EVALUASI DAYA DUKUNG LAPANGAN TERHADAP DAYA DUKUNG DESAIN PONDASI TIANG PANCANG DI PROYEK GARDU INDUK AMBAWANG KABUPATEN KUBU RAYA KALIMANTAN BARAT

Tugas Akhir ini dibuat untuk memenuhi kelulusan

Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Darul Ulum Islamic Centre Sudirman GUPPI Undaris

Disusun oleh:

Bimo Satrio Pamuntcak 24210016

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIKUNIVERSITAS DARUL ULUM ISLAMIC CENTRE SUDIRMAN GUPPI

UNGARAN 2026

UNIVERSITAS DARUL ULUM ISLAMIC CENTRE SUDIRMAN GUPPI (UNDARIS)
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Bimo Satrio Pamuntcak (24210016)

Judul Penelitian : Evaluasi Daya Dukung Lapangan Terhadap Daya Dukung Desain Pondasi Tiang Pancang di Proyek Gardu Induk Ambawang Kabupaten Kubu Raya, Kalimantan Barat

Dosen Pembimbing : 1. Ir.Agung Hari Wibowo, SIP. S.T., M.T.
2. Dirga Asmara Putra, S.T., M.T.

NO	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
1.	Rabu, 15 Juli 2026	- Rumusan masalah yang di pakai hanya 3 yang atas dan yang dibawah diganti ke 1.2 Rumusan Masalah. - Tujuan Penelitian disesuaikan - Pada Batasan Masalah ditambahi poin "7. Perhitungan Kalendering menggunakan Metode Hilley dan ENR". - Di akhir BAB II ditambahkan kerangka berfikir penelitian. - Pada Diagram Alir Penelitian ditambahkan Penentuan Qall e rata-rata.	
2.	Sabtu, 01 Agustus 2026	- Perkuat setiap argumen yang ada di BAB I dengan data atau referensi terkait – - BAB 2 adalah landasan teori, jadi gunakan sumber yang kuat, untuk kemudian dituangkan di daftar pustaka. - Daya Dukung Rencana adalah dari Data Sondir (Metode Bagemann, Mayerhoff, Schmertmann) dan Data SPT (Metode Mayerhoff, serta tambahkan 1 metode lainnya). Sementara Daya dukung aktual lapangan adalah dari Data Kalendering (Metode Hilley, dan Metode ENR).	

NO	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
		- Baik Daya Dukung Rencana maupun Daya Dukung Aktual Lapangan, digunakan daya dukung rata-rata - Perbaiki sesuai Catatan - Tambahkan Daftar Pustaka	
3.	Rabu, 12 Agustus 2026	Silahkan lanjut Bab IV: 4.1 Hasil dan Intrepretasi Data Tanah 4.1.1 Data SPT 4.1.2 Data Sondir 4.2 Pondasi Tiang yang Digunakan di Proyek Gardu Induk 4.2.1 Dimensi Tiang, Mutu Beton, Jarak Workshop dengan Site, Mobilisasi 4.2.2 Konfigurasi Tiang pada Pile Cap yang Ditinjau 4.2.3 Perhitungan Efisiensi Kelompok Tiang = Gunakan Rumus Converse-Labare, dan Rumus Los Angeles (pilih angka paling kecil, untuk digunakan dalam perhitungan Daya Dukung Ijin nantinya) 4.3 Perhitungan Daya Dukung dari Data SPT (Gunakan Metode seperti di Bab 2) 4.4 Perhitungan Daya Dukung dari Data Sondir/CPT (Gunakan Metode seperti di Bab 2) 4.5 Daya Dukung Ijin Rencana (Rata-rata dari SPT dan CPT) 4.6 Daya Dukung Hasil Kalendering (semakin banyak sample semakin bagus, hasilnya nanti di rata-rata). Gunakan metode Hilley dan ENR 4.7 Daya Dukung Lapangan (Rata-rtaa hasil kalendering metode ENR dan Hilley) 4.8 Evaluasi/Analisis dibandingkan	
4.	Senin 24 Agustus 2026	- Cek Kembali Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian - Untuk CPT, di gambar tersebut dicantumkan perhitungan menggunakan 3 Rumus: Mayerhoff, Bagemaan, dan Schemrtmann. Tolong Bab IV disesuaikan dengan ini. - Untuk SPT, di gambar yang sama dicantumkan perhitungan menggunakan 2 Rumus: Meyerhoff dan Lauciano Decourt. Tolong pula Bab IV disesuaikan	

LEMBAR PERSETUJUAN

EVALUASI DAYA DUKUNG LAPANGAN TERHADAP DAYA DUKUNG DESAIN PONDASI TIANG PANCANG DI PROYEK GARDU INDUK AMBAWANG KABUPATEN KUBU RAYA KALIMANTAN BARAT

Disusun Oleh :

Bimo Satrio Pamuntcak (24210016)

Tugas Akhir ini telah disetujui untuk dipertahankan di hadapan Tim Penguji

Progam Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik UNDARIS

Diperiksa dan Disetujui

Pembimbing I	Pembimbing II
Ir.Agung Hari W, SIP. S.T., M.T.	**Dirga Asmara Putra, S.T., M.T.**
NIDN. 0604089203	**NUPTK. 4142774675130293**

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Kami yang bertanda tangan dibawah ini:

1. Nama : Bimo Satrio Pamuntcak

   NIM : 24210016

   Judul : Evaluasi Daya Dukung Lapangan Terhadap Daya Dukung Desain Pondasi Tiang Pancang di Proyek Gardu Induk Ambawang, Kabupaten Kubu Raya, Kalimantan Barat

Menyatakan bahwa naskah Tugas Akhir ini secara keseluruhan adalah hasil penelitian atau karya sendiri, kecuali pada bagian-bagian yang dirujuk sumbernya.

Ungaran, 13 Oktober 2026

Yang membuat pernyataan

Penyusun



Bimo Satrio Pamuntcak

NIM. 24210016

LEMBAR PENGESAHAN

EVALUASI DAYA DUKUNG LAPANGAN TERHADAP DAYA DUKUNG DESAIN PONDASI TIANG PANCANG DI PROYEK GARDU INDUK AMBAWANG KABUPATEN KUBU RAYA KALIMANTAN BARAT

Disusun Oleh :

Bimo Satrio Pamuntcak (24210016)

Dipertahankan di depan Tim Penguji pada Tanggal:

14 Oktober 2026

Tugas Akhir ini telah diterima sebagai salah satu prasyarat untuk memperoleh gelar sarjana Teknik Sipil pada Program Teknik Sipil Fakultas Teknik UNDARIS

Tim Penguji

Ketua : Tenardhy Aryarama Wijaya, S.ST., M.Eng ( )

Anggota : Ir. Agung Hari Wibowo, SIP, S.T., M.T ( )

Anggota : Dirga Asmara Putra, S.T., M.T. ( )

Mengetahui

Ketua Program Studi Teknik Sipil

Fakultas Teknik UNDARIS

Ir. Agung Hari Wibowo, SIP., S.T., M.T

NIDN. 0604089203

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **"Evaluasi Daya Dukung Lapangan terhadap Daya Dukung Desain Pondasi Tiang Pancang di Proyek Gardu Induk Ambawang, Kabupaten Kubu Raya, Kalimantan Barat"**. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi syarat kelulusan pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Darul Ulum Islamic Centre Sudirman GUPPI (UNDARIS), Ungaran.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini dapat diselesaikan berkat bantuan, bimbingan, dan dukungan dari banyak pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Hj. Ida Zahara Adibah,M.S.I., selaku Rektor Universitas Darul Ulum Islamic Centre Sudirman GUPPI (UNDARIS).
2. Bapak Abdullah, S.T., M,T., selaku Dekan Fakultas Teknik UNDARIS.
3. Bapak Ir. Agung Hari Wibowo, SIP. S.T., M.T., selaku Kepala Program Studi Teknik Sipil UNDARIS.
4. Bapak Ir. Agung Hari Wibowo, SIP. S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I, yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan arahan dan koreksi selama penyusunan Tugas Akhir ini.
5. Bapak Dirga Asmara Putra, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II, atas bimbingan dan masukan yang sangat berarti.
6. Seluruh dosen dan staf Program Studi Teknik Sipil UNDARIS yang telah membekali penulis dengan ilmu selama masa perkuliahan.

7. Pihak PT PLN (Persero), PT Hasta Karya KSO Indisi, dan seluruh pihak proyek Gardu Induk 150 kV Ambawang New yang telah menyediakan data penyelidikan tanah dan data kalendering.
8. Orang tua dan keluarga tercinta atas doa, kasih sayang, dan dukungan yang tidak pernah putus.
9. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Sipil dan semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan di masa mendatang. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi pembaca, khususnya dalam bidang geoteknik dan perencanaan pondasi tiang pancang.

Ungaran, 13 Oktober 2026

Penulis

Bimo Satrio Pamuntcak

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR vi
DAFTAR ISI ix
DAFTAR GAMBAR xiii
DAFTAR TABEL xiv
DAFTAR ISTILAH xv
ABSTRAK xix
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 4
1.4 Manfaat Penelitian 4
1.5 Batasan Masalah 5
1.6 Lokasi penelitian 6
1.7 Sistematika Penulisan 6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 8
2.1 Tinjauan Umum 8
2.2 Tanah 11
2.2.1 Klasifikasi Tanah 11
2.2.2 Sifat Fisik Tanah (Index Properties) 14
2.2.3 Sifat Mekanik Tanah 14
2.3 Penyelidikan Tanah 15
2.3.1 Standart Penetration Test (SPT) 16

2.3.2 Sondir (Cone Penetration Test/CPT) 16
2.3.3 Uji Laboratorium Mekanika Tanah 17
2.4 Pondasi 18
2.4.1 Pondasi Tiang Pancang 19
2.4.2 Kriteria Pemilihan Pondasi Tiang Pancang 19
2.5 Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang 19
2.5.1 Daya Dukung Ujung Tiang (*Point Bearing Capacity*) 20
2.5.2 Daya Dukung Selimut Tiang (*Skin Friction*) 20
2.5.3 Daya Dukung Ijin Tiang 20
2.6 Metode Perhitungan Daya Dukung Tiang Berdasarkan Data Sondir 21
2.6.1 Metode Meyerhof 21
2.6.2 Metode Bagemann 21
2.6.3 Metode Schmertmann 22
2.7 Metode Perhitungan Daya Dukung Tiang Berdasarkan Data SPT 22
2.7.1 Metode Meyerhof (1976) 22
2.7.2 Metode Luciano Decourt 23
2.8 Analisis Daya Dukung Dinamis Berdasarkan Hasil Kalendering 24
2.8.1 Metode Hiley 24
2.8.2 Metode Engineering News Record (ENR) 24
BAB III METODELOGI PENELITIAN 26
3.1 Umum 26
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian 26
3.3 Jenis dan Sumber Data 26
3.3.1 Data Primer 26

3.3.2 Data Sekunder 26
3.4 Metode Pengumpulan Data 27
3.4.1 Data Penyelidian Tanah (*Boring*/SPT) 27
3.4.2 Data Sondir(CPT) 27
3.4.3 Data Hasil Uji Laboratorium 27
3.4.4 Data Desain Pondasi Tiang Pancang Eksisting 27
3.5 Tahapan Analisis Data 28
3.5.1 Analisis Daya Dukung Perencanaan (Data Sondir) 28
3.5.2 Analisis Daya Dukung Lapangan (Data Kalendering) 28
3.5.3 Evaluasi Perbandingan Daya Dukung Lapangan terhadap Daya Dukung Perencanaan 29
3.6 Diagram Alir (Flowchart) Penelitian 29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 31
4.1 Hasil dan Interpretasi Data Tanah 31
4.1.1 Data SPT (Standard Penetration Test) 31
4.1.2 Data Sondir (Cone Penetration Test / CPT) 32
4.2 Pondasi Tiang yang Digunakan di Proyek Gardu Induk Ambawang 36
4.2.1 Dimensi Tiang, Mutu Beton, Jarak *Workshop* dengan *Site*, dan *Mobilisasi* 38
4.2.2 Konfigurasi Tiang pada Pile Cap yang Ditinjau 39
4.2.3 Perhitungan Efisiensi Kelompok Tiang (E$\boldsymbol{g}$) 40
4.3 Perhitungan Daya Dukung dari Data Sondir/SPT 41
4.3.1 Metode Meyerhof (1976) 42
4.3.2 Metode Luciano Decourt (1982) 42
4.3.3 Daya Dukung Izin Rata-Rata SPT 43

