

## ANALISIS GEOTEKNIK DENGAN METODE GEOLISTRIK DAN PLAXIS DI PANTAI NYANYI BERABAN, TABANAN

Ketut Agus Karmadi<sup>1\*</sup>, Krisna Kurniari<sup>2</sup>, Made Novia Indriani<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Mahasaraswati Denpasar

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Sipil Universitas Hindu Indonesia Denpasar

Email: aguskarmadi@unmas.ac.id

**ABSTRAK:** Penyelidikan tanah merupakan tahap krusial dalam perencanaan struktur bangunan, khususnya di daerah pantai yang umumnya memiliki lapisan tanah lunak dan berpotensi mengalami penurunan konsolidasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi geoteknik secara komprehensif di Pantai Nyanyi, Desa Beraban, Kabupaten Tabanan melalui kombinasi metode geolistrik resistivitas, pengujian *Cone Penetration Test* (CPT/Sondir), dan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D. Investigasi lapangan dan laboratorium dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik tanah, menentukan kedalaman lapisan tanah keras, serta mengevaluasi daya dukung pondasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan tanah hingga kedalaman 8 meter didominasi oleh tanah lempung dan pasir. Lapisan tanah keras (cadas) baru dijumpai pada kedalaman ±10,5 meter yang diindikasikan oleh nilai resistivitas > 551  $\Omega\text{m}$  dan nilai *Standard Penetration Test* (SPT) mencapai 50. Berdasarkan pemodelan geometri Plaxis 2D pada rencana bangunan 3 lantai, simulasi pondasi dalam jenis *borepile/precast* di kedalaman 10,5 meter dengan pembebanan *ultimate* sebesar 800 kN menghasilkan nilai Faktor Keamanan (SF) sebesar 10,441. Nilai ini berada jauh di atas standar batas aman minimal SNI yaitu 1,5, sehingga desain pondasi pada kedalaman tersebut dinyatakan sangat aman dan layak untuk diaplikasikan.

**Kata Kunci:** Analisis Geoteknik, CPT/Sondir, Metode Geolistrik, Plaxis 2D, Pondasi *Borepile*, Tanah Pantai.

**ABSTRACT:** Soil investigation is a crucial stage in structural planning, particularly in coastal areas that typically feature soft soil layers and are prone to consolidation settlement. This study aims to comprehensively analyze the geotechnical conditions at Nyanyi Beach, Beraban Village, Tabanan Regency, employing a combination of electrical resistivity methods, Cone Penetration Tests (CPT), and Plaxis 2D numerical simulations. Field and laboratory investigations were conducted to identify soil characteristics, determine the depth of the hard soil layer, and evaluate foundation bearing capacity. The results indicated that the soil layer up to a depth of 8 meters is dominated by clay and sand. A hard soil layer was discovered at a depth of ±10.5 meters, indicated by a resistivity value > 551  $\Omega\text{m}$  and a Standard Penetration Test (SPT) value reaching 50. Based on the Plaxis 2D geometric modeling for a planned 3-story building, the simulation of a borepile/precast deep foundation at a depth of 10.5 meters with an ultimate load of 800 kN yielded a Safety Factor (SF) of 10.441. This value is significantly higher than the minimum Indonesian National Standard (SNI) safe limit of 1.5, indicating that the foundation design at this depth is highly secure and suitable for application.

**Keywords:** Geotechnical Analysis, CPT, Geoelectrical Method, Plaxis 2D, Borepile Foundation, Coastal Soil.

### PENDAHULUAN

Secara umum, tanah merupakan material yang terbentuk dari agregat mineral padat akibat pelapukan batuan dan bahan organik, di mana ruang-ruang kosong di antara partikelnya terisi oleh zat cair dan gas. Dalam berbagai pekerjaan teknik sipil, tanah memegang peranan yang sangat vital karena berfungsi sebagai lapisan pendukung utama yang memikul seluruh beban struktur di atasnya, baik berupa beban mati, beban hidup, beban angin, maupun beban gempa. Namun, setiap lapisan tanah di permukaan bumi memiliki tingkat daya dukung yang bervariasi dan tidak selalu ideal untuk menanggung beban konstruksi. Oleh karena itu, diperlukan rekayasa geoteknik agar pekerjaan konstruksi infrastruktur seperti gedung, hotel, sekolah, jembatan, maupun bendungan—dapat dilaksanakan dengan aman dan stabil pada berbagai kondisi tanah.

Untuk mengantisipasi keterbatasan tersebut, investigasi atau penyelidikan tanah menjadi tahapan prakonstruksi yang mutlak dilakukan. Kegiatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik fisik dan mekanis tanah, mengetahui susunan stratigrafi (pelapisan tanah), serta menentukan kapasitas daya dukung tanah dasar di lokasi rencana pembangunan, seperti pada area konstruksi di Banjar Nyanyi, Desa Beraban, Kabupaten Tabanan. Pemahaman yang akurat terhadap parameter tanah memungkinkan perencana untuk mendesain struktur pondasi yang kokoh, tangguh terhadap potensi gempa, dan pada akhirnya mampu menjamin keselamatan serta kenyamanan pengguna bangunan.

Penyelidikan tanah menjadi tahap yang semakin krusial dalam perencanaan struktur bangunan,

khususnya di kawasan pesisir. Lapisan tanah di daerah pantai umumnya memiliki sifat lunak, jenuh air, dan berpotensi tinggi mengalami penurunan konsolidasi (Smith, M. J., 1984). Kondisi kritis ini menuntut adanya analisis geoteknik yang komprehensif dan mendetail untuk menjamin keandalan konstruksi. Oleh karena itu, penelitian di Pantai Nyanyi, Desa Beraban, Kabupaten Tabanan ini dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi stratigrafi bawah permukaan tanah serta mensimulasikan kapasitas daya dukung pondasi secara presisi melalui integrasi metode geofisika geolistrik dan analisis numerik menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D (Karmadi, 2021).

### **Teori Mekanika Tanah dan Daya Dukung Pondasi**

Tanah merupakan material yang terdiri dari agregat mineral padat, air, dan udara yang membentuk sistem tiga fase yang kompleks dan berpengaruh terhadap sifat mekanik tanah. Parameter penting dalam analisis geoteknik meliputi kohesi ( $c$ ), sudut geser dalam ( $\phi$ ), berat volume ( $\gamma$ ), serta modulus elastisitas ( $E$ ) yang menentukan kemampuan tanah dalam menahan beban struktur di atasnya (Smith, 1984; Das, 2010). Daya dukung tanah merupakan kemampuan tanah untuk menahan beban tanpa mengalami keruntuhan geser atau deformasi berlebihan. Menurut Bowles (1996), daya dukung tanah dipengaruhi oleh jenis tanah, kedalaman pondasi, serta kondisi muka air tanah. Tanah dengan nilai penetrasi tinggi (SPT > 50) atau resistivitas tinggi umumnya menunjukkan lapisan tanah keras yang mampu menopang struktur bangunan.

