

Analisis Nilai Modulus Geser Maksimum Tanah Pasir Menggunakan Data SPT di Danau Toba

Aris Julianto Sianipar¹, Tika Ermita Wulandari²

¹²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area
tikaermita@staff.uma.ac.id²

ABSTRACT

The Lake Toba boundary area has complex geological and geomorphological characteristics due to past volcanic activity. Along with the rapid development of infrastructure and settlements in this area, in-depth geotechnical studies are needed to support safe and sustainable planning. This study aims to evaluate the maximum shear modulus (G_{max}) of soil based on Standard Penetration Test (SPT) data with an empirical approach using the formula of Hardin & Black (1968). The study location is in Nainggolan, Samosir Regency, North Sumatra. Analysis was conducted on field data in the form of N-SPT values, soil unit weight, and calculations of effective stress and effective octahedral stress. The results show that the G_{max} value tends to increase with depth, with the highest value of 60,820.13 kN/m² at a depth of 14.45–16.45 meters, and the lowest value of 14,383.66 kN/m² at a layer of 4.45–6.45 meters, indicating a weak soil zone with high pore water content. Layers with high G_{max} values are recommended as the main supporting layer of the foundation, while layers with low values require reinforcement. This study proves that the empirical correlation approach based on SPT can be a practical and economical alternative in estimating soil dynamic parameters, and can be used to support civil engineering planning and geotechnical risk mitigation in the Lake Toba area.

Keywords: Maximum Shear Modulus, effective stress, Standard Penetration Test (SPT).

ABSTRAK

Wilayah sempadan Danau Toba memiliki karakteristik geologi dan geomorfologi yang kompleks akibat aktivitas vulkanik masa lalu. Seiring dengan pesatnya pembangunan infrastruktur dan pemukiman di kawasan ini, diperlukan kajian geoteknik yang mendalam untuk mendukung perencanaan yang aman dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi nilai modulus geser maksimum (G_{max}) tanah berdasarkan data uji Standard Penetration Test (SPT) dengan pendekatan empiris menggunakan rumusan Hardin & Black (1968). Lokasi penelitian berada di Nainggolan, Kabupaten Samosir, Sumatera Utara. Analisis dilakukan terhadap data lapangan berupa nilai N-SPT, berat isi tanah, dan perhitungan tegangan efektif serta tegangan octahedral efektif. Hasil menunjukkan bahwa nilai G_{max} cenderung meningkat seiring kedalaman, dengan nilai tertinggi sebesar 60.820,13 kN/m² pada kedalaman 14,45–16,45 meter, dan nilai terendah sebesar 14.383,66 kN/m² pada lapisan 4,45–6,45 meter yang mengindikasikan zona tanah lemah dengan kadar air pori tinggi. Lapisan dengan nilai G_{max} tinggi direkomendasikan sebagai lapisan pendukung utama fondasi, sementara lapisan dengan nilai rendah memerlukan perkuatan. Penelitian ini membuktikan bahwa pendekatan korelasi empiris berbasis SPT dapat menjadi alternatif praktis dan ekonomis dalam estimasi parameter dinamis tanah, serta dapat dimanfaatkan untuk mendukung perencanaan teknik sipil dan mitigasi risiko geoteknik di kawasan Danau Toba.

Kata kunci : Modulus Geser Maksimum, tegangan efektif, Standart Penetration Test (SPT).

PENDAHULUAN

Indonesia adalah sebuah negara kepulauan yang dilalui oleh jalur gempa dan merupakan daerah gempa dengan frekwensi kejadiannya relative tinggi khususnya diwilayah Danau Toba (Purwanto, 2008). Wilayah sempadan Danau Toba memiliki kondisi geologi dan geomorfologi yang rumit sebagai dampak dari aktivitas vulkanik di masa lalu. Seiring berkembangnya kawasan ini dalam bidang pariwisata, pembangunan infrastruktur, dan pemukiman, dibutuhkan pemahaman yang komprehensif mengenai sifat-sifat geoteknik tanah, khususnya terkait kestabilan dan kemampuan tanah dalam mendukung beban bangunan (Ratdomopurbo, dkk., 2019).