4.4 Perhitungan Daya Dukung dari Data Sondir/CPT 43
4.4.1 Metode Meyerhof (1956) 43
4.4.2 Metode Bagemann (1965) 44
4.4.3 Metode Schmertmann-Nottingham (1978) 44
4.4.4 Daya Dukung Izin Rata-Rata CPT 44
4.5 Daya Dukung Ijin Rencana ($\boldsymbol{Q}$all, Rencana) 44
4.5.1 Daya Dukung Ijin Rencana Tiang Tunggal ($\boldsymbol{Q}$all, Rencana) 45
4.5.2 Efisiensi Kelompok Tiang dan Daya Dukung Kelompok ($\boldsymbol{Qg}$,all) 46
4.6 Daya Dukung Hasil Kalendering 46
4.6.1 Formula Dinamis Pemancangan 47
4.7 Daya Dukung Lapangan ($\boldsymbol{Q}$all, Lapangan) 49
4.7.1 Analisis Integritas dan Nilai Rata-Rata Tiang Pancang Tunggal 49
4.7.2 Perhitungan Daya Dukung Kelompok Tiang Aktual ($\boldsymbol{Qg}$,aktual) 50
4.8 Evaluasi dan Analisis Perbandingan 51
BAB V PENUTUP 54
5.1 Kesimpulan 54
5.2 Saran 55
DAFTAR PUSTAKA 57
LAMPIRAN 59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Foto Core box di Proyek Ambawang, Kalimantan 13
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian 30
Gambar 4. 1 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Data Sondir Menurut Robertson dan Campanella (1983) 30
Gambar 4. 2 Bottom Pile 37
Gambar 4. 3 Middle/Upper Pile 38
Gambar 4. 4 Konfigurasi Pile Cap PC-1 (Satuan: meter) 39

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Data Hasil Pengujian Kalendering Tiang Pancang 47
Tabel 4. 2 Rekapitulasi Daya Dukung Ijin Dinamis Kalendering 50
Tabel 4. 3 Rekapitulasi Daya Dukung Izin Rencana Statis (Tiang Tunggal) 51
Tabel 4. 4 Rekapitulasi Daya Dukung Izin Dinamis Aktual Lapangan 52

DAFTAR ISTILAH

Simbol	Keterangan	Satuan
Qult	Daya dukung ultimit tiang	kN / ton / kg
Qall	Daya dukung ijin tiang tunggal	kN / ton
Qp (Qb)	Daya dukung (tahanan) ujung tiang	kN
Qs	Daya dukung (tahanan) selimut tiang	kN
qp (qb)	Tahanan ujung per satuan luas	kN/m²
Qall, Rencana	Daya dukung ijin rencana (rata-rata SPT dan CPT)	kN / ton
Qall, Lapangan	Daya dukung ijin aktual lapangan (rata-rata Hiley dan ENR)	kN / ton
Qg,all	Daya dukung ijin kelompok tiang rencana	kN / ton
Qg,aktual	Daya dukung ijin kelompok tiang aktual	kN / ton
SF	Faktor keamanan (*safety factor*)	–
D	Diameter tiang	m / mm
L, Li	Panjang tiang; tebal lapisan tanah ke-i	m / cm
Ap (Ab)	Luas penampang ujung tiang	m² / cm²
As	Luas selimut tiang	m²
O	Keliling penampang tiang	cm
qc	Perlawanan konus (*cone resistance*)	kg/cm²
qc1, qc2	Rata-rata qc zona sekitar ujung tiang (Schmertmann)	kg/cm²
fs, LF	Hambatan lekat lokal (*local friction*)	kg/cm²
TF (JHP)	Total hambatan lekat (*total friction*) / jumlah hambatan pelekat	kg/cm

Simbol	Keterangan	Satuan
FR	Rasio gesekan (*friction ratio*) = fs/qc × 100%	%
α	Faktor reduksi/koefisien gesek selimut (Bagemann, Schmertmann)	–
N-SPT	Jumlah pukulan uji penetrasi standar	pukulan/ft
N60	N-SPT terkoreksi energi 60%	pukulan/ft
Nb	Nilai N-SPT pada dasar tiang	pukulan/ft
Ns, Nrata	Nilai N-SPT rata-rata sepanjang tiang	pukulan/ft
CB, CR, CS, CE	Faktor koreksi: diameter bor, panjang batang, sampler, efisiensi palu	–
C (Decourt)	Koefisien tahanan ujung (pasir = 400)	kN/m²
N	Jumlah tiang dalam kelompok	buah
m, n	Jumlah baris dan jumlah kolom tiang	buah
s	Jarak antar-as tiang	m
se	Jarak as tiang ke tepi pile cap	m
θ	Arc tan (D/s)	derajat
Eg	Efisiensi kelompok tiang	–
Eh	Efisiensi palu (*hammer*)	–
Wh	Berat palu	kg
Wp	Berat tiang	kg
H	Tinggi jatuh palu	cm
S	Penetrasi tiang per pukulan (*final set*)	mm
Ck	Pemampatan sementara total (*temporary compression*)	mm
C1, C2, C3	Pemampatan sementara pile cap, tiang, dan tanah	mm

Simbol	Keterangan	Satuan
n (Hiley/ENR)	Koefisien restitusi	–
C	Kohesi	kN/m²
Φ	Sudut geser dalam	derajat
Γ	Berat volume tanah	kN/m³
wn	Kadar air	%
Gs	Berat jenis butiran	–
LL, PL, PI	Batas cair, batas plastis, indeks plastisitas	%
qu	Kuat tekan bebas	kN/m²
Cc, Cv, e0	Indeks kompresi, koefisien konsolidasi, angka pori awal	–, cm²/s, –

Singkatan	Kepanjangan / Arti
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
CPT	*Cone Penetration Test* (sondir)
ENR	*Engineering News Record*
GI	Gardu Induk
JHP	Jumlah Hambatan Pelekat
PC-1	*Pile cap* tipe 1
PDA	*Pile Driving Analyzer*
PLN	Perusahaan Listrik Negara
RUPTL	Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik
SNI	Standar Nasional Indonesia
SPT	*Standard Penetration Test*
SUTT	Saluran Udara Tegangan Tinggi

Singkatan	Kepanjangan / Arti
USCS	*Unified Soil Classification System*
Kalendering	Pencatatan jumlah pukulan dan penetrasi tiang selama pemancangan (*driving record*)
Spun pile	Tiang beton pracetak prategang berpenampang lingkaran berongga
Bearing stratum	Lapisan tanah keras pendukung ujung tiang
Negative skin friction	Gesekan negatif pada selimut tiang

ABSTRAK

Proyek Gardu Induk 150 kV Ambawang New berdiri di atas endapan aluvial yang didominasi tanah lunak tebal, dengan lapisan pasir padat yang baru ditemukan pada kedalaman sekitar 22–33 m, sehingga pondasi tiang pancang dipilih sebagai sistem pondasi. Penelitian ini bertujuan menentukan daya dukung ijin rencana berdasarkan data penyelidikan tanah, menentukan daya dukung ijin aktual berdasarkan data kalendering, serta mengevaluasi perbandingan keduanya. Penelitian menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan data sekunder berupa sondir, boring dan SPT, serta data kalendering dari empat sampel tiang. Tiang yang ditinjau adalah *spun pile* berdiameter 400 mm mutu K-500 sedalam 33 m pada *pile cap* berisi empat tiang. Daya dukung rencana dihitung dengan metode Meyerhof, Bagemann, dan Schmertmann untuk data sondir, serta metode Meyerhof dan Luciano Decourt untuk data SPT. Daya dukung aktual dihitung dengan metode Hiley dan *Engineering News Record* (ENR), sedangkan efisiensi kelompok tiang diambil dari nilai terkecil antara metode Converse-Labarre dan Los Angeles. Hasil analisis menunjukkan daya dukung ijin rencana tiang tunggal rata-rata sebesar 65,16 ton, sedangkan daya dukung ijin aktual dari kalendering rata-rata sebesar 45,81 ton. Dengan demikian, daya dukung aktual lapangan 29,69% lebih rendah daripada daya dukung rencana, sehingga pendekatan dinamis kalendering bersifat lebih konservatif dibandingkan pendekatan statis. Hasil ini menunjukkan perlunya verifikasi lebih lanjut melalui uji pembebanan statis atau *Pile Driving Analyzer* (PDA).

Kata kunci: daya dukung, pondasi tiang pancang, sondir (CPT), SPT, kalendering, Hiley, ENR, Gardu Induk Ambawang

ABSTRACT

The 150 kV Ambawang New Substation is built on alluvial deposits dominated by thick soft soils, with dense sand found only at depths of about 22–33 m, so driven pile foundations were adopted. This study aims to determine the design allowable bearing capacity from soil investigation data, to determine the actual allowable bearing capacity from pile driving records (calendering), and to evaluate the comparison between them. A quantitative descriptive method was applied using secondary data consisting of cone penetration tests, boring and SPT data, and calendering records of four sample piles. The analyzed piles are 400 mm diameter K-500 precast spun piles driven to a depth of 33 m in a pile cap consisting of four piles. The design capacity was calculated using the Meyerhof, Bagemann, and Schmertmann methods for CPT data, and the Meyerhof and Luciano Decourt methods for SPT data. The actual capacity was calculated using the Hiley and Engineering News Record (ENR) formulas, while the pile group efficiency was taken as the lower value of the Converse-Labarre and Los Angeles methods. The results show that the average design allowable capacity of a single pile was 65.16 tons, whereas the average actual allowable capacity from calendering was 45.81 tons. Therefore, the actual field capacity was 29.69% lower than the design capacity, indicating that the dynamic calendering approach is more conservative than the static approach. These results indicate that further verification through a static load test or Pile Driving Analyzer (PDA) test is needed.

Keywords: *bearing capacity, driven pile, cone penetration test (CPT), SPT, calendering, Hiley, ENR, Ambawang Substation*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem ketenagalistrikan merupakan infrastruktur strategis yang memiliki peran penting dalam menunjang pertumbuhan ekonomi, pembangunan wilayah, serta peningkatan kesejahteraan masyarakat. Meningkatnya jumlah penduduk, pesatnya pembangunan kawasan permukiman, dan berkembangnya sektor industri serta perdagangan menyebabkan kebutuhan energi listrik di Provinsi Kalimantan Barat terus mengalami peningkatan. Kondisi tersebut menuntut tersedianya sistem tenaga listrik yang andal, sehingga PT PLN (Persero) perlu terus melakukan pengembangan infrastruktur dan meningkatkan keandalan jaringan guna menjamin terpenuhinya kebutuhan energi listrik secara berkesinambungan.

Kabupaten Kubu Raya merupakan salah satu daerah di Provinsi Kalimantan Barat yang menunjukkan perkembangan signifikan dalam berbagai sektor, seperti pembangunan infrastruktur, pertumbuhan kawasan permukiman, serta aktivitas ekonomi. Perkembangan tersebut berdampak pada meningkatnya permintaan energi listrik yang harus diimbangi dengan penyediaan sistem distribusi yang andal dan berkualitas. Oleh karena itu, diperlukan sistem distribusi tenaga listrik yang memiliki tingkat keandalan tinggi agar kontinuitas penyaluran energi listrik kepada pelanggan dapat terjaga serta mampu mendukung kebutuhan listrik yang terus meningkat.

Berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) Tahun 2025–2034, kebutuhan energi listrik nasional diperkirakan akan terus bertambah seiring dengan pertumbuhan ekonomi, peningkatan jumlah penduduk, dan semakin luasnya rasio elektrifikasi. Sebagai upaya memenuhi kebutuhan tersebut, Pemerintah Provinsi Kalimantan Barat bersama PT PLN (Persero) terus melakukan pengembangan infrastruktur ketenagalistrikan melalui pembangunan jaringan transmisi, gardu induk, dan jaringan distribusi di berbagai wilayah, termasuk Kabupaten Kubu Raya. Dengan demikian, evaluasi terhadap keandalan sistem

distribusi tenaga listrik menjadi hal yang penting untuk memastikan kualitas, kontinuitas, dan keandalan pelayanan penyediaan energi listrik kepada masyarakat.