### **Metode Geolistrik dalam Investigasi Geoteknik**

Metode geolistrik resistivitas merupakan metode geofisika yang digunakan untuk mengukur tahanan jenis batuan dengan cara menginjeksikan arus listrik ke dalam tanah dan mengukur beda potensial yang dihasilkan. Nilai resistivitas dipengaruhi oleh jenis batuan, porositas, kadar air, dan kandungan mineral (Telford et al., 1990). Metode ini banyak digunakan dalam investigasi geoteknik untuk menentukan kedalaman batuan dasar, mengidentifikasi lapisan tanah lunak dan keras, menentukan zona akuifer, serta mengetahui struktur bawah permukaan tanah. Menurut Wasposito (2011), metode geolistrik memiliki keunggulan dalam investigasi area luas, non-destruktif, dan efisien dibandingkan metode boring konvensional. Namun, interpretasi data resistivitas memerlukan korelasi dengan data geoteknik seperti CPT atau SPT untuk meningkatkan akurasi.

### **Perbandingan Metode Geolistrik dengan Metode Investigasi Tanah Lain**

Metode investigasi tanah terdiri dari metode langsung seperti Standard Penetration Test (SPT), Cone Penetration Test (CPT/Sondir), dan boring, serta metode tidak langsung seperti geolistrik resistivitas, seismik refraksi, dan Ground Penetrating Radar (GPR). Metode langsung memberikan data parameter tanah secara langsung tetapi memiliki keterbatasan cakupan area dan biaya tinggi (ASTM D3441-16). Metode geolistrik memiliki keunggulan dalam mendeteksi variasi resistivitas batuan yang berkaitan dengan kondisi geologi dan hidrogeologi (Reynolds, 1997). Metode seismik lebih efektif untuk menentukan kecepatan gelombang dan kedalaman batuan keras, sedangkan GPR memiliki resolusi tinggi pada kedalaman dangkal tetapi kurang efektif pada tanah jenuh air (Jol, 2009).

### **Analisis Geoteknik Menggunakan Metode Elemen Hingga (PLAXIS)**

PLAXIS merupakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga yang digunakan untuk analisis deformasi, stabilitas, dan daya dukung tanah. Metode ini memungkinkan simulasi interaksi antara tanah dan struktur secara numerik (Brinkgreve et al., 2018). Analisis menggunakan PLAXIS dapat digunakan untuk analisis penurunan pondasi, stabilitas lereng, deformasi tanah, dan faktor keamanan struktur. Analisis numerik menggunakan metode elemen hingga memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan metode analitik konvensional karena mempertimbangkan kondisi tanah secara non-linier.

## **METODE PENELITIAN**

### **Uji Lapangan**

#### **1. Pengujian Sondir (*Cone Penetration Test*)**

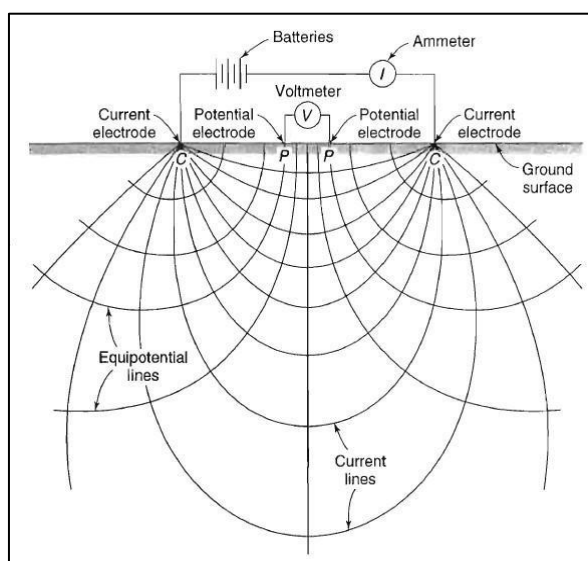
Pengambilan data daya dukung dan karakteristik tanah di lapangan pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode pengujian langsung berupa uji sondir atau *Cone Penetration Test* (CPT). Pengujian ini dilaksanakan di lokasi rencana pembangunan gedung yang terletak di kawasan Pantai Nyanyi, Desa Beraban, Kabupaten Tabanan. Pelaksanaan uji sondir ini merujuk pada standar pengujian penetrasi mekanis ASTM D3441-16.

Pengujian di lapangan dilakukan menggunakan alat sondir dengan kapasitas 2,50 tonf. Alat ditekan ke dalam tanah secara vertikal untuk mencatat nilai perlawanan konus dan hambatan lekat pada setiap interval kedalaman. Pengujian ini bertujuan untuk mengidentifikasi stratigrafi tanah bawah permukaan secara langsung, yang pada area penyelidikan didominasi oleh lapisan lempung dan pasir, serta untuk menemukan letak kedalaman lapisan pendukung (tanah keras). Data hasil uji sondir ini selanjutnya dikorelasikan dengan hasil uji geolistrik dan digunakan sebagai parameter dasar dalam mendesain pondasi serta pemodelan numerik menggunakan PLAXIS 2D.

Data perlawanan konus ( $q_c$ ) dan hambatan lekat ( $f_s$ ) yang diperoleh dari pengujian sondir kemudian dianalisis lebih lanjut untuk menentukan stratigrafi tanah menggunakan metode klasifikasi *Soil Behavior Type* (SBT). Penentuan SBT dilakukan dengan memplot nilai  $q_c$  dan rasio gesekan (*Friction Ratio*,  $R_f$ ) ke dalam grafik nomogram SBT standar. Pendekatan ini digunakan untuk mengestimasi jenis material tanah di bawah permukaan secara empiris pada setiap interval kedalaman tanpa memerlukan pengambilan sampel fisik.