Salah satu parameter kunci dalam analisis geoteknik adalah modulus geser tanah (*Shear Modulus, G*), yaitu ukuran kekakuan tanah terhadap gaya geser. Nilai ini penting dalam menentukan respon dinamik tanah terhadap beban gempa serta dalam perencanaan fondasi dan struktur bawah tanah. Namun, pengukuran langsung modulus geser melalui pengujian laboratorium atau in-situ (seperti *resonant column test* atau *seismic crosshole test*) sering kali memerlukan biaya yang tinggi dan waktu yang cukup lama.

Sebagai solusi yang lebih praktis dan ekonomis, uji *Standard Penetration Test* (SPT) dapat dimanfaatkan untuk memperkirakan nilai modulus geser secara tidak langsung melalui pendekatan empiris. Sejumlah hubungan korelasional empiris telah dikembangkan oleh para ahli, seperti Hardin & black (1968) Mereka menyatakan bahwa modulus geser maksimum (G_{max}) sangat dipengaruhi oleh tegangan efektif rata-rata dan tingkat kepadatan tanah, yang dapat direpresentasikan melalui nilai SPT.

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi nilai modulus geser tanah berdasarkan data SPT di kawasan sempadan Danau Toba, sebagai acuan awal dalam perencanaan teknik dan upaya mitigasi risiko geoteknik di daerah tersebut.

TINJAUAN LITERATUR

Modulus geser tanah, yang biasa disimbolkan dengan (G), merupakan salah satu sifat dinamis tanah. Nilai modulus geser maksimum (G_{max}) berperan penting sebagai parameter utama dalam analisis permasalahan dinamika tanah (Linawati, dkk. 2019).

Rumusan Modulus geser tanah ini nilainya tergantung pada teg. vertikal efektif (σ'), bentuk butiran, efek kejenuhan, level regangan, Indeks Plastis tanah (PI), Overconsolidated ratio (OCR), angka pori (e), sudut geser dalam tanah (ϕ) dan koef. tekanan tanah dalam keadaan diam (K_0). Namun jika kondisi tanah pasir dihitung dengan parameter Tegangan efektif (*Effective Stress*) dan perhitungan tegangan octahedral efektif tanah.

Tegangan efektif (*Effective Stress*)

Tegangan efektif (*Effective Stress*) merupakan konsep dasar yang sangat penting dalam mekanika tanah, yang pertama kali diperkenalkan oleh Karl Terzaghi pada tahun 1936. Konsep ini menggambarkan hubungan antara partikel-partikel

tanah dan tekanan air pori dalam kondisi tanah yang jenuh. Pada tanah yang jenuh air, tegangan total yang bekerja dapat diuraikan menjadi dua komponen utama, yaitu:

$$\sigma = \sigma' + \mu$$

σ = Tegangan total (dalam satuan KN/m^2),

σ' = Tegangan efektif (KN/m^2),

μ = Tekanan air pori (KN/m^2), yaitu tekanan fluida di antara ruang pori tanah

Perhitungan Tegangan Octahedral Efektif Tanah

Tegangan octahedral efektif adalah tegangan normal yang bekerja pada bidang oktahedral dan digunakan sebagai representasi kondisi tegangan rata-rata dalam suatu elemen tanah, dengan memperhitungkan tegangan efektif. Konsep ini memiliki peran penting dalam menganalisis karakteristik geser tanah serta sering diterapkan dalam kajian respon dinamik tanah. Perhitungan tegangan octahedral efektif tanah dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\bar{\sigma}_o = \frac{1}{3}[\sigma' + 2\sigma'(1 - \sin\phi)]$$

$\bar{\sigma}_o$ = Tegangan octahedral efektif

σ' = Tegangan vertikal efektif (kPa)

ϕ = Sudut geser dalam tanah.