Untuk mendukung keandalan dan kapasitas penyaluran tenaga listrik, PT PLN (Persero) merencanakan pembangunan Gardu Induk (GI) 150 kV Ambawang New 60 MVA beserta Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 2 sirkit (PHI) Siantan – Tayan. Pembangunan infrastruktur kelistrikan tersebut memerlukan struktur penyangga berupa tower transmisi maupun bangunan gardu induk yang harus didukung oleh sistem pondasi yang aman, kuat, dan sesuai dengan kondisi tanah pada lokasi proyek.

Berdasarkan kondisi geologi regional, wilayah Kecamatan Sungai Ambawang, Kabupaten Kubu Raya, didominasi oleh endapan aluvial yang tersusun atas material lempung, lanau, pasir halus, dan sedimen organik. Karakteristik endapan tersebut umumnya memiliki daya dukung tanah yang rendah, tingkat kompresibilitas yang tinggi, serta berpotensi mengalami penurunan (settlement) yang cukup besar apabila menerima beban konstruksi. Oleh karena itu, kondisi geologi di wilayah ini mengindikasikan dominasi tanah lunak yang memerlukan penanganan khusus dalam perencanaan pondasi.

Lapisan tanah dengan daya dukung yang memadai baru ditemukan pada kedalaman sekitar 22 hingga 33 meter dari permukaan tanah asli. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan pondasi dangkal tidak mampu memberikan daya dukung yang cukup untuk menopang beban struktur secara aman. Dengan mempertimbangkan karakteristik geologi regional serta hasil investigasi tanah tersebut, pondasi tiang pancang menjadi alternatif yang paling tepat untuk diterapkan pada lokasi penelitian. Jenis pondasi ini mampu meneruskan beban struktur hingga mencapai lapisan tanah keras yang berada pada kedalaman tertentu, sehingga dapat meningkatkan stabilitas, keamanan, dan kinerja struktur bangunan secara keseluruhan.

Dalam perencanaan pondasi tiang pancang, daya dukung tiang dapat diperoleh melalui dua pendekatan, yaitu daya dukung berdasarkan hasil perencanaan (desain) yang dihitung menggunakan data hasil pengujian sondir atau Cone Penetration Test

(CPT), dan daya dukung berdasarkan kondisi aktual di lapangan yang dihitung menggunakan Kalendering (Rumus Hilley dan ENR) pada saat pelaksanaan pekerjaan. Kedua pendekatan tersebut pada dasarnya bertujuan untuk memastikan bahwa daya dukung tanah yang tersedia di lapangan dapat memenuhi atau bahkan melampaui daya dukung yang telah direncanakan pada tahap desain, sehingga keamanan struktur dapat terjamin.

Dalam praktiknya, nilai daya dukung yang diperoleh dari data sondir pada tahap perencanaan dapat berbeda dengan nilai daya dukung yang diperoleh dari data SPT pada tahap pelaksanaan, mengingat kedua titik pengujian tersebut dilakukan pada lokasi dan waktu yang berbeda, serta menggunakan metode pengujian yang berbeda pula. Daya dukung SPT, dalam penelitian ini memiliki kedudukan yang sama dengan daya dukung dari data sondir, yakni sebagai daya dukung Desain. Sementara untuk daya dukung pelaksanaan, kita punya data kalendering. Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi terhadap perbandingan antara daya dukung lapangan dan daya dukung perencanaan untuk memastikan bahwa pondasi tiang pancang yang akan digunakan pada proyek Gardu Induk Ambawang tetap berada dalam kondisi aman.

Berdasarkan uraian tersebut, penulis tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul "Evaluasi Daya Dukung Lapangan terhadap Daya Dukung Desain Pondasi Tiang Pancang di Proyek Gardu Induk Ambawang, Kabupaten Kubu Raya, Kalimantan Barat" sebagai bahan Tugas Akhir.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapakah besar kapasitas daya dukung ijin pondasi tiang pancang berdasarkan data desain (Soil Investigation) menggunakan metode empiris pada data Sondir (CPT) dan Boring (SPT)?

2. Berapakah besar kapasitas daya dukung ijin pondasi tiang pancang aktual di lapangan berdasarkan data kalendering (driving record) menggunakan metode dinamis (Formula Hiley/ENR)?
3. Bagaimana perbandingan dan evaluasi nilai kapasitas daya dukung antara hasil desain (teoritis) dengan hasil pemancangan di lapangan (aktual) pada lokasi proyek Gardu Induk Ambawang?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan nilai daya dukung izin pondasi tiang pancang secara teoritis berbasis data CPT dan SPT melalui rumus empiris.
2. Menentukan nilai daya dukung izin aktual di lapangan berdasarkan data *driving record* menggunakan metode dinamis (Hiley/ENR).
3. Mengevaluasi tingkat kesesuaian dan penyebab perbedaan antara kapasitas daya dukung hasil desain dengan hasil pemancangan aktual di lokasi proyek Gardu Induk Ambawang.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Manfaat Teoritis

   Penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan dan referensi keilmuan di bidang geoteknik, khususnya mengenai metode perhitungan daya dukung pondasi tiang pancang berdasarkan data sondir dan data SPT, serta dapat digunakan sebagai bahan kajian lebih lanjut bagi penelitian sejenis.

2. Manfaat Praktis

   Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan masukan dan bahan evaluasi bagi pihak terkait, khususnya PT PLN (Persero) dan kontraktor pelaksana, dalam menentukan kelayakan daya dukung pondasi tiang pancang pada proyek pembangunan Gardu Induk 150 kV Ambawang, serta dapat menjadi bahan pertimbangan dalam pengambilan keputusan terkait desain pondasi pada proyek-proyek sejenis di masa mendatang..

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan tidak menyimpang dari tujuan yang telah ditetapkan, maka penulis membatasi penelitian ini sebagai berikut:

1. Data yang digunakan adalah data sekunder hasil penyelidikan tanah berupa data sondir (CPT) titik S-T.12 dan S-T.13, data boring/SPT titik T.12 dan T.13.
2. Perhitungan daya dukung perencanaan menggunakan data sondir dihitung dengan metode Meyerhof, metode Bagemann, dan metode Schmertmann, kemudian diambil nilai daya dukung rata-rata.
3. Perhitungan daya dukung lapangan menggunakan data SPT dihitung dengan metode Meyerhof.
4. Jenis pondasi yang dianalisis adalah pondasi tiang pancang (driven pile) berbentuk persegi.
5. Penelitian ini tidak membahas mengenai analisis struktur atas (upper structure), analisis biaya (cost), maupun metode pelaksanaan konstruksi (construction method) secara mendetail.
6. Tidak dilakukan pengujian lapangan baru (loading test/PDA test); evaluasi dilakukan berdasarkan data hasil penyelidikan tanah yang telah tersedia.
7. Perhitungan kalendering menggunakan Metode Hilley dan ENR.

1.6 Lokasi penelitian

Lokasi penelitian berada pada proyek pembangunan Gardu Induk 150 kV Ambawang New 60 MVA dan 2 PHI siantan – Tayan, yang secara administrative terletak di Kecematan Sungai Ambawang, Kabupaten Kubu Raya, Provinsi Kalimantan Barat. Titik penyelidikan tanah yang menjadi objek kajian dalam penelitian ini adalah titik T.12 dan T.13 dengan koordinat sebagai berikut:

- Titik T.12: 0° 2’ 42,46” S – 109° 26’ 5,84” E
- Titik T.13: 0° 2’ 32,14” S – 109° 26’ 5,06” E



Gambar 1. 1 Lokasi Penelitian

(Sumber gambar : PT.Hasta Karya KSO Indisi)

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam laporan Tugas Akhir ini disusun sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN, berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, lokasi penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA, berisi tentang teori-teori dasar yang berkaitan dengan tanah, penyelidikan tanah, pondasi tiang pancang, serta metode-metode perhitungan daya dukung pondasi tiang pancang yang digunakan dalam penelitian ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN, berisi tentang lokasi dan waktu penelitian, jenis dan sumber data, metode pengumpulan data, serta tahapan analisis data yang dilakukan dalam penelitian ini.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN, berisi tentang hasil analisis data penyelidikan tanah, perhitungan daya dukung perencanaan dan daya dukung lapangan, serta evaluasi perbandingan keduanya.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN, berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran-saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Dalam setiap perencanaan struktur bangunan, pondasi merupakan bagian yang sangat penting karena berfungsi untuk menyalurkan beban dari struktur atas ke lapisan tanah pendukung di bawahnya. Pemilihan jenis dan dimensi pondasi yang tepat sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah pada lokasi pembangunan, yang dapat diketahui melalui kegiatan penyelidikan tanah (*soil investigation*). Hasil penyelidikan tanah tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan daya dukung tanah serta kapasitas daya dukung pondasi yang akan digunakan.

No	Penulis (Tahun)	Judul	Metode	Hasil
1	Basoka (2020)	Perbandingan Daya Dukung Tiang Pancang Berdasarkan Pengujian Cone Penetration Test (CPT) dan Standard Penetration Test (SPT) pada Tanah Berpasir	Anaisis daya dukung tiang pancang mrnggunakan data SPT & CPT dengan beberapa variasi dimensi tiang pada kedalaman 10 meter.	Daya dukung brdasarkan CPT lebih tinggi daripada SPT, dengan selisih sekitar 10,4% - 16,3%.
2	Mallarangeng, Sulistyo, dan Kartika (2024)	Comparison of Driven Pile Foundation Bearing Capacity	Perhitungan dan perbandingan daya dukung tiang pancang	Penelitian membandingkan kapasitas tiang dari penyelidikam

		Based on CPT and PDA Test Data for the East Kutai Regency District Attorney's Office Building Construction Project	menggunakan data CPT dan kalendering serta pengujian PDA.	tanah dan data pemancangan untuk mengevaluasi kapasitas tiang tunggal serta efisiensi kelompok tiang.
3	Tampubolon dan Raharja (2024)	Comparison Study of Driven Piles Axial Capacity by Empirical Method and Dynamic Load Test	Perbandingan daya dukung aksial tiang pancang berdasarkan metode empiris dari data CPT dan SPT dengan hasil pengujian dinamis PDA.	Metode Luciano Decourt berdasarkan SPT dan Schmertmann-Nottingham berdasarkan CPT memberikan hasil yang lebih mendekati analisis CAPWAP. Metode Mayerhof juga dapat digunakan dengan memperhatikan

				kondisi tanah dan keterbatasan data.
4	Hayati, Haloho, Sitepu, dan Syuhada (2025)	Analisis Perbandingan Daya Dukung Fondasi Tiang Bor Berdasarkan Hasil Penyelidikan Tanah dan Pengujian Dinamis	Analisis daya dukung empiris menggunakan data SPT dan CPT, kemudian dibandingkan dengan pengujian PDA dan interpretasi CAPWAP.	Hasil pendekatan empiris menunjukkan variasi kapasitas berdasarkan metode dan kondisi tanah. Dalam kasus yang diteliti, hasil empiris cenderung lebih tinggi daripada hasil PDA sehingga diperlukan faktor koreksi yang sesuai.
5	Yuslinda dan Rani (2025)	Analysis of Pile Foundation Bearing Capacity Based on SPT Data on the Pillar of the	Analisis daya dukung pondasi tiang pada pilar jembatan menggunakan data SPT dan ketentuan	Penelitian mengevaluasi kapasitas dukung pondasi berdasarkan kondisi tanah dari data SPT untuk menilai

		T.Nyak Makam Canal Bridge, Santan, Banda Aceh	teknis yang relevan.	kinerja pondasi tiang pada pilar jembatan.

2.2 Tanah

Tanah dalam perspektif geoteknik didefinisikan sebagai kumpulan partikel mineral hasil pelapukan batuan, bahan organik hasil dekomposisi, serta endapan sedimen yang tidak tersementasi (*loose*) dan terletak di atas lapisan batuan dasar (*bedrock*) (Das, 2016; Holtz & Kovacs, 2011). Sifat fisik dan mekanik tanah tidak bersifat statis, melainkan sangat ditentukan oleh genesis atau proses pembentukannya (seperti pelapukan fisik, kimia, maupun biologi), distribusi ukuran butiran (gradasi), kadar air, serta kondisi lingkungan sekitar seperti suhu dan tekanan *overburden* (Craig, 2004; Bowles, 1997).