## 2. Uji Geolistrik Resistivitas

Investigasi lapisan bawah permukaan tanah juga dilakukan menggunakan metode geofisika berupa uji geolistrik resistivitas. Pengukuran di lapangan dilakukan menggunakan alat *Geophysical Instrument SAZ-3000 Compact* dengan menerapkan konfigurasi elektroda Schlumberger untuk pemetaan vertikal (1D) dan Schlumberger-Wenner untuk pemetaan lateral (2D). Pengukuran ini dilakukan dengan menginjeksikan arus listrik ke dalam tanah dan mencatat beda potensial yang dihasilkan. Data resistivitas (tahanan jenis) batuan yang terukur kemudian diolah untuk mengidentifikasi keberadaan lapisan akuifer, zona tanah lunak, serta memvalidasi kedalaman lapisan tanah keras (cadas) yang diindikasikan dari hasil pengujian sondir. Prinsip pengukuran geolistrik dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Prinsip Pengukuran Geolistrik

(Sumber: dimodifikasi dari *Telford, W.M., Geldart, L.P., & Sheriff, R.E. (1990). Applied Geophysics, 2nd Edition. Cambridge University Press*)

## 3. Uji Laboratorium dan Penentuan Parameter Input

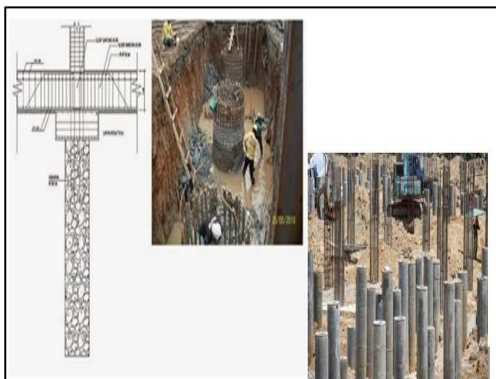
Untuk melengkapi data penyelidikan lapangan, pengujian laboratorium dan korelasi empiris dilakukan untuk mendapatkan parameter sifat fisik dan mekanis tanah. Parameter yang dianalisis meliputi berat volume kering ( $\gamma_{unsat}$ ), berat volume jenuh ( $\gamma_{sat}$ ), kohesi ( $c_u$ ), sudut geser dalam ( $\theta$ ), modulus elastisitas ( $E_{ref}$ ), dan angka Poisson ( $\nu$ ). Nilai-nilai parameter ini diklasifikasikan berdasarkan lapisan tanah dominan di lokasi (lempung dan pasir) pada kedalaman 0–8 meter, dan selanjutnya digunakan sebagai data input utama (parameter material) dalam simulasi elemen hingga. Berikut data Properties tanah untuk skenario simulasi perhitungan Plaxis dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Properties Tanah

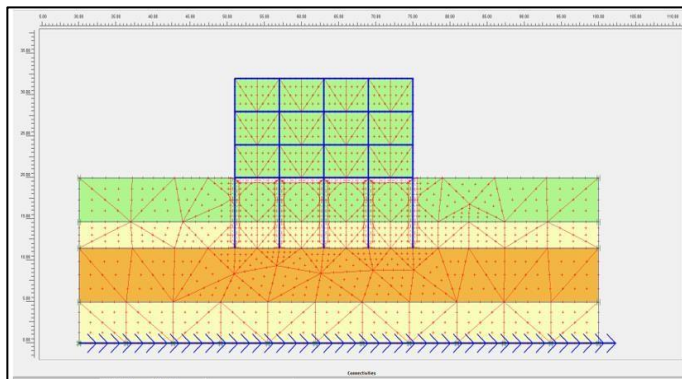
No.	Jenis Tanah	$\gamma_{unsat}$	$\gamma_{sat}$	$C_u$	$\theta$	$E_{ref}$	$\nu$	Kedalaman
1.	Lempung	0,03	19,31	11,50	48,40	3000	0,3	0-5
2.	Pasir	15,20	19,67	0,061	43,85	5000	0,3	6-8

#### 4. Pemodelan Numerik menggunakan PLAXIS 2D

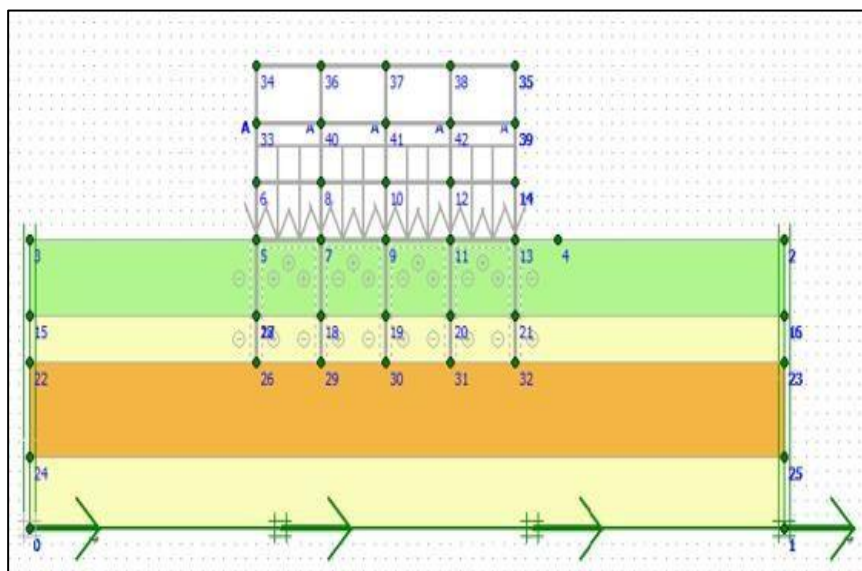
Analisis stabilitas dan daya dukung pondasi disimulasikan menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga, PLAXIS 2D. Pemodelan geometri dibuat untuk merepresentasikan rencana struktur bangunan gedung 3 lantai di atas profil tanah lokasi kajian. Simulasi menggunakan sistem pondasi dalam jenis *borepile* atau *precast* yang diposisikan hingga mencapai elevasi tanah keras. Elemen struktur atas dimodelkan dengan dimensi kolom 40 cm x 40 cm dan balok 35 cm x 35 cm. Pada simulasi ini, diaplikasikan pembebanan *ultimate* sebesar 800 kN dan daya dukung izin 400 kN. Evaluasi kestabilan dinilai dari hasil deformasi (penurunan) dan kalkulasi *Safety Factor* (SF), di mana desain dinyatakan aman dan layak diaplikasikan jika nilai SF melampaui batas minimal 1,5 sesuai standar SNI.