Perhitungan Nilai modulus geser maksimum (G_{max})

Modulus geser maksimum (G_{max}) merupakan parameter penting dalam analisis dinamika tanah, khususnya untuk menilai kekakuan tanah pada regangan sangat kecil (low strain). Nilai ini menunjukkan respon awal tanah terhadap gaya geser sebelum terjadi deformasi plastis. G_{max} umumnya digunakan dalam perencanaan fondasi bangunan tahan gempa, analisis likuifaksi, serta permodelan numerik perilaku dinamis tanah.

Perhitungan nilai G_{max} dapat dilakukan secara empiris berdasarkan hasil penelitian laboratorium resonant column test oleh Hardin dan Black (1968). Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$G_{maks} = \frac{6908 (2,17 - e)^2}{1 + e} \bar{\sigma}_o^{0,50}$$

e = angka pori (void ratio)

METODE PENELITIAN

Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis nilai modulus geser maksimum (G_{max}) tanah di kawasan Danau Toba dengan memanfaatkan data hasil uji *Standard Penetration Test* (SPT). Metode yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif dengan

teknik analisis empiris berdasarkan korelasi nilai N-SPT terhadap G_{max} .

Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlokasi di kawasan sepadan Danau Toba, yaitu wilayah yang berada di sekitar tepi danau yang secara langsung dipengaruhi oleh dinamika geologi, geomorfologi, dan hidrologi Danau Toba. Secara administratif, lokasi penelitian ini di Nainggolan, Kabupaten Samosir, Sumatera Utara. Peta ini menunjukkan posisi koordinat lokasi 2°29'48" N, 98°37'24" E.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Kondisi Tanah

Kondisi tanah pada lokasi penelitian didominasi dengan pasir. Dengan kedalaman tanah keras di 16,45 m. Kondisi tanah tersebut dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Data N-SPT

Kedalaman (m)	z (m)	NSPT	Jenis Tanah
0 - 2.45	2.45	12	Pasir Bercampur Batu Apung
2.45 - 4.45	4.45	10	Pasir Sedang Halus
4.45 - 6.45	6.45	3	Pasir Sedikit Lempung
6.45 - 8.45	8.45	4	Pasir Sedang Halus
8.45 - 10.45	10.45	5	Pasir Sedang Halus
10.45 - 12.45	12.45	20	Pasir Sedang

12.45 - 14.45	14.45	52	Pasir Sedang Halus
14.45 - 16.45	16.45	52	Pasir Sedang Halus

Rentang nilai NSPT berada antara 3 hingga 52. Nilai terendah (N=3) tercatat pada kedalaman 4.45–6.45 meter, yang mengindikasikan kondisi tanah yang lunak atau gembur. Sementara itu, nilai tertinggi (N=52) ditemukan pada kedalaman 12.45–16.45 meter, yang menandakan tanah dalam keadaan sangat padat dan berpotensi memiliki modulus geser maksimum yang tinggi.

Pola sebaran nilai ini menunjukkan bahwa lapisan tanah bagian atas umumnya memiliki tingkat kepadatan sedang (N = 10–12), kemudian mengalami penurunan pada lapisan tanah lunak (N = 3–5), dan kembali meningkat secara signifikan di kedalaman lebih dari 10 meter, yang kemungkinan besar merupakan tanah residu atau batuan lapuk dengan kekuatan yang lebih baik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Tegangan Efektif tanah

Perhitungan tegangan tanah (khususnya egangan efektif vertikal) sangat penting dalam analisis modulus geser maksimum. Berikut hasil perhitungan tegangan dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Perhitungan Tegangan Efektif