Dalam praktik rekayasa sipil, khususnya pada subdisiplin geoteknik, pemahaman mendalam mengenai karakteristik fisik (seperti berat volume, porositas, dan batas-batas Atterberg) serta parameter mekanik (seperti kuat geser, kompresibilitas, dan koefisien permeabilitas) menjadi fondasi utama dalam analisis stabilitas dan daya dukung tanah (Terzaghi et al., 1996). Parameter-parameter ini digunakan secara kuantitatif untuk memprediksi respons tanah terhadap pembebanan struktur, sehingga menjamin aspek keamanan, fungsionalitas, dan durabilitas suatu konstruksi sipil (Coduto, 1999; Hardiyatmo, 2015).

2.2.1 Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah adalah suatu metode pengelompokan tanah berdasarkan karakteristik fisik dan indeks tanah tertentu, seperti distribusi ukuran butiran, nilai batas Atterberg (batas cair dan batas plastis), serta kandungan bahan organic (Das & Sobhan, 2018; Hardiyatmo, 2012). Sistem klasifikasi ini digunakan untuk mengidentifikasi perilaku teknik tanah sehingga dapat diperkirakan sifat-sifatnya, seperti kekuatan

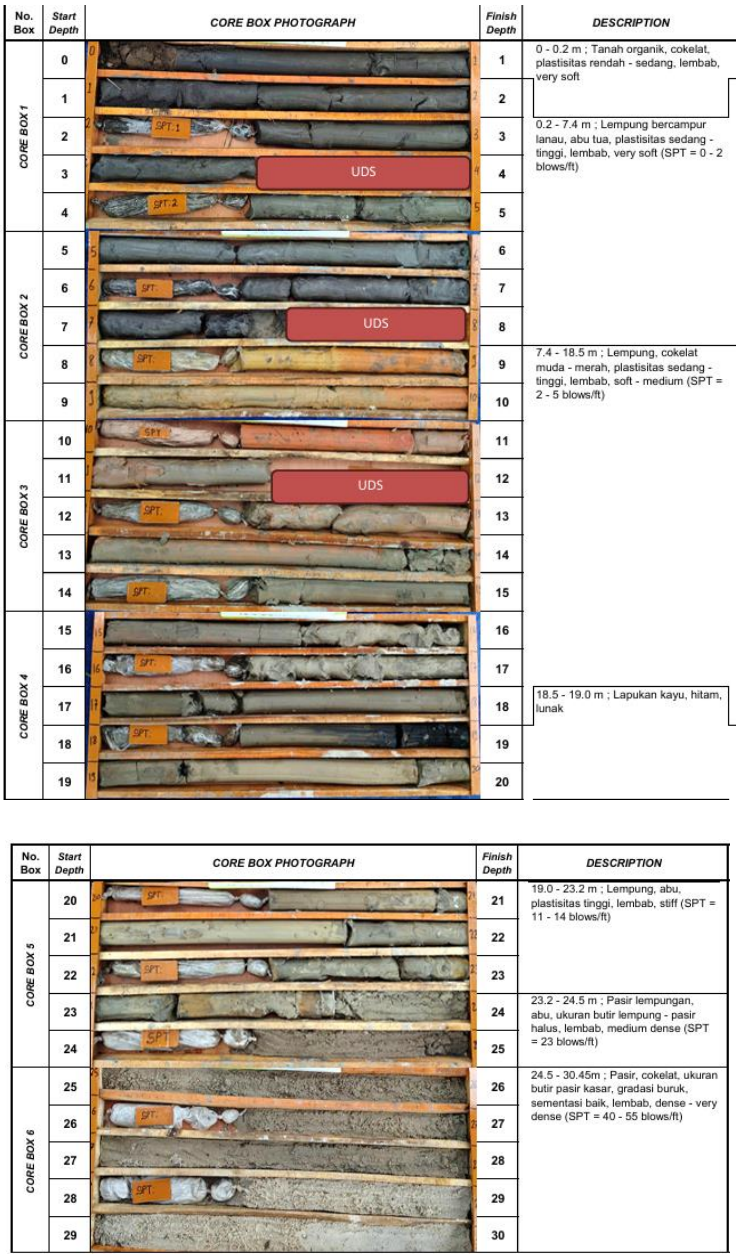
geser, kompresibilitas, dan permeabilitas. Dalam bidang geoteknik, klasifikasi tanah umumnya mengacu pada sistem Unified Soil Classification System (USCS) dan AASHTO, yang mengelompokkan tanah berdasarkan hasil analisis saringan dan pengujian batas konsistensi. Dengan adanya klasifikasi tersebut, perencana dapat menentukan kesesuaian tanah terhadap kebutuhan konstruksi dan metode perbaikan tanah yang diperlukan.

Tanah gambut merupakan lapisan tanah organik yang terbentuk dari sisa-sisa pelapukan tumbuhan dengan tingkat pembusukan tertentu (Hardiyatmo, 2010). Lapisan ini terletak pada permukaan (*top soil*) hingga kedalaman awal (0,00 – 3,00 meter). Sifat khas tanah gambut di kawasan aluvial Kalimantan meliputi daya dukung sangat rendah, nilai kadar air organik sangat tinggi, dan kompresibilitas (*penurunan*) yang sangat besar (Mochtar, 2000).

Berada di bawah lapisan tanah gambut pada kedalaman **3,00 – 18,00 meter**. Lapisan ini didominasi oleh endapan aluvial berupa lempung hingga lanau berlempung (*clayeysilt*) berwarna abu-abu. Menurut Terzaghi dan Peck (1967), tanah lempung lunak memiliki sifat kohesif tinggi, plastisitas tinggi (CH/CL), serta berpotensi mengalami penurunan konsolidasi jangka panjang apabila menerima beban di atasnya.

Terletak pada kedalaman transisi 18,00 – 28,00 meter. Lapisan ini mengalami proses konsolidasi alamiah akibat tekanan overburden dari lapisan di atasnya (Coduto, 2001). Konsistensi tanah tergolong sedang hingga teguh, dengan tingkat kepadatan yang lebih baik dan kadar air yang lebih rendah dibanding lapisan di atasnya.

Merupakan lapisan tanah keras yang berfungsi sebagai perletakan dasar tiang pancang (*bearing stratum*) pada kedalaman 28,00 – 33,00+ meter. Terdiri dari material pasir berbutir sedang hingga kasar (*coarse sand*). Menurut Meyerhof (1976), lapisan pasir padat memberikan perlawanan daya dukung ujung nominal (*end bearing capacity*) yang signifikan bagi perancangan tiang tunggal maupun kelompok.



Gambar 2. 1 Foto Core box di Proyek Ambawang, Kalimantan

Salah satu sistem klasifikasi yang umum digunakan dalam bidang teknik sipil adalah *Unified Soil Classification System* (USCS), yang mengelompokkan tanah berdasarkan ukuran butir dan plastisitasnya, misalnya tanah lempung anorganik dengan plastisitas tinggi diberi simbol CH (*Clay High plasticity*), dan lanau anorganik dengan plastisitas tinggi diberi simbol MH (*Silt High plasticity*).

2.2.2 Sifat Fisik Tanah (Index Properties)

Sifat fisik tanah (*index properties*) merupakan sekumpulan parameter dasar yang digunakan untuk mengidentifikasi dan mendeskripsikan karakteristik suatu tanah. Parameter ini meliputi kadar air, berat jenis butiran (*specific gravity*), distribusi ukuran butiran, berat isi, angka pori, porositas, derajat kejenuhan, serta batas-batas Atterberg. Sifat-sifat tersebut tidak secara langsung menunjukkan kekuatan tanah, namun memberikan informasi penting mengenai perilaku tanah serta menjadi dasar dalam sistem klasifikasi dan evaluasi sifat-sifat rekayasa tanah. Oleh karena itu, pengujian sifat fisik tanah merupakan tahapan awal yang sangat penting dalam penyelidikan geoteknik sebagai dasar perencanaan dan analisis konstruksi (Das & Sobhan, 2018; Coduto et al., 2016). Parameter-parameter tersebut antara lain:

- Kadar air (*water content, wn*), yaitu perbandingan antara berat air dengan berat butiran tanah kering, dinyatakan dalam persen.
- Berat volume (*unit weight, γ*), yaitu perbandingan antara berat tanah dengan volume tanah.
- Berat jenis (*specific gravity*, Gs), yaitu perbandingan antara berat butiran tanah dengan berat air pada volume yang sama.
- Batas-batas Atterberg, yang terdiri dari batas cair (*Liquid Limit*, LL), batas plastis (*Plastic Limit*, PL), dan indeks plastisitas (*Plasticity Index*, PI = LL – PL).
- Analisa ukuran butiran (*grain size analysis*), yang menggambarkan distribusi persentase fraksi pasir, lanau, dan lempung dalam suatu sampel tanah.

2.2.3 Sifat Mekanik Tanah

Sifat mekanik tanah adalah sekumpulan parameter yang menunjukkan perilaku tanah akibat pengaruh pembebanan dan tegangan yang bekerja pada massa tanah. Parameter ini mencerminkan kemampuan tanah dalam menahan gaya geser, mengalami deformasi, dan mempertahankan stabilitasnya di bawah kondisi pembebanan tertentu. Sifat mekanik tanah memiliki peranan yang sangat penting dalam analisis geoteknik, terutama untuk menentukan daya dukung tanah, besarnya

penurunan, stabilitas lereng, serta desain pondasi dan struktur geoteknik lainnya (Coduto et al., 2016). Menurut Bowles (1997), evaluasi terhadap sifat mekanik tanah diperlukan agar perilaku tanah terhadap beban konstruksi dapat diprediksi secara tepat, sehingga risiko kegagalan struktur dapat diminimalkan. Parameter mekanik tanah yang umum digunakan antara lain:

- Kohesi (c), yaitu kekuatan ikatan antar partikel tanah yang tidak dipengaruhi oleh tegangan normal, umumnya diperoleh dari uji geser langsung *(direct shear test)*.
- Sudut geser dalam (φ), yaitu sudut yang menyatakan besarnya tahanan geser tanah akibat gesekan antar partikel.
- Kuat tekan bebas *(Unconfined Compressive Strength*, UCS atau qu), yaitu nilai kuat tekan tanah pada kondisi tanpa tekanan keliling, yang umum digunakan untuk tanah kohesif.
- Parameter konsolidasi, seperti koefisien kompresi (Cc), koefisien konsolidasi (Cv), dan angka pori awal (eo), yang digunakan untuk menganalisis besarnya penurunan *(settlement)* tanah.

2.3 Penyelidikan Tanah

Penyelidikan tanah (*soil investigation*) merupakan serangkaian kegiatan yang dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai kondisi bawah permukaan tanah, meliputi jenis tanah, susunan lapisan tanah, sifat fisik dan mekanik tanah, serta kondisi muka air tanah pada suatu lokasi. Kegiatan ini dilaksanakan melalui pengujian lapangan (*in-situ test*), seperti *Standard Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test* (CPT), serta pengujian laboratorium terhadap sampel tanah yang diambil dari lokasi penyelidikan. Hasil penyelidikan tanah menjadi dasar dalam menentukan parameter geoteknik yang diperlukan untuk analisis daya dukung tanah, penurunan (*settlement*), stabilitas lereng, serta perencanaan pondasi dan struktur geoteknik lainnya. Oleh karena itu, penyelidikan tanah merupakan tahapan yang sangat penting dalam proses perencanaan dan pelaksanaan konstruksi guna menjamin keamanan, stabilitas, dan keandalan struktur (Das & Sobhan, 2018; Bowles, 1997).Data hasil

penyelidikan tanah digunakan sebagai dasar dalam perencanaan pondasi suatu bangunan.

2.3.1 Standart Penetration Test (SPT)

Standard Penetration Test (SPT) adalah metode penyelidikan tanah secara langsung (*in-situ test*) yang bertujuan untuk menentukan karakteristik dan kondisi lapisan tanah berdasarkan nilai hambatan penetrasi terhadap pemukulan. Pengujian dilakukan menggunakan *split spoon sampler* yang dipukul dengan palu standar bermassa 63,5 kg dari ketinggian 760 mm sesuai prosedur ASTM D1586/D1586M. Nilai pukulan yang diperoleh pada penetrasi 300 mm setelah penetrasi awal 150 mm, yang dikenal sebagai N-SPT, digunakan untuk mengestimasi kepadatan relatif tanah pasir, tingkat konsistensi tanah lempung, serta berbagai parameter geoteknik lainnya melalui hubungan empiris. Selain itu, pengujian SPT juga memungkinkan diperolehnya sampel tanah terganggu yang selanjutnya dapat digunakan untuk pengujian indeks sifat tanah di laboratorium. Karena kemudahan pelaksanaan, biaya yang relatif ekonomis, dan tersedianya banyak korelasi empiris, SPT menjadi salah satu metode investigasi tanah yang paling luas digunakan dalam perencanaan pondasi dan analisis geoteknik (Coduto et al., 2016; Das & Sobhan, 2018).