Gambar 2. Ilustrasi Pondasi dalam menggunakan *Borepile/Precast*



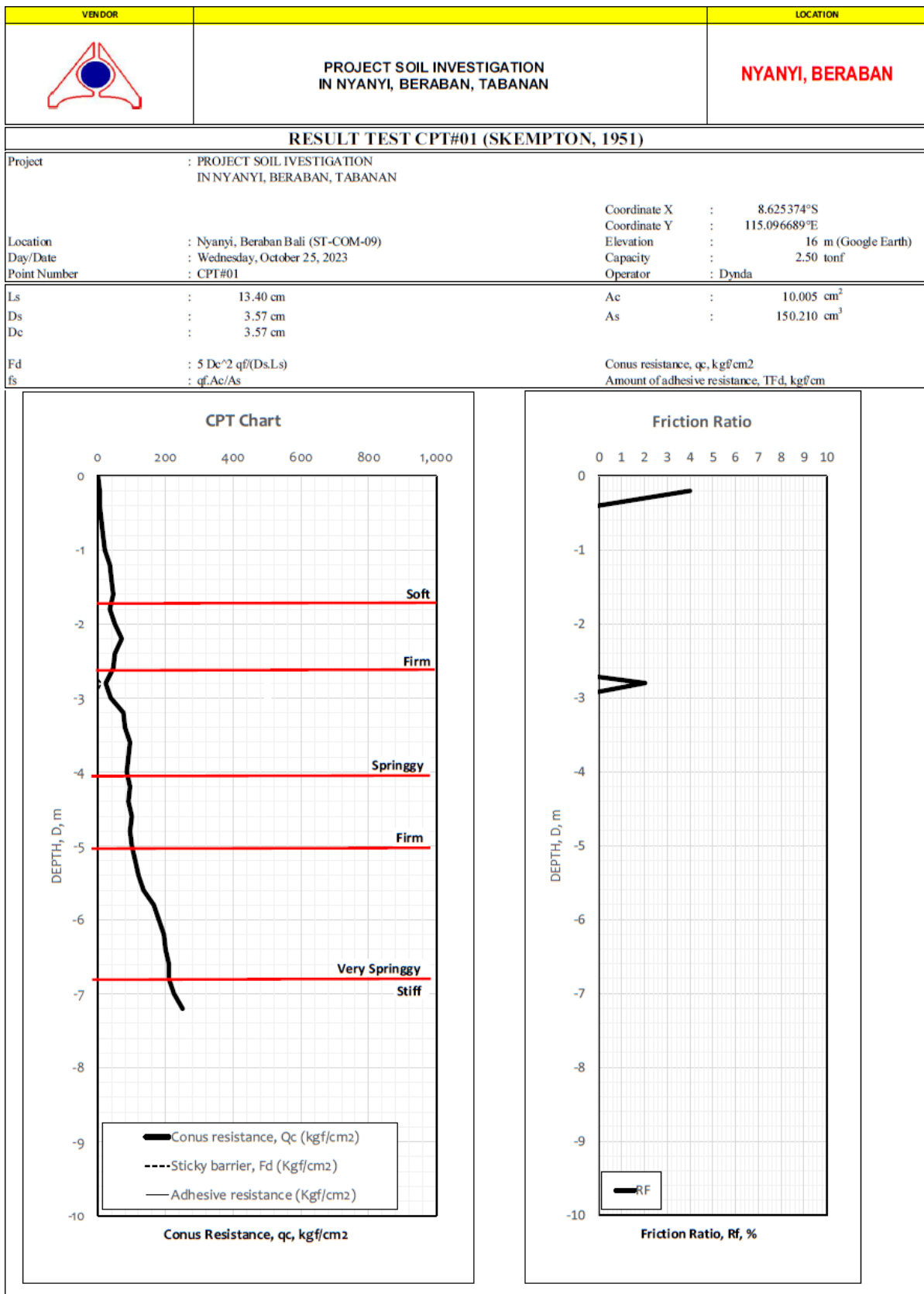
Gambar 3. *Connectivities Using generate Mesh*



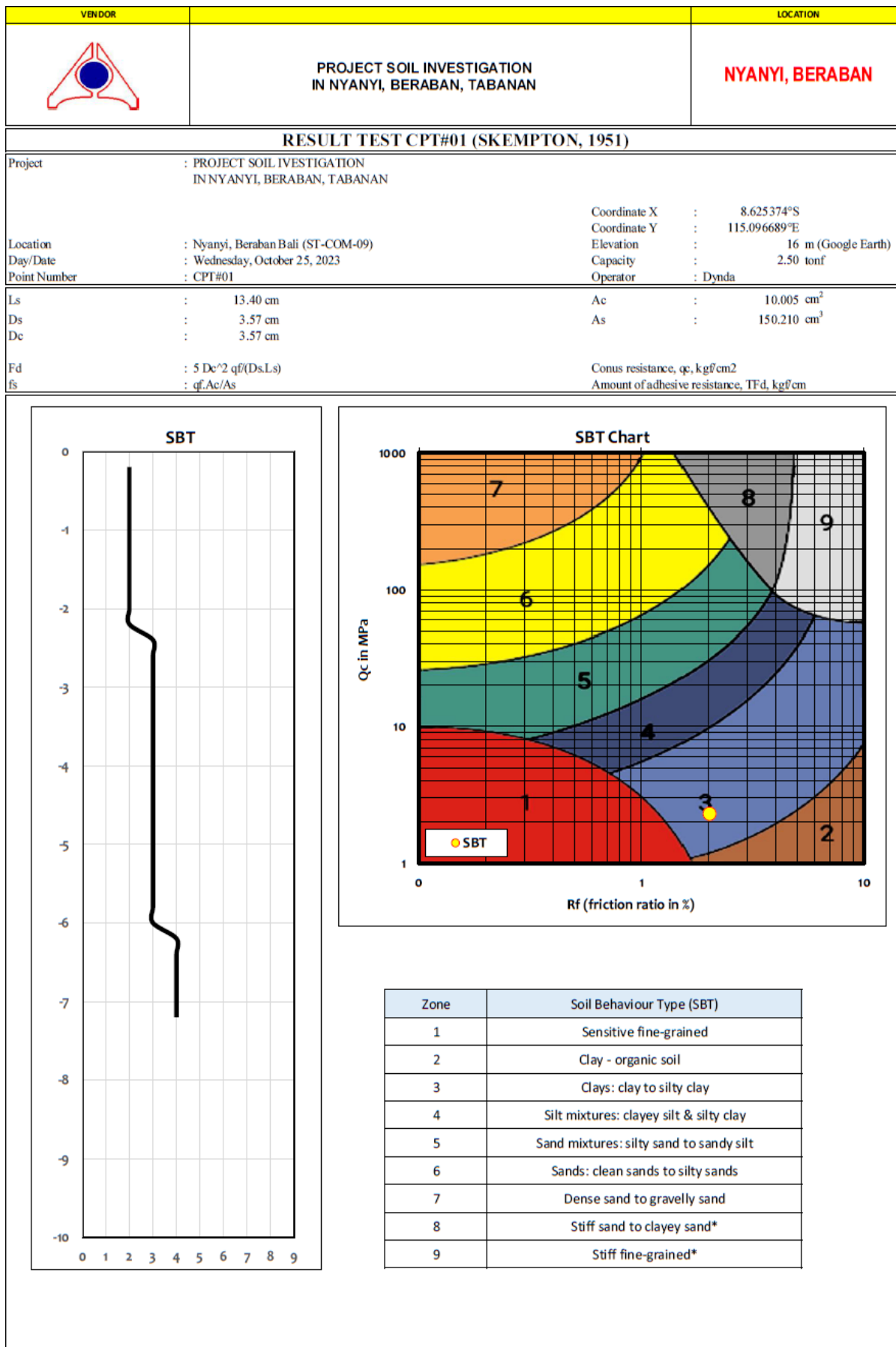
Gambar 4. Simulasi dengan lantai 3 dengan pembebanan 800 KN= 80 ton