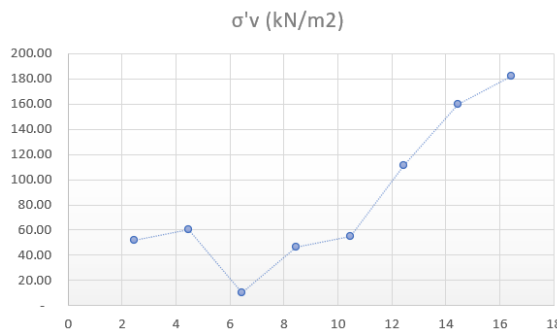
Kedalaman (m)	z (m)	NSP T	γ (kN/m ³)	σ_v (kN/m ²)	μ (kN/m ²)	σ'_v (kN/m ²)
0 - 2.45	2.45	12	21.03	51.51	-	51.51
2.45 - 4.45	4.45	10	23.43	104.26	43.65	60.60
4.45 - 6.45	6.45	3	11.39	73.46	63.27	10.19
6.45 - 8.45	8.45	4	15.35	129.71	82.89	46.81
8.45 - 10.45	10.45	5	15.10	157.80	102.51	55.28
10.45 - 12.45	12.45	20	18.75	233.44	122.13	111.31
12.45 - 14.45	14.45	52	20.88	301.77	141.75	160.02
14.45 - 16.45	16.45	52	20.88	343.54	161.37	182.17

Nilai berat isi tanah (γ) berkisar antara 11.39 hingga 23.43 kN/m³. Nilai tertinggi tercatat pada kedalaman 2.45–4.45 meter, yaitu sebesar 23.43 kN/m³, sementara nilai terendah sebesar 11.39 kN/m³ ditemukan pada kedalaman 4.45–6.45 meter. Nilai berat isi yang rendah ini sejalan dengan nilai NSPT yang kecil, yang mengindikasikan bahwa lapisan tersebut merupakan tanah lunak atau memiliki tingkat kejenuhan yang tinggi.

Tegangan vertikal total (σ_v) mengalami peningkatan seiring bertambahnya kedalaman, dari 51.51 kN/m² pada kedalaman 2.45 meter hingga mencapai 343.54 kN/m² pada kedalaman 16.45 meter. Kenaikan ini mencerminkan bertambahnya tekanan akibat akumulasi berat tanah dari lapisan-lapisan di atasnya.

Tekanan air pori (μ) mulai dianalisis pada kedalaman lebih dari 2.45 meter, dengan nilai yang terus meningkat dari 43.65 hingga 161.37 kN/m². Nilai tertinggi ditemukan pada lapisan 14.45–16.45 meter.

Tegangan efektif vertikal ($\sigma'v$), yang merupakan hasil pengurangan antara tegangan total (σv) dan tekanan air pori (μ), menunjukkan nilai paling rendah sebesar 10.19 kN/m² pada lapisan 4.45–6.45 meter dan nilai tertinggi sebesar 182.17 kN/m² pada kedalaman 14.45–16.45 meter. Gambaran kondisi Tegangan efektif vertikal ($\sigma'v$) tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Tegangan efektif vertikal ($\sigma'v$)

Nilai $\sigma'v$ yang rendah menunjukkan kondisi tanah yang jenuh air dan lunak, yang berpotensi menyebabkan penurunan (*settlement*) berlebih atau bahkan likuifaksi jika terjadi beban dinamis seperti gempa.

Perhitungan Tegangan Octahedral Efektif Tanah

Perhitungan tegangan octahedral efektif tanah dilakukan per lapisan tanah. Berikut perhitungan pada lapisan 1 (kedalaman 0 - 2.45).

$$\bar{\sigma}_o = \frac{1}{3}[\sigma' + 2\sigma'(1 - \sin\phi)]$$
$$\bar{\sigma}_o = \frac{1}{3}[51,51 + (2 \times 51,51) (1 - \sin 20)]$$
$$\bar{\sigma}_o = 20.16 \text{ KN/m}^2$$

Untuk perhitungan lapisan tanah berikutnya dapat dilihat pada tabel 3.

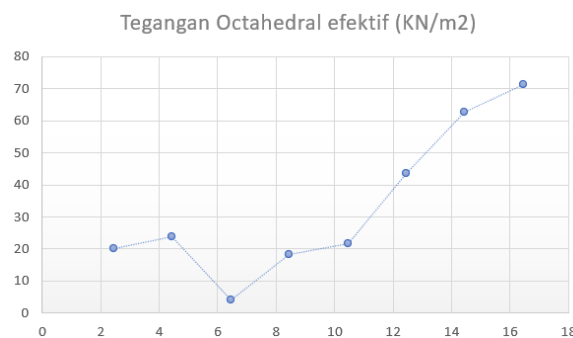
Tabel 3. Perhitungan Tegangan Octahedral Efektif Tanah