Pengujian ini dilakukan dengan cara memukulkan tabung belah (*split barrel sampler*) ke dalam tanah sedalam 45 cm menggunakan beban (*hammer*) seberat 63,5 kg yang dijatuhkan dari ketinggian 75 cm, sesuai dengan standar ASTM D1586. Jumlah pukulan yang diperlukan untuk memasukkan sampler pada penetrasi kedua dan ketiga (masing-masing 15 cm) dicatat sebagai nilai N-SPT, yang digunakan untuk menentukan konsistensi atau kepadatan relatif tanah pada kedalaman tertentu.

2.3.2 Sondir (Cone Penetration Test/CPT)

Sondir atau Cone Penetration Test (CPT) merupakan salah satu metode penyelidikan tanah secara langsung (*in-situ test*) yang dilakukan dengan cara menekan konus (*cone*) yang terpasang pada ujung batang sondir ke dalam tanah secara kontinu menggunakan kecepatan penetrasi konstan, sehingga diperoleh gambaran kondisi lapisan tanah berdasarkan tahanan penetrasi yang terjadi. Selama pengujian, alat akan

mengukur tahanan ujung konus (*cone resistance, qc*) dan hambatan lekat atau gesekan selimut (*sleeve friction, fs*) yang digunakan untuk mengidentifikasi jenis tanah, menentukan stratifikasi lapisan tanah, serta mengestimasi berbagai parameter geoteknik, seperti kuat geser, kepadatan relatif, dan daya dukung tanah. Dibandingkan dengan metode pengeboran, pengujian CPT memiliki keunggulan berupa hasil yang diperoleh secara kontinu sehingga mampu memberikan profil kondisi tanah yang lebih rinci dan konsisten. Oleh karena itu, hasil pengujian sondir banyak dimanfaatkan sebagai dasar dalam perencanaan pondasi, analisis kapasitas dukung tiang, serta evaluasi kondisi tanah pada berbagai proyek konstruksi (Das & Sobhan, 2018; Lunne et al., 1997).

Di Indonesia, pelaksanaan pengujian sondir mengacu pada SNI 2827:2008 tentang Cara Uji Penetrasi Lapangan dengan alat Sondir. Standar ini mengatur persyaratan peralatan, prosedur pelaksanaan pengujian, kecepatan penetrasi konstan sebesar 20 mm/detik (±5 mm/detik), tata cara pencatatan data, serta interpretasi hasil pengujian. Penerapan standar tersebut bertujuan untuk menjamin bahwa data tahanan konus (*qc*) dan hambatan lekat (*fs*) yang diperoleh memiliki tingkat ketelitian dan keandalan yang memadai sebagai dasar analisis geoteknik dan perencanaan pondasi.

Pengujian ini menghasilkan dua parameter utama, yaitu nilai perlawanan konus (qc), yang menyatakan besarnya tahanan ujung konus terhadap penetrasi, dan hambatan lekat (friction), baik berupa *local friction* (LF) maupun *total friction* (TF), yang menyatakan besarnya gesekan antara selimut batang sondir dengan tanah di sekitarnya. Sondir umumnya dihentikan apabila nilai qc telah mencapai nilai tertentu (misalnya $\geq$ 200 kg/cm^2) yang mengindikasikan telah ditemukannya lapisan tanah keras, atau telah mencapai kedalaman maksimum alat.

2.3.3 Uji Laboratorium Mekanika Tanah

Uji laboratorium tanah merupakan serangkaian pengujian yang dilakukan terhadap contoh tanah yang diperoleh dari kegiatan penyelidikan lapangan, baik berupa sampel terganggu (*disturbed sample*) maupun sampel tak terganggu (*undisturbed sample*). Namun, untuk pengujian yang berkaitan dengan sifat mekanik tanah, seperti

kuat geser, konsolidasi, dan kompresibilitas, umumnya digunakan sampel tak terganggu yang diperoleh melalui proses pemboran (*boring*) menggunakan tabung contoh (*Shelby tube*) atau alat pengambil sampel lainnya. Penggunaan sampel tak terganggu bertujuan untuk mempertahankan kondisi alami tanah sehingga parameter geoteknik yang diperoleh lebih representatif terhadap kondisi di lapangan. Hasil pengujian laboratorium digunakan untuk menentukan berbagai parameter fisik dan mekanik tanah, seperti kadar air, berat jenis butiran, batas Atterberg, distribusi ukuran butiran, kuat geser, permeabilitas, serta karakteristik konsolidasi yang diperlukan dalam analisis dan perencanaan geoteknik (Das & Sobhan, 2018; Craig, 2004).

Beberapa pengujian laboratorium yang umum dilakukan antara lain pengujian kadar air, berat volume, berat jenis, batas-batas Atterberg, analisa ukuran butiran (hidrometer dan saringan), uji geser langsung (*direct shear test*), uji kuat tekan bebas (*unconfined compression test*), dan uji konsolidasi (*consolidation test*).

2.4 Pondasi

Pondasi merupakan elemen struktur yang berfungsi sebagai penghubung antara bangunan dan tanah pendukung. Pondasi dirancang untuk meneruskan seluruh beban yang berasal dari struktur atas, meliputi beban mati, beban hidup, maupun beban lateral, ke lapisan tanah yang memiliki kapasitas dukung yang memadai. Selain mampu menyalurkan beban secara aman, pondasi juga harus menjaga agar tegangan yang terjadi pada tanah tidak melebihi daya dukung izin, sehingga dapat mencegah terjadinya keruntuhan geser (*shear failure*) maupun penurunan (*settlement*) yang berlebihan. Oleh karena itu, perencanaan pondasi harus mempertimbangkan kondisi tanah, karakteristik pembebanan, serta persyaratan stabilitas dan deformasi agar struktur tetap aman dan berfungsi sesuai umur rencana (Bowles, 1997; Das & Sobhan, 2018).

Menurut Bowles (1997), keberhasilan suatu sistem pondasi ditentukan oleh kemampuannya dalam memindahkan beban struktur ke tanah pendukung secara efektif

tanpa menimbulkan penurunan yang berlebihan ataupun kegagalan daya dukung tanah. Dengan demikian, pemilihan jenis pondasi harus disesuaikan dengan kondisi tanah dan karakteristik struktur yang akan didukung.

Secara umum, pondasi dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu pondasi dangkal (*shallow foundation*) dan pondasi dalam (*deep foundation*). Pondasi dangkal digunakan apabila lapisan tanah keras berada pada kedalaman yang relatif dekat dengan permukaan tanah, sedangkan pondasi dalam digunakan apabila lapisan tanah keras berada pada kedalaman yang cukup jauh dari permukaan tanah, sehingga diperlukan elemen pondasi yang dapat menjangkau lapisan tanah keras tersebut, seperti tiang pancang (*driven pile*) atau tiang bor (*bored pile*).

2.4.1 Pondasi Tiang Pancang

Pondasi tiang pancang merupakan salah satu jenis pondasi dalam yang dipasang ke dalam tanah dengan cara dipancangkan (*driven*) menggunakan alat pancang (*pile driver*), baik berupa hammer drop, diesel hammer, maupun hydraulic hammer. Tiang pancang berfungsi untuk meneruskan beban struktur ke lapisan tanah keras yang berada pada kedalaman tertentu, baik melalui tahanan ujung tiang (*point bearing*) maupun tahanan gesek sepanjang selimut tiang (*skin friction*).

2.4.2 Kriteria Pemilihan Pondasi Tiang Pancang

Pemilihan pondasi tiang pancang pada suatu proyek umumnya didasarkan pada beberapa pertimbangan, antara lain kondisi tanah lunak yang cukup tebal pada lokasi proyek, besarnya beban struktur yang harus didukung, kebutuhan untuk mengurangi risiko penurunan yang tidak seragam (*differential settlement*), serta pertimbangan efisiensi waktu dan biaya pelaksanaan konstruksi.

2.5 Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang

Daya dukung pondasi tiang pancang merupakan kemampuan maksimum suatu tiang dalam memikul beban aksial tanpa mengalami keruntuhan, baik keruntuhan pada tanah pendukung maupun keruntuhan pada material tiang itu sendiri. Daya dukung

tiang tunggal pada umumnya terdiri dari dua komponen, yaitu daya dukung ujung tiang dan daya dukung selimut tiang, yang dapat dinyatakan dalam persamaan umum sebagai berikut:

$$Qult = Qp + Qs$$

dengan Qult adalah daya dukung ultimit tiang, Qp adalah daya dukung ujung tiang (*point bearing capacity*), dan Qs adalah daya dukung selimut tiang (*skin friction capacity*).

2.5.1 Daya Dukung Ujung Tiang (*Point Bearing Capacity*)

Daya dukung ujung tiang merupakan tahanan yang diberikan oleh tanah yang berada tepat di bawah ujung tiang akibat pembebanan aksial. Besarnya daya dukung ujung tiang dipengaruhi oleh jenis tanah, kepadatan atau konsistensi tanah pada kedalaman ujung tiang, serta luas penampang dasar tiang.

2.5.2 Daya Dukung Selimut Tiang (*Skin Friction*)

Daya dukung selimut tiang merupakan tahanan gesek yang timbul antara permukaan selimut tiang dengan tanah di sekitarnya sepanjang kedalaman tiang yang terpancang. Besarnya daya dukung selimut dipengaruhi oleh jenis tanah, kekuatan geser tanah, serta luas selimut tiang yang bersentuhan dengan tanah.

2.5.3 Daya Dukung Ijin Tiang

Daya dukung ijin tiang (Qall) merupakan nilai daya dukung ultimit yang telah direduksi dengan faktor keamanan (*safety facto*r, SF) tertentu, dengan tujuan untuk memberikan batas keamanan terhadap ketidakpastian dalam analisis maupun variasi kondisi tanah di lapangan. Secara umum, daya dukung ijin tiang dirumuskan sebagai berikut:

$$Qall = Qult / SF$$

dengan SF umumnya diambil sebesar 2,5 hingga 3, bergantung pada metode perhitungan dan tingkat keandalan data yang digunakan.

2.6 Metode Perhitungan Daya Dukung Tiang Berdasarkan Data Sondir

Perhitungan daya dukung tiang pancang berdasarkan data sondir dapat dilakukan dengan berbagai metode empiris yang telah dikembangkan oleh para ahli geoteknik. Dalam penelitian ini, digunakan tiga metode, yaitu metode Meyerhof, metode Bagemann, dan metode Schmertmann.

2.6.1 Metode Meyerhof

Metode Meyerhof (1956) menghitung daya dukung tiang berdasarkan nilai perlawanan konus (qc) pada ujung tiang dan nilai total hambatan lekat (*Total Friction*, TF) yang dibaca langsung dari data sondir. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Qult = (qc \times Ap) / 3 + (TF \times O) / 5$$

dengan qc adalah nilai perlawanan konus pada kedalaman ujung tiang (kg/cm²), Ap adalah luas penampang ujung tiang (cm²), TF adalah total hambatan lekat sepanjang tiang (kg/cm), dan O adalah keliling penampang tiang (cm). Nilai 3 dan 5 merupakan faktor keamanan parsial yang diterapkan masing-masing pada komponen tahanan ujung dan tahanan selimut.

2.6.2 Metode Bagemann

Metode Bagemann (1965) menghitung daya dukung selimut tiang dengan mempertimbangkan nilai hambatan lekat lokal (*Local Friction*, LF) pada setiap lapisan tanah yang dilalui tiang, dikalikan dengan faktor reduksi (α) yang besarnya bergantung pada jenis tanah pada lapisan tersebut. Persamaan umum metode Bagemann adalah sebagai berikut:

$$Qult = (qc \times Ap) + \Sigma(\alpha \times LFi \times O \times Li)$$

dengan LFi adalah nilai hambatan lekat lokal rata-rata pada lapisan ke-i (kg/cm²), Li adalah tebal lapisan ke-i (cm), dan α adalah faktor reduksi yang nilainya berkisar antara 0,3 untuk tanah organik/lempung lunak, 0,5 hingga 1,0 untuk tanah lanau atau lempung berpasir, dan 1,0 untuk tanah pasir.