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Hasil Uji Sondir (CPT)



Gambar 5. Grafik Hasil Pengujian *Cone Penetration Test* (CPT#01)



Gambar 6. Grafik Klasifikasi Soil Behavior Type (SBT)

### Interpretasi Hasil Uji Sondir dan Klasifikasi SBT

Berdasarkan grafik hasil pengujian *Cone Penetration Test* (CPT#01), profil daya dukung tanah di lokasi Pantai Nyanyi menunjukkan tren peningkatan seiring dengan bertambahnya kedalaman. Pada lapisan dangkal hingga kedalaman 6,8 meter, konsistensi tanah berada pada fase lunak (*soft*) hingga teguh (*firm*). Peningkatan drastis nilai perlawanan konus ( $q_c$ ) terjadi setelahnya, dan pengujian dihentikan pada kedalaman 7,20 meter karena nilai  $q_c$  telah menyentuh angka 250 kgf/cm<sup>2</sup> (batas kapasitas maksimal alat sondir 2,5 ton). Nilai ini mengindikasikan bahwa ujung konus telah mencapai lapisan tanah keras (*cadas*) sehingga tidak dapat berpenetrasi lebih dalam.

Untuk mengidentifikasi stratigrafi material secara empiris, data perlawanan konus dan rasio gesekan diplot ke dalam nomogram *Soil Behavior Type* (SBT). Titik sebaran data secara konsisten jatuh pada **Zona 3** (Lempung hingga lempung lanauan / *Clays: clay to silty clay*). Hal ini mengonfirmasi bahwa lapisan tanah di atas kedalaman 7,20-meter didominasi oleh material berbutir halus yang berkoheesi, sehingga memerlukan dukungan pondasi dalam untuk menembus lapisan lempung tersebut.

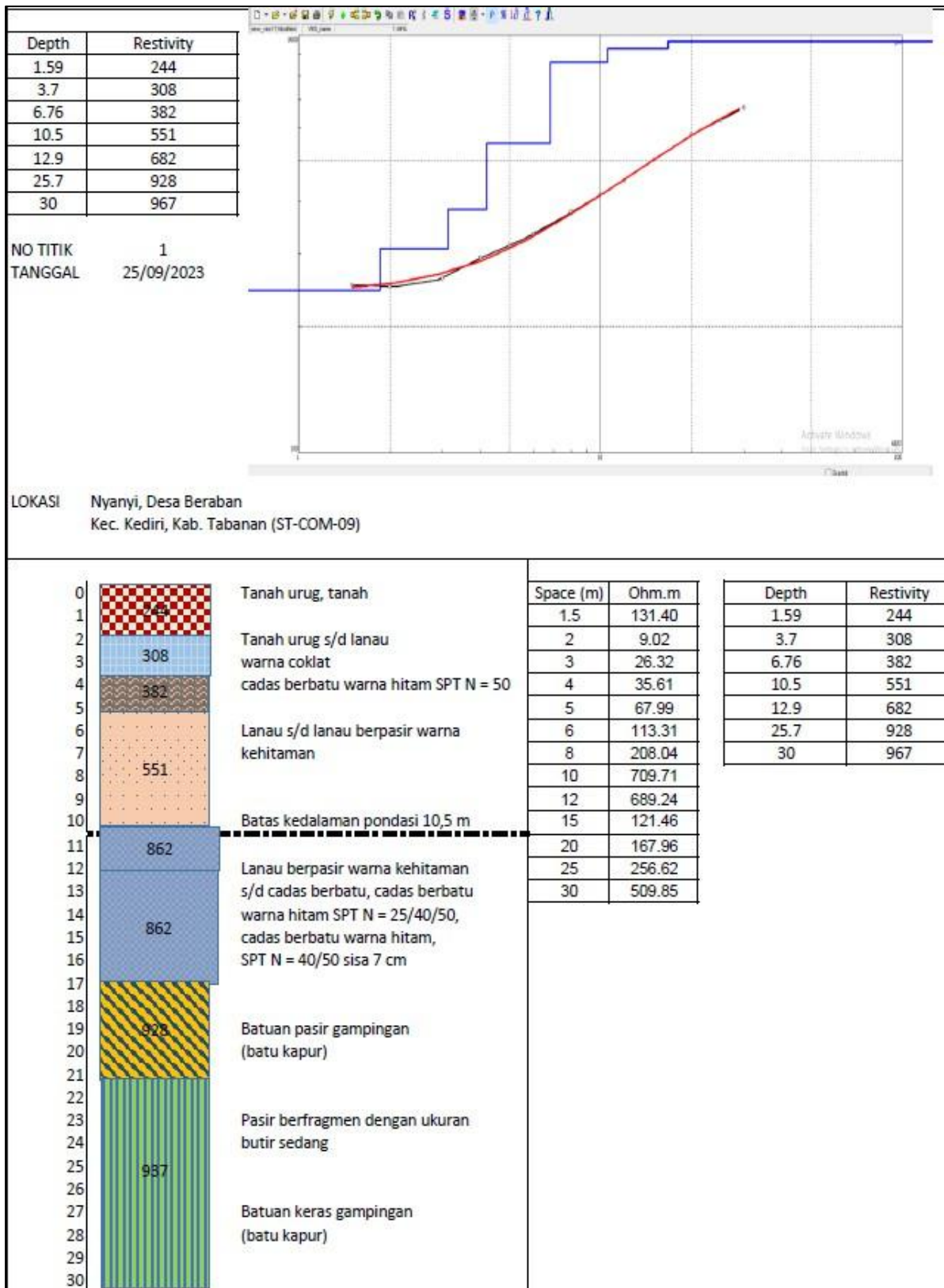
### 2. Hasil Uji Geolistrik 1D dan Korelasi SPT

Tabel 2. Data Hasil Pengukuran Geolistrik 1D (Konfigurasi Schlumberger)

Tanggal	: 25/09/2023	Koordinat	: S 88.625317°
Lokasi	: Bjr. Nyanyi Desa Beraban (ST-COM-09)		: E 115.096609°
		Elevasi	: 16 m
No. Titik duga	: 1	Cuaca	: Cerah
Arah	: Utara - Selatan		
Peralatan	: Geophysical Instrument	Operator	: Dimas
	SAZ-3000 Compact		

MN /2	0.5	5	10	25	V (m.V)	I (A)	(RHO) (Ohm.m)
AB/2							
1.5	6.28				49.90	2.385	131.40
2	11.78				66.53	86.874	9.02
3	27.48				99.79	104.172	26.32
4	49.46				133.06	184.823	35.61
5	77.72				166.32	190.131	67.99
6	112.26				199.58	197.727	113.31
8	200.18				266.11	256.064	208.04
10	313.22				332.64	146.805	709.71
12		37.37			399.17	21.642	689.24
15		62.8			498.96	257.976	121.46
20		117.75			665.28	466.389	167.96
25		188.4			831.60	610.533	256.62
30		274.75			997.92	537.768	509.85



