadar air pada tanah berplastisitas tinggi akan menurunkan *suction* tanah tak jenuh sehingga kekuatan geser efektif ikut berkurang [26].

Selain karakteristik material, geometri lereng juga berperan penting terhadap respon kestabilan lereng. Lereng yang tersusun oleh tanah residual dengan ketebalan besar akan lebih sensitif terhadap perubahan pembebanan dibandingkan lereng yang didominasi batuan segar [28]. Kondisi tersebut sesuai dengan lokasi penelitian yang memiliki ketebalan tanah pelapukan lebih dari 3 m sehingga beban tambahan secara langsung meningkatkan tegangan geser pada bidang gelincir.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa kestabilan lereng di kawasan Titik Nol Ciliwung dikontrol oleh interaksi antara kondisi geologi, karakteristik geoteknik tanah, serta perubahan pembebanan akibat penggunaan lahan. Material penyusun berupa breksi tufan terlapukkan, lempung hitam berplastisitas tinggi, dan lava andesit membentuk kondisi geologi yang rentan terhadap pembentukan bidang gelincir, terutama pada lereng dengan tanah pelapukan yang tebal dan kemiringan curam. Nilai liquid limit sebesar 68,59–69,31% dan *plasticity index* sebesar 26,06–28,18% menunjukkan bahwa tanah memiliki potensi pengembangan tinggi sehingga peningkatan kadar air berpotensi menurunkan kekuatan geser tanah.

Simulasi numerik menggunakan GEOSLOPE/W 2012 menunjukkan bahwa lereng masih berada dalam kondisi stabil pada skenario tanpa pembebanan, baik pada kedalaman muka air tanah

± 5 m (FK = 2,013), ± 1 m (FK = 1,910), maupun pada kondisi tanah jenuh air (FK = 1,558). Namun demikian, penambahan beban sebesar 100 kg/cm² menyebabkan faktor keamanan menurun hingga berada di bawah batas stabilitas (FK = 0,818–0,488). Hasil ini mengindikasikan bahwa perubahan pembebanan akibat perubahan penggunaan lahan memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap kestabilan lereng dibandingkan perubahan muka air tanah pada kondisi alami.

Kontribusi utama penelitian ini adalah memberikan bukti kuantitatif bahwa perubahan tutupan lahan di kawasan hulu DAS Ciliwung perlu dievaluasi tidak hanya berdasarkan aspek hidrologi, tetapi juga berdasarkan kapasitas geoteknik lereng. Oleh karena itu, setiap rencana pembangunan pada kawasan hulu sebaiknya didukung oleh analisis kestabilan lereng sebagai bagian dari mitigasi bencana longsor dan perencanaan tata ruang berbasis karakteristik geologi.

Penelitian ini masih terbatas pada analisis dua dimensi dengan metode limit equilibrium menggunakan satu penampang lereng. Penelitian selanjutnya disarankan mengintegrasikan analisis infiltrasi hujan tidak tunak (transient seepage), pemodelan tiga dimensi, dan analisis probabilistik untuk memperoleh estimasi kestabilan lereng yang lebih representatif terhadap kondisi lapangan.

4.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, setiap rencana perubahan penggunaan lahan di kawasan Titik Nol Ciliwung perlu didahului dengan analisis kestabilan lereng untuk memastikan bahwa penambahan beban tidak menurunkan faktor keamanan hingga berada pada kondisi kritis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Republik Indonesia. Peraturan Daerah (Perda) no. 1 tahun 2024 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Bogor Tahun 2024 – 2044.
- [2] Republik Indonesia. Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 60 Tahun 2020 tentang Rencana Tata Ruang Kawasan Perkotaan Jakarta, Bogor, Depok, Tangerang, Bekasi, Puncak, dan Cianjur. LN.2020/NO.101, JDIH.SETKAB.GO.ID: 199 HLM.
- [3] Republik Indonesia. Keputusan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Kepmen PUPR) No. 26/KPTS/M/2015 Tentang pola pengelolaan Sumber Dya Air Wilayah Sungai Cisadane-Ciliwung.
- [4] Pamungkas, H.S.R, Yogaswara, L.M., dan Karmadi, M.A. (2023). Review dan pemetaan lahan kritis dalam wilayah urban. Jurnal Teknik Vol 24, No 2 (2023). Sumber: <https://journal.unpak.ac.id/index.php/jurnalt eknik/article/view/9396>
- [5] Hermansyah, R.Taufik. (2016). Pengaruh Perubahan Tutupan Lahan Terhadap Debit Sungai di Daerah Aliran Sungai Ciliwung Hulu. Bogor: Departemen Geofisika Dan Meteorologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Pertanian Bogor.
- [6] Sabila, M. Fathana. (2017). Pengaruh Perubahan Penggunaan Lahan Terhadap Kualitas Air di DAS Ciliwung dan Pesanggrahan. Bogor: Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor.
- [7] Republik Indonesia. Peraturan Presiden (Pepres) RI no. 18 tahun 2020 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional Tahun 2020-2024.
- [8] Republik Indonesia. Keputusan Menteri Kehutanan Nomor: 195/Kpts-III/2003 Tentang Penunjukan Kawasan Hutan Di Wilayah Provinsi Jawa Barat Seluas $\pm$ 816.603 (Delapan Ratus Enam Belas Ribu Enam Ratus Tiga) Hektar
- [9] Subagio. (2013).Anomali gayaberat dan potensi bencana geologi di kawasan Jawa Barat bagian Tengah. Jurnal Sumber Daya Geologi Vol. 23 No. 2 (2013). DOI: <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v23i2 .90>
- [10] Wijaya, Hengki (2017). Daya Dukung Lingkungan Hidup DAS Ciliwung Hulu Di Kabupaten Bogor. Bogor: Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor.
- [11] Realsoft Media Lab. (2017). Master plan kawasan Agroekowisata Perkebunan Teh Ciliwung (Site Plan Rest Area). Bogor: PT Sumber Sari Bumi Pakuan
- [12] Effendi, Kusnama, dan Hermanto. (1998). Peta Geologi Lembar Bogor, Jawa Edisi ke