2.6.3 Metode Schmertmann

Metode Schmertmann-Nottingham (1975) merupakan metode yang lebih kompleks dibandingkan metode Meyerhof dan Bagemann, karena nilai tahanan ujung tiang dihitung berdasarkan rata-rata nilai qc pada dua zona di sekitar ujung tiang, yaitu qc1 (rata-rata qc dari 0,7D di atas ujung tiang hingga 4D di bawah ujung tiang) dan qc2 (rata-rata qc dari 8D di atas ujung tiang). Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$qp = 0{,}5 \times (qc1 + qc2)$$

$$Qult = (qp \times Ap) + \Sigma(\alpha \times qci \times O \times Li)$$

dengan D adalah diameter atau lebar tiang, qp adalah tahanan ujung rata-rata, dan α adalah faktor reduksi yang nilainya bergantung pada jenis tanah, umumnya diambil sebesar 0,012 untuk tanah kohesif (qc ≤ 10 kg/cm²) dan 0,02 untuk tanah pasiran (qc > 10 kg/cm²).

Dari ketiga metode tersebut, akan diperoleh tiga nilai daya dukung ijin (Qall) yang berbeda. Sebagai langkah konservatif dalam perencanaan, nilai daya dukung perencanaan yang digunakan adalah nilai Qall terkecil di antara ketiga metode tersebut, dengan pertimbangan bahwa nilai terkecil mewakili kondisi yang paling aman (*safe side*) dalam mengantisipasi ketidakpastian parameter tanah.

2.7 Metode Perhitungan Daya Dukung Tiang Berdasarkan Data SPT

2.7.1 Metode Meyerhof (1976)

Metode Meyerhof (1976) merupakan salah satu metode empiris yang banyak digunakan untuk memperkirakan daya dukung ultimit pondasi tiang berdasarkan hasil pengujian Standard Penetration Test (SPT). Metode ini memanfaatkan nilai pukulan N-SPT sebagai parameter utama dalam menentukan tahanan ujung (*end bearing resistance*) dan tahanan selimut (*skin friction*) tiang. Nilai N-SPT dianggap mampu merepresentasikan tingkat kepadatan tanah berbutir kasar maupun konsistensi tanah kohesif sehingga dapat digunakan untuk mengestimasi kapasitas dukung pondasi secara praktis.

Menurut Meyerhof (1976), daya dukung ultimit tiang dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$qult = 40 \times Nb \times Ap + 0{,}2 \times Ns \times As$$

dengan qu adalah daya dukung ultimit pondasi tiang pancang (ton), Nb adalah nilai N-SPT pada elevasi dasar tiang, Ap adalah luas penampang dasar tiang (m^2), Ns adalah nilai N-SPT rata-rata di sepanjang tiang, dan As adalah luas selimut tiang (m^2). Daya dukung lapangan ini merepresentasikan kondisi tanah aktual yang diperoleh pada saat pelaksanaan penyelidikan tanah di lokasi proyek.

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa kapasitas dukung pondasi merupakan penjumlahan antara tahanan ujung tiang dan tahanan gesek sepanjang selimut tiang. Oleh karena itu, metode Meyerhof banyak digunakan pada tahap perencanaan awal karena sederhana, mudah diaplikasikan, dan telah didukung oleh berbagai hasil penelitian lapangan.

2.7.2 Metode Luciano Decourt

Metode Luciano Decourt merupakan metode empiris yang dikembangkan berdasarkan korelasi antara nilai N-SPT dengan hasil uji beban statis pondasi tiang. Metode ini memperhitungkan kontribusi tahanan ujung dan tahanan selimut berdasarkan karakteristik tanah yang dilalui tiang sehingga mampu memberikan estimasi daya dukung ultimit yang lebih representatif pada berbagai kondisi tanah.

Pada metode Decourt, tahanan ujung dihitung menggunakan nilai N-SPT di sekitar ujung tiang, sedangkan tahanan selimut diperoleh dari nilai rata-rata N-SPT sepanjang batang tiang dengan memperhatikan koefisien empiris sesuai jenis tanah dan tipe pondasi.

Secara umum,

$$Qult = Qb + Qs$$

Dengan Qb adalah tahanan ujung tiang dan Qs adalah tahanan gesek selimut. Metode Luciano Decourt banyak digunakan karena mempunyai korelasi yang cukup

baik terhadap hasil uji pembebanan statis (*static loading test*) serta sesuai digunakan pada tanah pasir maupun lempung.

2.8 Analisis Daya Dukung Dinamis Berdasarkan Hasil Kalendering

Kalendering (*pile driving record*) merupakan proses pencatatan jumlah pukulan palu terhadap penetrasi tiang selama pemancangan. Data kalendering digunakan untuk memperkirakan daya dukung dinamis tiang berdasarkan hubungan antara energi pemancangan dan besarnya penetrasi tiang setiap pukulan. Analisis ini umumnya dilakukan sebagai evaluasi awal terhadap kapasitas pondasi setelah proses pemancangan selesai. Beberapa metode yang banyak digunakan dalam analisis daya dukung dinamis adalah Metode Hiley dan Engineering News Record (ENR).

2.8.1 Metode Hiley

Metode Hiley merupakan salah satu rumus dinamis yang mempertimbangkan efisiensi energi palu, kehilangan energi akibat tumbukan, deformasi elastis sistem pemancangan, serta penetrasi permanen tiang. Oleh karena itu, metode Hiley dinilai lebih teliti dibandingkan rumus dinamis sederhana karena memperhitungkan faktor-faktor yang memengaruhi transfer energi selama pemancangan.

Secara umum, kapasitas dukung tiang menurut Hiley dihitung berdasarkan keseimbangan antara energi efektif palu dan energi yang diserap oleh sistem tiang tanah. Metode ini banyak digunakan untuk mengevaluasi hasil pemancangan pada proyek-proyek pondasi tiang pancang.

2.8.2 Metode Engineering News Record (ENR)

Metode Engineering News Record (ENR) merupakan rumus dinamis empiris yang menghubungkan energi palu dengan penetrasi tiang setiap pukulan (*set per blow*). Rumus ini termasuk metode paling sederhana dalam memperkirakan daya dukung tiang karena hanya membutuhkan data berat palu, tinggi jatuh palu, efisiensi palu, dan besarnya penetrasi saat pemancangan.

Meskipun sederhana dan mudah diterapkan, metode ENR memiliki keterbatasan karena tidak memperhitungkan kehilangan energi akibat deformasi elastis

maupun karakteristik tanah secara rinci. Oleh sebab itu, hasil perhitungan metode ENR umumnya digunakan sebagai estimasi awal dan sebaiknya dibandingkan dengan metode lain atau hasil uji pembebanan.

Penelitian ini dilakukan melalui serangkaian tahapan yang terstruktur untuk mengetahui nilai daya dukung izin rencana dan daya dukung izin aktual pondasi tiang pancang pada Proyek Gardu Induk Ambawang. Tahapan pertama meliputi identifikasi permasalahan serta pengumpulan data sekunder berupa hasil pengujian sondir atau Cone Penetration Test (CPT), data pengeboran tanah dan Standard Penetration Test (SPT), serta data kalendering dari pelaksanaan pemancangan tiang.

Tahap selanjutnya adalah menghitung daya dukung izin rencana berdasarkan data CPT dengan menerapkan metode Meyerhof, Bagemann, dan Schmertmann. Sementara itu, analisis berdasarkan data SPT dilakukan menggunakan metode Meyerhof dan Luciano Decourt. Nilai yang diperoleh dari setiap metode kemudian dihimpun dan diolah untuk menentukan rata-rata daya dukung izin rencana.

Setelah itu, perhitungan daya dukung izin aktual dilakukan dengan memanfaatkan data kalendering hasil pemancangan melalui metode Hiley dan Engineering News Record (ENR). Nilai dari kedua metode tersebut selanjutnya dihitung rata-ratanya untuk memperoleh daya dukung izin aktual. Selain itu, efisiensi kelompok tiang dianalisis menggunakan metode Converse-Labarre dan Los Angeles. Dari kedua hasil tersebut, nilai efisiensi yang lebih rendah dipilih sebagai dasar dalam mengevaluasi kapasitas kelompok tiang.

Pada tahap terakhir, nilai rata-rata daya dukung izin rencana dibandingkan dengan nilai rata-rata daya dukung izin aktual. Perbandingan ini bertujuan untuk mengetahui selisih kapasitas daya dukung sekaligus mengevaluasi kesesuaian antara hasil perencanaan dan kondisi aktual selama proses pemancangan di lapangan. Adapun diagram alir yang menunjukkan urutan pelaksanaan penelitian tersebut disajikan pada halaman 28.

BAB III
METODELOGI PENELITIAN

3.1 Umum

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif, yaitu metode yang dilakukan dengan cara mengumpulkan, mengolah, dan menganalisis data sekunder hasil penyelidikan tanah yang telah tersedia, kemudian menghitung daya dukung pondasi tiang pancang berdasarkan data tersebut, untuk selanjutnya dievaluasi dan dibandingkan guna menjawab rumusan masalah yang telah ditetapkan.

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada lokasi proyek pembangunan Gardu Induk 150 kV Ambawang New 60 MVA dan 2 PHI Siantan – Tayan, yang berlokasi di Kecamatan Sungai Ambawang, Kabupaten Kubu Raya, Provinsi Kalimantan Barat. Data penyelidikan tanah yang digunakan merupakan hasil pekerjaan penyelidikan tanah yang dilaksanakan pada periode November 2025 hingga Mei 2026.

3.3 Jenis dan Sumber Data

3.3.1 Data Primer

Penelitian ini tidak melakukan pengambilan data primer baru di lapangan. Seluruh proses analisis didasarkan pada data sekunder yang telah tersedia dari hasil pekerjaan penyelidikan tanah sebelumnya.

3.3.2 Data Sekunder

Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari:

- Data hasil pengujian Standard Penetration Test (SPT) pada titik bor T.12 dan T.13, yang meliputi nilai N-SPT, deskripsi lapisan tanah, dan kedalaman muka air tanah.

- Data hasil pengujian sondir (CPT) pada titik S-T.12 dan S-T.13, yang meliputi nilai perlawanan konus (qc), hambatan lekat lokal (LF), dan total hambatan lekat (TF) pada setiap kedalaman.
- Data spesifikasi pondasi tiang pancang yang direncanakan pada proyek, meliputi dimensi tiang dan kedalaman rencana tiang.

3.4 Metode Pengumpulan Data

Data-data yang digunakan dalam penelitian ini dikumpulkan dengan metode studi dokumentasi, yaitu dengan mengumpulkan dan menelaah laporan hasil penyelidikan tanah (*soil investigation report*).

3.4.1 Data Penyelidian Tanah (*Boring*/SPT)

Data *boring* dan SPT diperoleh dari laporan hasil penyelidikan tanah pada titik T.12 (dilaksanakan pada tanggal 4–7 Mei 2026, kedalaman 41 m) dan titik T.13 (dilaksanakan pada tanggal 9–11 April 2026, kedalaman 42 m).

3.4.2 Data Sondir(CPT)

Data sondir diperoleh dari laporan akhir penyelidikan tanah pada titik S-T.12 (dilaksanakan pada tanggal 1 Desember 2025, kedalaman 23,6 m) dan titik S-T.13 (dilaksanakan pada tanggal 27 November 2025, kedalaman 23,2 m).

3.4.3 Data Hasil Uji Laboratorium

Data hasil uji laboratorium diperoleh dari sampel tanah tak terganggu (undisturbed sample) yang diambil pada titik T.12 dan T.13, yang diuji di Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura, Pontianak.

3.4.4 Data Desain Pondasi Tiang Pancang Eksisting

Data desain pondasi diperoleh dari dokumen perencanaan proyek yang memuat spesifikasi dimensi dan kedalaman rencana tiang pancang 33 meter yang digunakan pada struktur Gardu Induk Ambawang.

3.5 Tahapan Analisis Data

Tahapan analisis data diawali dengan melakukan rekapitulasi data hasil penyelidikan tanah yang meliputi data *Cone Penetration Test* (CPT/sondir) pada titik S-T.12 dan S-T.13 serta data *Standard Penetration Test* (SPT) pada titik bor T.12 dan T.13. Selanjutnya dilakukan perhitungan daya dukung aksial pondasi tiang menggunakan beberapa metode empiris sesuai dengan jenis data yang digunakan. Hasil perhitungan kemudian dibandingkan dengan daya dukung lapangan berdasarkan data kalendering sehingga diperoleh metode yang memberikan hasil paling mendekati kondisi aktual di lapangan.