Kedalaman (m)	z (m)	Tegangan Octahedral efektif (KN/m ²)
0 - 2.45	2.45	20.16
2.45 - 4.45	4.45	23.72
4.45 - 6.45	6.45	3.99
6.45 - 8.45	8.45	18.32

8.45 - 10.45	10.45	21.64
10.45 - 12.45	12.45	43.56
12.45 - 14.45	14.45	62.63
14.45 - 16.45	16.45	71.29

Nilai tegangan *octahedral* efektif cenderung meningkat seiring bertambahnya kedalaman, dengan penurunan mencolok pada lapisan 4.45–6.45 meter yang mengindikasikan adanya zona tanah lemah atau kondisi kejenuhan tinggi.

Pada kedalaman lebih dari 10 meter, tegangan *octahedral* menunjukkan nilai yang relatif tinggi, mencerminkan tanah yang memiliki kekakuan serta ketahanan geser yang baik, sehingga lebih sesuai digunakan sebagai dasar fondasi atau untuk kebutuhan perkuatan tanah. Gambaran kondisi tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Tegangan Octahedral Efektif

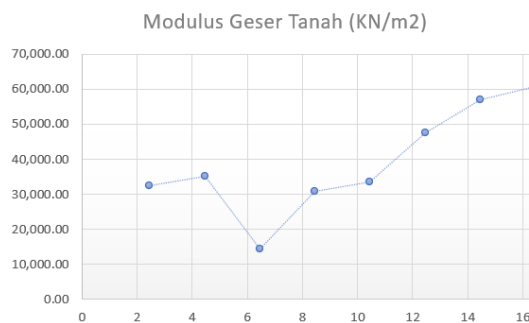
Perhitungan G_{\max}

Hasil analisis tegangan *octahedral* efektif pada point sebelumnya mendukung estimasi modulus geser maksimum (G_{\max}), karena nilai G_{\max} umumnya meningkat seiring dengan naiknya tegangan octahedral efektif. Perhitungan G_{\max} dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Perhitungan G_{\max}

Kedalaman (m)	z (m)	Modulus Geser Tanah (KN/m ²)
0 - 2.45	2.45	32,342.29
2.45 - 4.45	4.45	35,080.66
4.45 - 6.45	6.45	14,383.66
6.45 - 8.45	8.45	30,831.73
8.45 - 10.45	10.45	33,504.30
10.45 - 12.45	12.45	47,541.99
12.45 - 14.45	14.45	57,003.08
14.45 - 16.45	16.45	60,820.13

Dari analisis diatas didapatkan hasil bahwa Nilai modulus geser tanah meningkat seiring kedalaman, kecuali pada lapisan 4.45–6.45 m yang menjadi anomali dengan nilai G terendah, hal tersebut dikarenakan Kandungan air pori yang tinggi yang dapat melemahkan interaksi antar butiran tanah, sehingga mengakibatkan penurunan kekakuan geser tanah. Pada lapisan 4.45–6.45 m memerlukan perhatian khusus karena potensi kelemahannya dalam menahan beban, sehingga tidak direkomendasikan sebagai zona dukung fondasi tanpa perkuatan. Sedangkan di kedalaman >10 meter menunjukkan nilai modulus geser yang tinggi dan stabil, direkomendasikan sebagai lapisan dukung utama untuk struktur bangunan, pondasi dalam, atau infrastruktur berat. Gambaran kondisi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Modulus Geser Maksimum (G_{max})

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa modulus geser maksimum (G_{max}) tanah di wilayah sempadan Danau Toba dengan pendekatan empiris yang didasarkan pada data uji Standard Penetration Test (SPT). Hasil analisis memperlihatkan bahwa nilai G_{max} cenderung meningkat seiring bertambahnya kedalaman tanah, sejalan dengan kenaikan tegangan efektif dan tegangan octahedral efektif.