- dua. Skala 1: 100.000. Bandung: Badan Penelitian dan Pengembangan Geologi
- [13] Arzaq, M.H., Wardoyo, S.S., dan Wicaksono, A.P. (2020). Identifikasi Karakteristik Longsor dan Analisis Kestabilan Lereng (Studi Kasus: Dusun Banjarharjo II, Desa Muntuk, Kecamatan Dlingo, Kabupaten Bantul). Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumihan Ke-II, Fakultas Teknologi Mineral, UPN Veteran Yogyakarta, 7 November 2020.
- [14] Badan Geologi. (2018). Laporan Singkat Pemeriksaan Gerakan Tanah Di Kecamatan Cisarua, Kab. Bogor Provinsi Jawa Barat. Publish 21 February 2018, unduh 25 Desember 2019. Sumber: <http://www.vsi.esdm.go.id/index.php/gerakan-tanah/kejadian-gerakan-tanah/2020-laporan-singkat-pemeriksaan-gerakan-tanah-di-kecamatan-cisarua-kab-bogor-provinsi-jawa-barat>
- [15] Asnur et al.(2019). Effects of water content to slope stability in Pangkalan Lima Puluh Kota. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 361 012015. DOI 10.1088/1755-1315/361/1/012015
- [16] BNPB. (2024). Statistik Bencana, Korban dan Kerusakan Menurut Wilayah. https://dibi.bnpb.go.id/statistik_menurut_wilayah
- [17] Ariesta, Diana. (2019). The Effect of Initial Groundwater Table and Rainfall Wetting Towards Slope Stability (Case Study of Landslide in Tangkil Hamlet, Banaran Village, Pulung Subdistrict, Ponorogo Regency). Journal of Civil Engineering Forum Vol. 5 No. 2 (May 2019) RESEARCH ARTICLE <https://doi.org/10.22146/jcef.43804>
- [18] Murtianto, E. (n.d.). Peta Hidrogeologi Indonesia Lembar 1209-1 Bogor (Jawa Barat). Direktorat Geologi Tata Lingkungan.
- [19] Phoon, K. Kwang et al. (2022). Geotechnical uncertainty, modeling, and decision making. Elsevier: Soils and foundations Volume 62, Issue 5, October 2022, 101189.
- [20] Nofrizal, Refi, A., dan Farhan, M. (2024). Analisa Stabilitas Lereng dengan Perkuatan Soil Nailing Menggunakan Program Geoslope. Ensiklopedia of Journal Vol 6, No 2 (2024) P-ISSN 2622-9110, E-ISSN 2654-8399 DOI: <https://doi.org/10.33559/eoj.v6i2.2153>
- [21] Korah, T., E., T. A., & Sarajar, A. N. (2014). Analisis Kestabilan Lereng dengan Metode Janbu (Studi Kasus: Kawasan Citraland). Jurnal Sipil Statik, 2(1), 22–28.
- [22] Chen, F.H. (1975). Foundations on Expansive Soils. Developments in Geotechnical Engineering Vol. 12 Amsterdam-Oxford-New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- [23] Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). An Introduction to Geotechnical Engineering (733 p.). Eaglewood Cliff, NJ: Prentice-Hall, Inc.
- [24] ASCE Standard ASCE/SEI. (2010). Minimum Design Loads For Buildings and Other Structures (ASCE 7-10). Virginia.
- [25] Tumillar, S. (2009). Petunjuk Perancangan Struktur Berdasarkan Ketentuan ASCE 7-05, IBC 2009 dan ACI 318-08. HAKI. Jakarta.
- [26] Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. New York: John Wiley & Sons.
- [27] Duncan, J.M. & Wright, S.G. (2005). Soil Strength and Slope Stability. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons
- [28] Griffiths, D.V. & Lane, P.A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. Géotechnique, 49(3), pp. 387–403.