Gambar 7. Kurva *Sounding* Geolistrik 1D dan Interpretasi Stratigrafi Tanah

**Interpretasi Hasil Uji Geolistrik 1D dan Korelasi Pengeboran (SPT)**

Pengambilan data geofisika 1D dilakukan untuk mengetahui detail perubahan lapisan tanah secara vertikal yang lebih dalam dari jangkauan alat sondir. Berdasarkan Gambar Z, interpretasi penampang stratigrafi hasil geolistrik yang dikorelasikan dengan data *Standard Penetration Test* (SPT) mengidentifikasi beberapa profil lapisan:

- a. Kedalaman 0 – 3,7-meter: Lapisan penutup berupa tanah urug hingga lanau dengan nilai resistivitas 244–308  $\Omega\text{m}$ .
- b. Kedalaman 3,7 – 6,76-meter: Sisipan cadas berbatu warna hitam (resistivitas 382  $\Omega\text{m}$ ), tervalidasi oleh nilai pukulan N-SPT mencapai 50.
- c. Kedalaman 6,76 – 10,5-meter: Lapisan kembali didominasi oleh lanau hingga lanau berpasir (resistivitas 551  $\Omega\text{m}$ ).
- d. Kedalaman > 10,5 meter: Terjadi lonjakan resistivitas yang sangat signifikan menjadi 862  $\Omega\text{m}$  hingga > 900  $\Omega\text{m}$ . Lapisan ini dideskripsikan sebagai cadas masif berbatu dan batuan pasir gampingan. Korelasi pengujian dinamis pada interval ini secara konsisten menunjukkan angka N-SPT > 50.

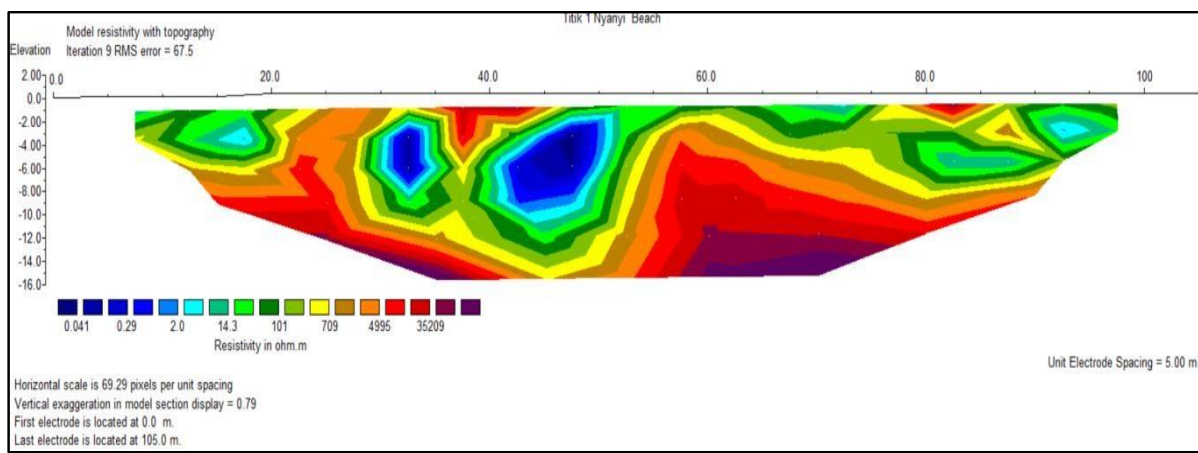
Berdasarkan tingginya nilai tahanan jenis (> 862  $\Omega\text{m}$ ) dan pukulan mutlak SPT (N=50) secara bersamaan, kedalaman 10,5-meter ditetapkan sebagai batas elevasi tanah keras yang paling stabil untuk letak tumpuan (*bearing stratum*) pondasi.

### 3. Hasil Uji Geolistrik 2D

Tabel 3. Data Akuisisi Geolistrik 2D

n	C1	P1	P2	C2	I (m-A)	V (m V)	R (Ohm)	K	RHO (Ohm-m)
1	0	5	10	15	327	74.2	0.227	31.4	7.13
2	0	10	20	30	93	70	0.753	62.8	47.27
3	0	15	30	45	20.3	23.30	1.148	94.2	108.12
4	0	20	40	60	10.3	14.8	1.437	125.6	180.47
5	0	25	50	75	3.5	19.5	5.571	157	874.71
6	0	30	60	90	327	74.2	0.227	188.4	42.75
1	5	10	15	20	93	70	0.753	31.4	23.63
2	5	15	25	35	20.3	23.30	1.148	62.8	72.08
3	5	20	35	50	10.3	14.8	1.437	94.2	135.36
4	5	25	45	65	3.5	19.5	5.571	125.6	699.77
5	5	30	55	80	327	74.2	0.227	157	35.63
6	5	35	65	95	93	70	0.753	188.4	141.81
1	10	15	20	25	20.3	23.30	1.148	31.4	36.04
2	10	20	30	40	10.3	14.8	1.437	62.8	90.24
3	10	25	40	55	3.5	19.5	5.571	94.2	524.83
4	10	30	50	70	327	74.2	0.227	125.6	28.50
5	10	35	60	85	93	70	0.753	157	118.17
6	10	40	70	100	20.3	23.30	1.148	188.4	216.24
1	15	20	25	30	10.3	14.8	1.437	31.4	45.12
2	15	25	35	45	3.5	19.5	5.571	62.8	349.89
3	15	30	45	60	327	74.2	0.227	94.2	21.38
4	15	35	55	75	93	70	0.753	125.6	94.54
5	15	40	65	90	20.3	23.30	1.148	157	180.20
6	15	45	75	105	10.3	14.8	1.437	188.4	270.71
1	20	25	30	35	3.5	19.5	5.571	31.4	174.94
2	20	30	40	50	327	74.2	0.227	62.8	14.25
3	20	35	50	65	93	70	0.753	94.2	70.90
4	20	40	60	80	20.3	23.30	1.148	125.6	144.16
5	20	45	70	95	10.3	14.8	1.437	157	225.59
1	25	30	35	40	3.5	19.5	5.571	31.4	174.94
2	25	35	45	55	327	74.2	0.227	62.8	14.25
3	25	40	55	70	93	70	0.753	94.2	70.90
4	25	45	65	85	20.3	23.30	1.148	125.6	144.16