Lapisan tanah pada kedalaman 4,45–6,45 meter menunjukkan nilai G_{max} paling rendah (14.383,66 kN/m²), yang mengindikasikan keberadaan tanah lunak dengan kadar air pori yang tinggi. Kondisi ini menyebabkan rendahnya kekakuan geser tanah, sehingga lapisan tersebut tidak disarankan untuk dijadikan sebagai dasar fondasi tanpa perlakuan perbaikan tanah. Sebaliknya, lapisan tanah pada kedalaman lebih dari 10 meter memiliki nilai G_{max} yang tinggi dan stabil—misalnya, pada kedalaman 14,45–16,45 meter sebesar 60.820,13 kN/m²—yang menjadikannya cocok sebagai lapisan pendukung utama bagi konstruksi fondasi, struktur bawah tanah, maupun infrastruktur berat.

Dengan demikian, metode korelasi empiris berbasis data SPT serta rumus Hardin & Black terbukti efisien dan ekonomis dalam memberikan estimasi awal terhadap karakteristik dinamis tanah. Temuan ini dapat dimanfaatkan sebagai

referensi dalam perencanaan teknik sipil, pengembangan wilayah, serta upaya mitigasi terhadap potensi risiko geoteknik di daerah Danau Toba.

Saran

Terdapat saran yang diberikan penulis terkait dengan analisis yang telah dilakukan, yaitu:

1. Dianjurkan untuk melakukan pengujian lanjutan di lapangan, seperti metode geofisika *seismic crosshole* atau *downhole test*, guna memperoleh nilai modulus geser maksimum (G_{max}) yang lebih akurat, khususnya pada lapisan tanah yang menunjukkan anomali.
2. Lapisan tanah pada kedalaman 4,45–6,45 meter yang memiliki kekakuan geser rendah sebaiknya tidak digunakan langsung sebagai tumpuan fondasi. Diperlukan penerapan teknik perbaikan tanah, seperti preloading, PVD (*Prefabricated Vertical Drain*), atau injeksi grouting, untuk meningkatkan kekuatannya.
3. Pendekatan empiris berbasis uji SPT sebaiknya disesuaikan dengan karakteristik lokal tanah di kawasan Danau Toba. Oleh karena itu, pengembangan hubungan korelasi lokal antara nilai N-SPT dan G_{max} menjadi penting untuk meningkatkan akurasi perhitungan.
4. Untuk konstruksi penting di daerah rawan gempa, direkomendasikan untuk memanfaatkan lapisan tanah yang berada pada kedalaman lebih dari 10 meter, karena memiliki nilai modulus geser yang tinggi dan kestabilan yang lebih baik sebagai lapisan penopang fondasi.
5. Perlu dilakukan survei geoteknik yang lebih luas dan terperinci di berbagai lokasi sekitar Danau Toba agar dapat disusun peta distribusi sifat dinamis tanah. Hal ini akan sangat bermanfaat dalam mendukung perencanaan kawasan wisata dan permukiman yang aman serta berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, J. E. (1993). Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Edisi ke-4, alih bahasa Johan K. Hainim). Erlangga.
- Bowles, J. E. (1997). Analisis dan Desain Pondasi. Erlangga.
- Hardin, B. O., & Black, W. L. (1968). Vibration Modulus of Granular Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 94(SM2), 353–369.
- Hardin, B. O., & Black, W. L. (1968). Vibration modulus of normally consolidated clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 94(2), 353–389.
- Linawati., dkk. (2019). Analisis Modulus Geser Maksimum Tanah Lempung Ekspansif Dengan Perkuatan Serat Ijuk Berdasarkan Metode Empiris. *Spektrum Sipil*, ISSN 1858-4896. Vol. 6, No. 1: 69 - 78, Maret 2019
- Purwanto, E. (2008). Nilai Modulus Geser Tanah Berdasarkan Rumus Hardin & Drnevich (1972) Dan Menard (1965). *Media Komunikasi Teknik Sipil*.
- Ratdomopurbo, A., dkk. (2019). Geologi dan potensi geowisata kawasan Danau Toba, Sumatera Utara. Pusat Survei Geologi, Badan Geologi.