3.5.1 **Analisis Daya Dukung Perencanaan (Data Sondir)**

Tahap ini diawali dengan melakukan rekapitulasi data sondir pada titik S-T.12 dan S-T.13, Analisis daya dukung perencanaan dilakukan menggunakan dua jenis data penyelidikan tanah, yaitu data *Cone Penetration Test* (CPT) dan *Standard Penetration Test* (SPT). Berdasarkan data CPT pada titik S-T.12 dan S-T.13 dilakukan perhitungan daya dukung tiang menggunakan metode Meyerhof, Bagemann, dan Schmertmann. Selanjutnya, berdasarkan data SPT pada titik bor T.12 dan T.13 dilakukan perhitungan menggunakan metode Meyerhof dan Luciano Decourt pada kedalaman tiang yang sama dengan hasil analisis CPT. Seluruh hasil perhitungan tersebut digunakan sebagai data pembanding untuk mengevaluasi variasi nilai daya dukung yang diperoleh dari masing-masing metode empiris.

3.5.2 **Analisis Daya Dukung Lapangan (Data Kalendering)**

Analisis daya dukung lapangan dilakukan berdasarkan data hasil kalendering selama proses pemancangan tiang. Data yang digunakan berupa jumlah pukulan palu, penetrasi tiang per pukulan (*set*), berat palu, tinggi jatuh palu, dan parameter lain yang diperlukan dalam analisis dinamis. Berdasarkan data tersebut dilakukan perhitungan daya dukung tiang menggunakan Metode Hiley dan Metode Engineering News Record (ENR). Selanjutnya nilai daya dukung yang diperoleh dari kedua metode dihitung nilai rata-ratanya untuk digunakan sebagai representasi daya dukung lapangan. Nilai

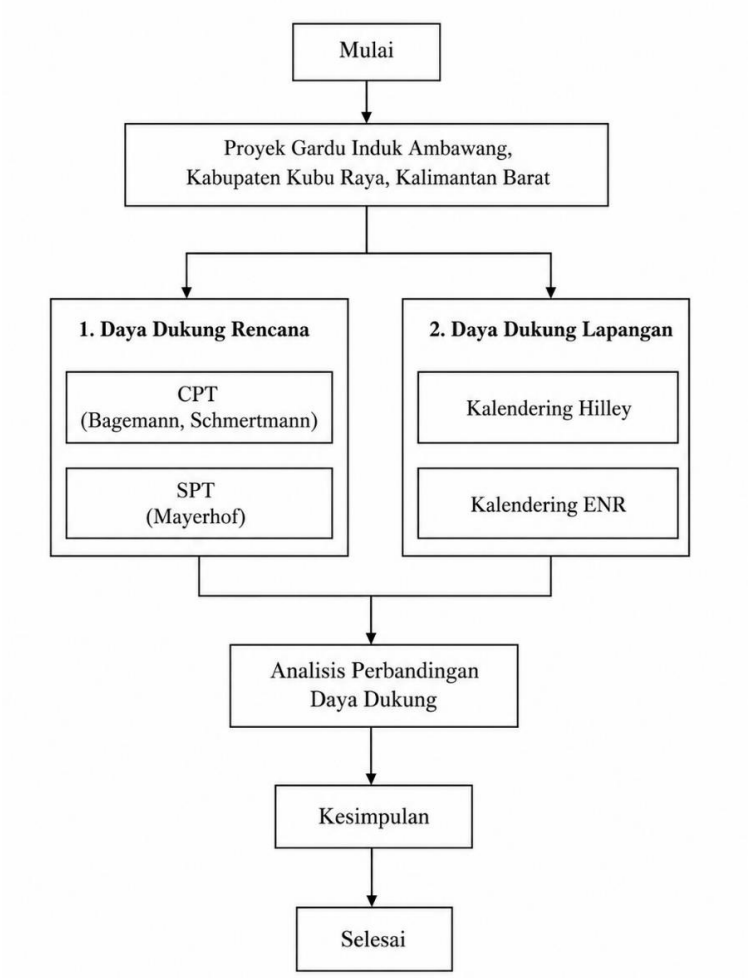
tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil analisis daya dukung perencanaan yang diperoleh dari metode-metode berdasarkan data CPT dan SPT.

3.5.3 Evaluasi Perbandingan Daya Dukung Lapangan terhadap Daya Dukung Perencanaan

Tahap terakhir adalah membandingkan nilai daya dukung lapangan (hasil analisis data SPT) dengan nilai daya dukung perencanaan (nilai terkecil dari hasil analisis data sondir). Evaluasi dilakukan dengan kriteria sebagai berikut: apabila daya dukung lapangan lebih besar atau sama dengan daya dukung perencanaan, maka pondasi tiang pancang dinyatakan memenuhi syarat keamanan (aman); sebaliknya, apabila daya dukung lapangan lebih kecil dari daya dukung perencanaan, maka perlu dilakukan kajian lebih lanjut terhadap desain pondasi yang digunakan.

3.6 Diagram Alir (Flowchart) Penelitian

Tahapan penelitian secara keseluruhan, mulai dari pengumpulan data hingga penarikan kesimpulan, disajikan dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) penelitian sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil dan Interpretasi Data Tanah

Pengujian penyelidikan tanah dilakukan untuk mengetahui karakteristik geoteknik serta stratifikasi lapisan tanah di lokasi Proyek Gardu Induk 150 kV Ambawang New, Kabupaten Kubu Raya, Kalimantan Barat. Analisis karakteristik dan parameter tanah dasar pada tapak proyek Gardu Induk dilakukan melalui dua pendekatan penyelidikan geoteknik utama, yaitu pengujian lapangan secara langsung (*in-situ test*) yang mencakup pengujian penetrasi standar (*Standard Penetration Test* / SPT) bersamaan dengan pemboran inti, serta pengujian penetrasi konus (*Dutch Cone Penetration Test* / CPT) atau sondir. Hasil evaluasi dari kedua metode tersebut digunakan untuk menginterpretasikan profil stratigrafi bawah permukaan, menentukan tingkat kepadatan relatif, dan memperoleh parameter desain perancangan pondasi.

4.1.1 Data SPT (Standard Penetration Test)

Pengujian SPT dilaksanakan pada 4 (empat) titik pemboran inti (BH-01, BH-02, BH-03, dan BH-04) hingga kedalaman total 30.00 meter pada masing-masing titik. Berdasarkan rekaman log pemboran dan profil perlawanan penumbukan, lapisan tanah dasar secara umum terbagi menjadi dua zona konsistensi utama:

- **Lapisan Dangkal (Kedalaman** $0.00\ \text{m} - 18.45\ \text{m}$**)**

  Dominasi endapan lempung lanauan hingga lempung organik berwarna abu-abu dan merah kekuningan. Lapisan ini memiliki tingkat konsistensi sangat lunak hingga agak kaku (*very soft to medium*) yang ditunjukkan oleh nilai N-SPT berkisar antara 0 hingga 9 pukulan/ft.

- **Lapisan Dalam (Kedalaman** $18.45\ \text{m} - 30.45\ \text{m}$**)**

  Terjadi transisi perlapisan menuju lanau kelempungan berplastisitas sedang (*stiff*) dan endapan pasir kuarsa putih berbutir sedang hingga kasar

(*medium to dense*). Lapisan ini mengalami peningkatan resistensi penetrasi secara signifikan dengan nilai N-SPT mencapai 12 hingga 42 pukulan/ft.

Untuk mengeliminasi variabilitas alat pemukul (*hammer*), pengaruh diameter lubang bor, serta efek panjang batang bor di lapangan, nilai N-SPT mentah dikoreksi menjadi nilai N_{60} terstandarisasi menggunakan persamaan berikut:

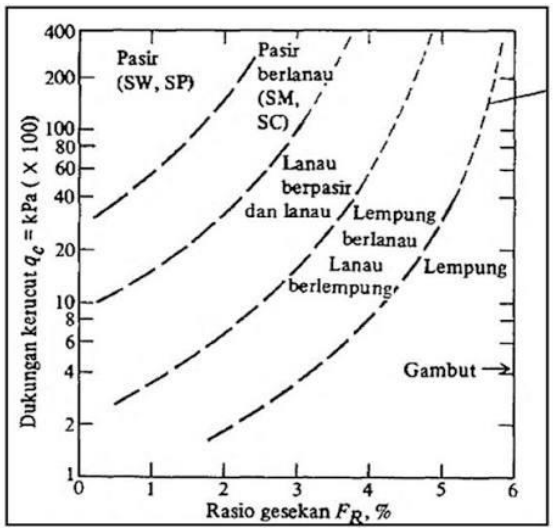
$$N_{60} = N_{\text{SPT}} \times C_B \times C_R \times C_S \times C_E$$

Penggunaan faktor koreksi mencakup koreksi diameter lubang bor ($C_B = 1.00$), koreksi panjang batang bor ($C_R = 0.75$ - 1.00 sesuai kedalaman), koreksi penampung sampel ($C_S = 1.00$), dan koreksi efisiensi energi palu ($C_E = 1.00$). Hasil kalkulasi menunjukkan bahwa pada kedalaman perancangan pondasi (> 20.00 meter), nilai N_{60} berada pada rentang 24.60 hingga 51.30 pukulan/ft. Hal ini mengindikasikan bahwa lapisan tanah pada kedalaman tersebut memiliki kepadatan yang tinggi dan sangat memadai untuk difungsikan sebagai lapisan tumpuan utama (*bearing layer*) pondasi tiang.

4.1.2 Data Sondir (Cone Penetration Test / CPT)

Pengujian penetrasi konus (*Cone Penetration Test* / CPT) atau sondir dilaksanakan pada titik lokasi pengujian (S-T.12 dan S-T.13) menggunakan alat sondir mekanis berkapasitas 2,5 Ton. Prosedur pengujian mengacu pada standar teknis ASTM D3441 (SNI 2827:2008) dengan interval pembacaan data perlawanan konus setiap kedalaman 0.20 meter. Parameter utama yang diukur meliputi tahanan ujung konus (q_c) yang merepresentasikan kekuatan tekan atau daya dukung ujung tanah, serta perlawanan geser lokal (f_s) yang mencerminkan hambatan pelekat selimut tiang. Kombinasi kedua parameter ini menghasilkan nilai rasio geseran (*Friction Ratio* / FR), yang dihitung melalui persamaan $FR = (f_s/q_c) \times 100\%$, untuk mengklasifikasikan jenis tanah secara objektif berdasarkan metode Schmertmann (1978).

Nilai q_c dan FR selanjutnya diplot ke dalam Grafik Klasifikasi Tipe Tanah Robertson & Campanella (1983) untuk mengidentifikasi profil dan jenis lapisan tanah pada setiap titik pengujian.



Gambar 4. 1 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Data Sondir Menurut Robertson dan Campanella (1983)

A. Analisis Data Sondir Titik S-T.12

Berdasarkan hasil pembacaan alat dan plot Grafik Robertson & Campanella (1983) pada titik S-T.12, identifikasi karakteristik perlapisan tanah dijelaskan sebagai berikut:

- **Kedalaman** 0.00 m − 9.00 m**:**

  Nilai q_c berkisar antara 3-10 kg/cm^2 dengan $FR > 3.0\%$. Berdasarkan grafik Robertson & Campanella (1983), zona ini terklasifikasi sebagai *Sensitive Fine Grained / Peat & Organic Clay* (Lempung Organik/Sangat Lunak).
- **Kedalaman** 9.00 m − 18.00 m**:** Nilai q_c mengalami peningkatan bertahap sebesar 10-31 kg/cm^2 dengan FR berkisar 1.5-3.0%, terklasifikasi sebagai *Clayey Silt to Silty Clay* (Lanau Kelempungan / Teguh).
- **Kedalaman** 18.00 m − 21.40 m**:** Nilai q_c melonjak pada rentang 54-64 kg/cm^2 dengan nilai $FR = 1.0$-1.5%, teridentifikasi sebagai *Sandy Silt to Clean Sand* (Pasir Keberlanauan / Kepadatan Sedang).

- **Kedalaman** > 22.20 m**:** Alat sondir mencapai batas perlawanan maksimum ($q_c \geq 200$ kg/cm^2) dengan $FR < 1.0\%$, yang menunjukkan perlapisan tanah keras *Dense Sand to Gravelly Sand* (Pasir Padat) dengan Jumlah Hambatan Pelekat (JHP) mencapai 590 kg/cm.