n	C1	P1	P2	C2	I (m-A)	V (m V)	R (Ohm)	K	RHO (Ohm-m)
5	25	50	75	100	10.3	14.8	1.437	157	225.59
1	30	35	40	45	3.5	19.5	5.571	31.4	174.94
2	30	40	50	60	327	74.2	0.227	62.8	14.25
3	30	45	60	75	93	70	0.753	94.2	70.90
4	30	50	70	90	20.3	23.30	1.148	125.6	144.16
5	30	55	80	105	10.3	14.8	1.437	157	225.59
1	35	40	45	50	3.5	19.5	5.571	31.4	174.94
2	35	45	55	65	327	74.2	0.227	62.8	14.25
3	35	50	65	80	93	70	0.753	94.2	70.90
4	35	55	75	95	20.3	23.30	1.148	125.6	144.16
1	40	45	50	55	10.3	14.8	1.437	31.4	45.12
2	40	50	60	70	3.5	19.5	5.571	62.8	349.89
3	40	55	70	85	327	74.2	0.227	94.2	21.38
4	40	60	80	100	93	70	0.753	125.6	94.54
1	45	50	55	60	20.3	23.30	1.148	31.4	36.04
2	45	55	65	75	10.3	14.8	1.437	62.8	90.24
3	45	60	75	90	3.5	19.5	5.571	94.2	524.83



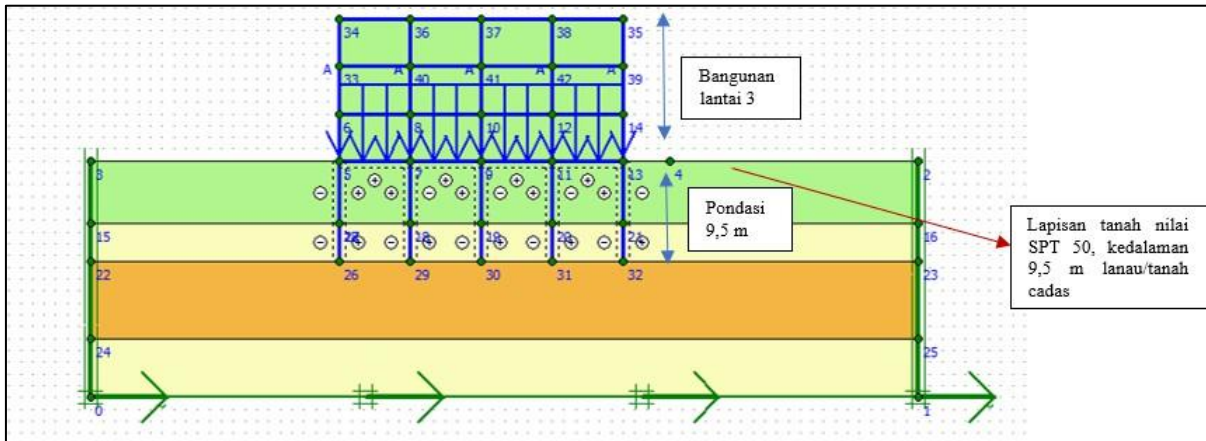
Gambar 8. Penampang Resistivitas 2D (Metode Schlumberger-Wenner)

**Interpretasi Penampang Geolistrik 2D**

Validasi kondisi bawah permukaan secara lateral dilakukan dengan mengintegrasikan hasil pemodelan 2D. Jika data 1D memberikan resolusi vertikal yang detail pada titik duga, maka penampang 2D memberikan gambaran kemenerusan lapisan keras di sepanjang lintasan 105 meter. Berdasarkan penampang resistivitas 2D, terlihat adanya anomali resistivitas tinggi (> 709 Ωm hingga > 4995 Ωm) yang ditunjukkan oleh zona berwarna merah hingga ungu pada kedalaman di atas 10 meter. Anomali ini mengonfirmasi bahwa lapisan pendukung pondasi (cadas/gamping) yang ditemukan pada uji 1D merupakan hamparan batuan masif yang menerus secara luas di seluruh area tapak bangunan, bukan sekadar lensa batuan terfragmentasi.

Keseluruhan hasil uji lapangan (Sondir, SPT, dan Geolistrik) secara konsisten merujuk pada kedalaman 10,5 meter sebagai elevasi tanah keras. Parameter properti tanah dari kedalaman 0 hingga 10,5 meter inilah yang kemudian digunakan sebagai input dasar dalam simulasi numerik perancangan pondasi tiang bor (*borepile*) menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D.

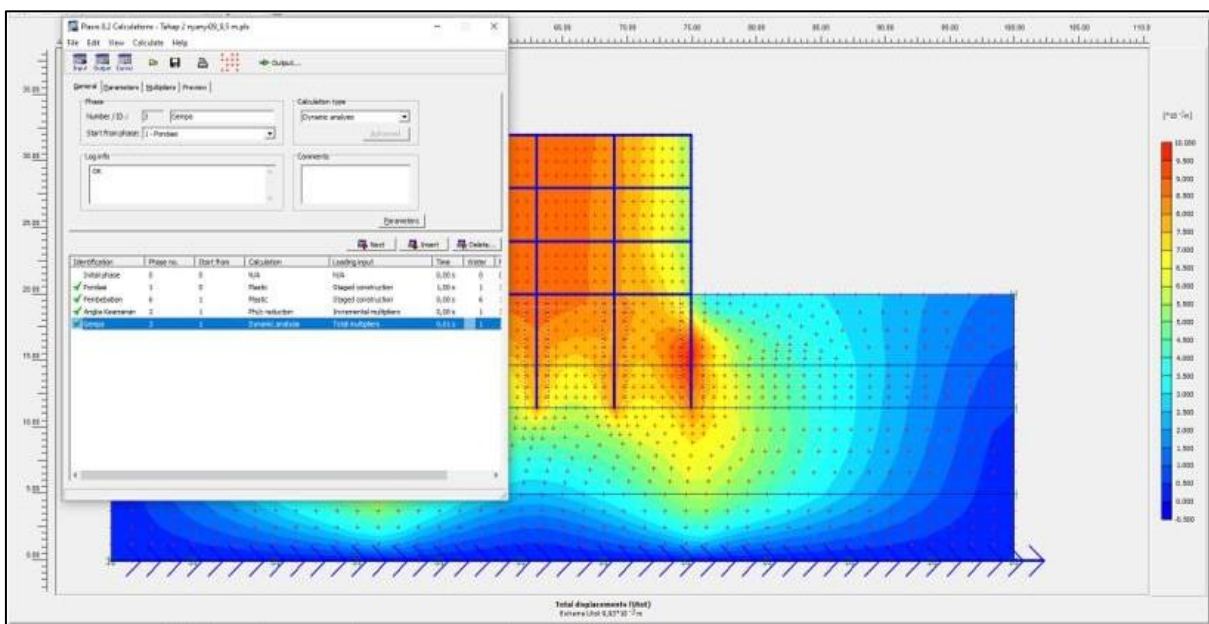
#### 4. Pemodelan Plaxis



Gambar 9. Pemodelan Geometri dan Struktur Pondasi pada Plaxis 2D

#### Analisis Geometri dan Pemodelan Struktur

Pemodelan numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D untuk mensimulasikan perilaku interaksi antara struktur bangunan gedung 3 lantai dengan kondisi tanah di lokasi Pantai Nyanyi. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar A, geometri model disusun secara dua dimensi dengan merepresentasikan lapisan tanah berdasarkan data stratigrafi lapangan. Struktur pondasi dalam (*borepile*) dimodelkan menembus lapisan tanah lunak di bagian atas dan berakhir pada elevasi kedalaman 9,5 meter. Kedalaman ujung pondasi ini dipilih karena letaknya bertumpu tepat pada lapisan *bearing stratum* (lanau/tanah cadas) yang telah divalidasi memiliki daya dukung sangat tinggi dengan nilai N-SPT 50



Gambar 10. Visualisasi *Output* Kalkulasi Deformasi Total pada Plaxis 2D

#### Analisis Pembebanan dan Deformasi (*Total Displacements*)

Setelah tahapan pemodelan geometri dan pendefinisian parameter material selesai, simulasi dijalankan melalui beberapa fase kalkulasi, yang meliputi fase instalasi pondasi, pembebanan struktur statis, penentuan angka keamanan, hingga simulasi dinamis (gempa) sebagaimana terlihat pada jendela kalkulasi. Gambar B menampilkan kontur *Total Displacements* (deformasi total) pada tanah akibat aplikasi beban *ultimate* dari struktur sebesar 800 kN dan dengan asumsi muka air tanah berada pada kedalaman -5 meter.

Visualisasi gradasi warna menunjukkan bahwa konsentrasi deformasi terbesar (ditandai dengan

area berwarna merah dan kuning) terlokalisasi dengan baik pada area di bawah pelat lantai dan ujung tiang pondasi. Transfer beban dari struktur atas mampu didistribusikan secara efektif oleh pondasi tiang ke lapisan tanah keras cadas di kedalaman 9,5 meter. Berdasarkan hasil keluaran (*output*) program, nilai deformasi yang terjadi sangat kecil (di bawah batas toleransi SNI) dan simulasi menghasilkan nilai Faktor Keamanan (SF) sebesar 10,441. Nilai ini jauh melampaui batas aman minimum yang disyaratkan ( $SF > 1,5$ ), sehingga desain struktur pondasi ini dinyatakan sangat stabil dan aman.

## SIMPULAN

Berdasarkan hasil rangkaian investigasi geoteknik lapangan (Sondir, Geolistrik, dan SPT) serta analisis numerik yang telah dilakukan pada rencana pembangunan gedung di Pantai Nyanyi, Desa Beraban, Kabupaten Tabanan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kondisi Stratigrafi Dangkal: Berdasarkan hasil pengujian *Cone Penetration Test* (CPT) dan klasifikasi *Soil Behavior Type* (SBT), lapisan tanah dari permukaan hingga kedalaman sekitar 7,20 meter didominasi oleh material berbutir halus (lempung hingga lempung lanauan). Lapisan ini memiliki daya dukung yang relatif lunak hingga teguh, sebelum akhirnya alat sondir mencapai batas kapasitas maksimalnya ( $q_c = 250 \text{ kgf/cm}^2$ ) di kedalaman 7,20 meter akibat benturan dengan lapisan yang lebih keras.
2. Elevasi Tanah Pendukung (Cadas): Korelasi antara data Geolistrik (1D dan 2D) dengan pengujian *Standard Penetration Test* (SPT) mengonfirmasi bahwa hamparan lapisan tanah pendukung utama yang sangat keras (berupa cadas dan batuan pasir gampingan) terletak pada kedalaman 9,5 meter. Hal ini dibuktikan oleh lonjakan nilai tahanan jenis batuan (resistivitas  $> 862 \Omega\text{m}$ ) yang diikuti dengan nilai pukulan mutlak N-SPT mencapai 50.
3. Kinerja Deformasi Pondasi: Pemodelan numerik menggunakan PLAXIS 2D untuk desain pondasi dalam (*borepile*) pada elevasi kedalaman 9,5 meter dengan pembebanan *ultimate* sebesar 800 kN (gedung 3 lantai) menunjukkan kinerja yang sangat baik. Nilai deformasi vertikal tercatat sebesar 0,092 mm dan deformasi horizontal sebesar 0,002 mm. Kedua nilai tersebut sangat kecil dan berada jauh di bawah ambang batas penurunan yang diizinkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI).
4. Faktor Keamanan (*Safety Factor*): Hasil kalkulasi stabilitas struktur terhadap keruntuhan menghasilkan nilai Faktor Keamanan (SF) sebesar 10,441. Nilai tersebut secara signifikan melampaui standar batas aman minimal SNI ( $SF > 1,5$ ).
5. Rekomendasi Akhir: Secara keseluruhan, letak tumpuan pondasi dalam pada kedalaman 9,5-meter terbukti sangat stabil, efektif mendistribusikan beban, dan sangat layak secara teknis untuk diaplikasikan pada konstruksi bangunan di lokasi tersebut guna mencegah risiko penurunan konsolidasi dan kegagalan struktur.

## DAFTAR PUSTAKA

- ASTM D3441-16. Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Tests of Soil (CPT). ASTM International.
- Junita Elsa Mayori,dkk., 2023 Pemetaan Potensi Air Tanah Menggunakan Metode Geolistrik Resistivitas 1-D di Desa Rasabou, Kecamatan Hu'u, Kabupaten Dompu
- Karmadi, 2021. *Study of Groundwater and Intrusion Zonation Conservation in North Bali Sea Jol*, H.M. (2009). *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier, Amsterdam.
- Nurdiyanto,Boko.2003.,Analisis Data Magnetik untuk Mengetahui Struktur Bawah Permukaan Daerah Manifestasi Air Panas Di Lereng Utara Gunungapi Ungaran
- Smith, M. J. Mekanika Tanah, 1984, Erlangga, Jakarta.
- Santoso, D., & Suyanto, A. (2018). Penerapan Metode Geolistrik Tahanan Jenis untuk Identifikasi Struktur Tanah. *Jurnal Geoteknik Indonesia*, 5(2), 77–84.
- Reynolds, J.M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley, New York.
- Susilo, A., & Saptadji, N.M. (2019). Aplikasi Metode Geolistrik Resistivitas untuk Eksplorasi Awal Lapangan Panas Bumi di Indonesia. *Jurnal Energi dan Geoteknik*, 6(1), 45–53.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., & Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics, 2nd Edition*. Cambridge University Press.
- Wasposito, Nurhidayah. (2011). *Metode Geolistrik untuk Investigasi Geoteknik*. Penerbit Teknik Geofisika, Yogyakarta.