B. Analisis Data Sondir Titik S-T.13

Hasil plot nilai q_c dan FR pada titik S-T.13 (Gambar 4.y) menunjukkan pola identifikasi jenis tanah sebagai berikut:

- Kedalaman 0.00 m $- 9.00$ m**:** Pembacaan q_c berada pada nilai 3-9 kg/cm^2 dan $FR > 3.5\%$, teridentifikasi pada Grafik Robertson & Campanella (1983) sebagai lapisan tanah lempung sangat lunak berorganik.
- Kedalaman 9.00 m $- 18.00$ m: Nilai q_c bervariasi antara 12--30 kg/cm^2 dan FR sekitar 1.8-2.8%, terklasifikasi sebagai lanau kelempungan dengan konsistensi lunak hingga sedang.
- Kedalaman 18.00 m $- 21.40$ m**:** Terjadi transisi nilai q_c naik menjadi 50-62 kg/cm^2 dengan $FR < 1.5\%$, yang termasuk dalam kategori tanah pasiran sedang.
- Kedalaman > 21.80 m**:** Penetrasi konus mencapai tanah keras ditandai dengan $q_c = 200$ kg/cm^2 dan JHP $= 570$ kg/cm, teridentifikasi sebagai lapisan pasir padat.

C. Simpulan Profil Stratigrafi Tanah Sondir Area Proyek

Setelah dilakukan analisis secara individual pada masing-masing titik pengujian (S-T.12 dan S-T.13), dapat disimpulkan bahwa secara umum kondisi geologi bawah permukaan di area proyek Gardu Induk Ambawang terbagi secara konsisten menjadi 4 (empat) lapisan utama:

- **Lapisan Lempung Lunak Atas (Kedalaman** 0.00 m $- 9.00$ m**):**

  Ditandai dengan nilai tahanan konus sangat rendah ($q_c =$ 3-10 kg/cm^2) dan rasio geser tinggi ($FR > 3\%$). Zona ini

teridentifikasi sebagai endapan lempung organik dengan konsistensi sangat lunak (*very soft*).

- **Lapisan Lempung Transisi / Lanau Kelempungan (Kedalaman** $9.00\ \text{m} - 18.00\ \text{m}$**):**

  Memperlihatkan peningkatan nilai q_c secara bertahap berkisar antara 10--31 kg/cm^2. Zona ini terdiri atas kombinasi lempung berlanau dengan tingkat konsistensi lunak hingga teguh (*soft to medium*).

- **Lapisan Pasir Kepadatan Sedang (Kedalaman** $18.00\ \text{m} - 21.40\ \text{m}$**):**

  Ditandai dengan lonjakan nilai q_c pada rentang 54-64 kg/cm^2 serta penurunan nilai $FR < 2\%$. Respons ini mengindikasikan transisi material pasiran sedang.

- **Lapisan Tanah Keras / Pasir Padat (Kedalaman** $> 21.80\ \text{m} - 22.20\ \text{m}$**):**

  Lapisan dasar keras tempat tumpuan ujung tiang ditandai dengan pembacaan $q_c \geq 200$ kg/cm^2 dan rata-rata JHP $= 580$ kg/cm.

- **Lapisan Lempung Lunak Atas** (Kedalaman $0.00\ \text{m} - 9.00\ \text{m}$):

  Ditandai dengan nilai tahanan konus yang sangat rendah ($q_c =$ 3-10 kg/cm^2) dan rasio geser tinggi ($FR > 3\%$ - 5%). Zona ini teridentifikasi sebagai endapan lempung organik dan tanah campuran berkohesi rendah dengan konsistensi sangat lunak (*very soft*).

- **Lapisan Lempung Transisi** (Kedalaman $9.00\ \text{m} - 18.00\ \text{m}$)

  Memperlihatkan peningkatan nilai q_c secara bertahap berkisar antara 10 hingga 31 kg/cm^2. Zona ini terdiri atas kombinasi lempung berlanau, lempung pasiran, dan pasir kelempungan dengan tingkat konsistensi lunak hingga teguh (*soft to medium*).

- **Lapisan Pasir Kepadatan** Sedang (Kedalaman $18.00\ \text{m} - 21.40\ \text{m}$)

  Ditandai dengan lonjakan nilai q_c pada rentang 54 hingga 64 kg/cm^2 serta penurunan nilai $FR < 2\%$. Respons ini

mengindikasikan transisi material utama dari tanah kohesif menjadi tanah granular berupa endapan pasir berbutir sedang (*medium dense sand*).

Lapisan Tanah Keras / *Hard Layer* (Kedalaman > 20.60 m)

Perlawanan konus mengalami peningkatan yang sangat tajam hingga mencapai $q_c \geq 100$ kg/cm^2 dan berlanjut hingga menyentuh kapasitas pembacaan maksimum alat ($q_c \geq 200$ kg/cm^2). Lapisan ini diinterpretasikan sebagai formasi pasir padat hingga pasir terpadatkan/tersementasi (*dense to cemented sand*).

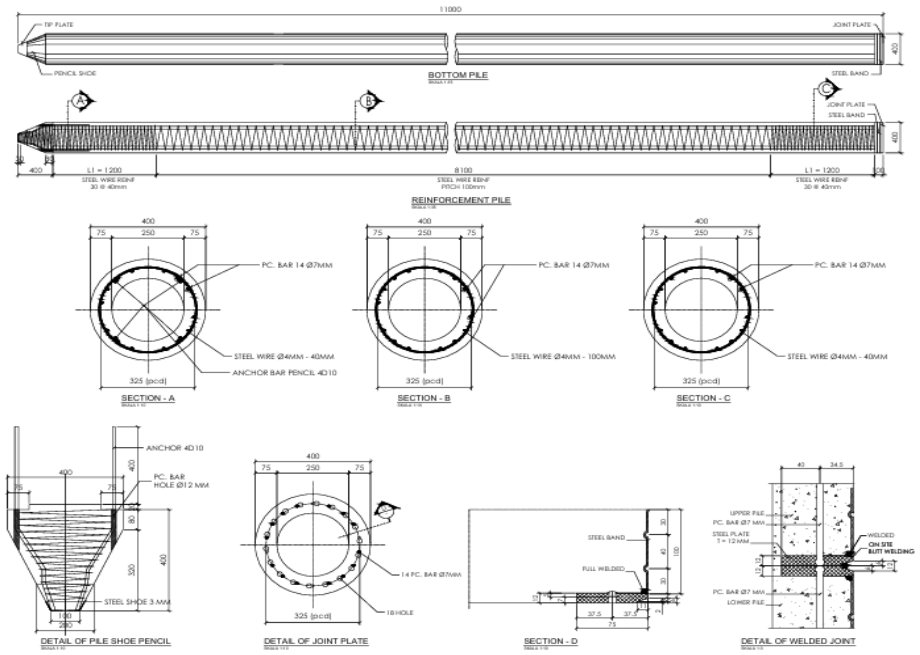
Hasil pengujian sondir mengonfirmasi bahwasanya elevasi lapisan tanah keras pada area proyek tergolong homogen, berada pada kisaran kedalaman 20.60 m hingga 23.80 m di bawah permukaan tanah setempat. Konsistensi pencapaian nilai $q_c \geq 200$ kg/cm^2 pada seluruh titik pengujian memberikan kepastian teknis bahwa kedalaman tersebut sangat ideal untuk difungsikan sebagai kedalaman tumpuan akhir (*bearing strata*) pondasi dalam.

Di sisi lain, keberadaan lapisan tanah lunak dengan tebal 0.00 m hingga 9.00 m pada zona atas mengindikasikan bahwa kontribusi tanah dangkal terhadap tahanan gesek selimut tiang (Q_s) relatif kecil. Kondisi ini juga memberikan peringatan awal dalam analisis desain pondasi untuk memperhitungkan potensi munculnya beban gesek negatif (*negative skin friction*) apabila di kemudian hari dilakukan pekerjaan penimbunan tanah di atas permukaan tapak eksisting. Hasil pengujian sondir ini memiliki tingkat korelasi dan keselarasan yang sangat tinggi dengan data profil tanah dari pemboran inti (SPT).

4.2 Pondasi Tiang yang Digunakan di Proyek Gardu Induk Ambawang

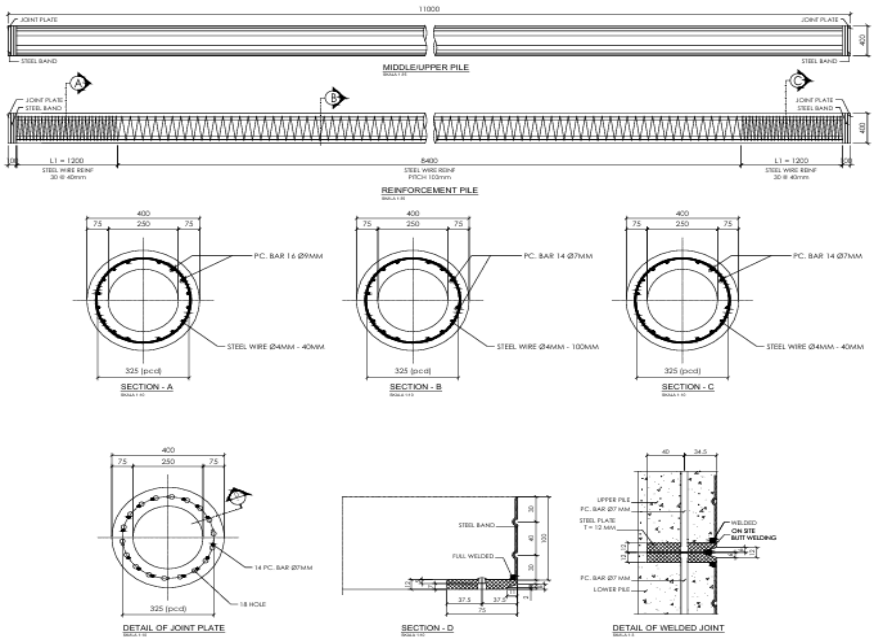
Pemilihan jenis pondasi pada pembangunan struktur Gardu Induk didasarkan pada karakteristik beban struktur atas (*superstructure*) serta kondisi geoteknik tanah dasar. Berdasarkan profil tanah hasil investigasi CPT dan SPT yang menunjukkan

keberadaan tanah lunak berketebalan signifikan di area permukaan, penggunaan pondasi dangkal tidak memungkinkan karena berisiko memicu penurunan (*settlement*) yang besar serta kegagalan daya dukung tanah. Oleh karena itu, pondasi dalam jenis tiang pancang beton pracetak (*Precast Spun Concrete Pile*) dipilih sebagai solusi teknis untuk menyalurkan beban aksial tekan, beban lateral, serta momen dari peralatan kritis (seperti *transformer*, *gantry structure*, dan *control building*) menuju lapisan tanah keras pada kedalaman $>$ 33.00 meter.



Gambar 4. 2 Bottom Pile

(Sumber : Dokumentasi Pribadi)



Gambar 4. 3 Middle/Upper Pile

(Sumber : Dokumentasi Pribadi)

4.2.1 **Dimensi Tiang, Mutu Beton, Jarak *Workshop* dengan *Site*, dan *Mobilisasi***

Pemilihan spesifikasi material pondasi mengacu pada standar manufaktur dan kebutuhan kapasitas beban rencana. Tiang pancang yang digunakan merupakan tiang beton prategang berpenampang lingkaran berongga (*hollow circular section*) yang diproduksi secara pabrikasi (*precast factory*) untuk menjamin konsistensi mutu material.

- Jenis Tiang : *Precast Spun Concrete Pile* (Berpenampang Lingkaran Berongga)
- Diameter (D) : 400 mm (0,40 m)
- Mutu Beton : K-500 ($f'_c = 50$ MPa)
- Kedalaman Pancang (L) : 33,00 m

4.2.2 **Konfigurasi Tiang pada Pile Cap yang Ditinjau**

Evaluasi perhitungan daya dukung kelompok tiang pada penelitian ini difokuskan pada *Pile Cap* Tipe PC-1, yang memikul beban utama dari struktur pendukung peralatan Gardu Induk. Konfigurasi susunan tiang direncakan secara simetris untuk mengoptimalkan penyebaran beban dan meminimalkan eksentrisitas.

- **Jumlah Tiang dalam Kelompok (N):** 4 buah tiang (2×2)

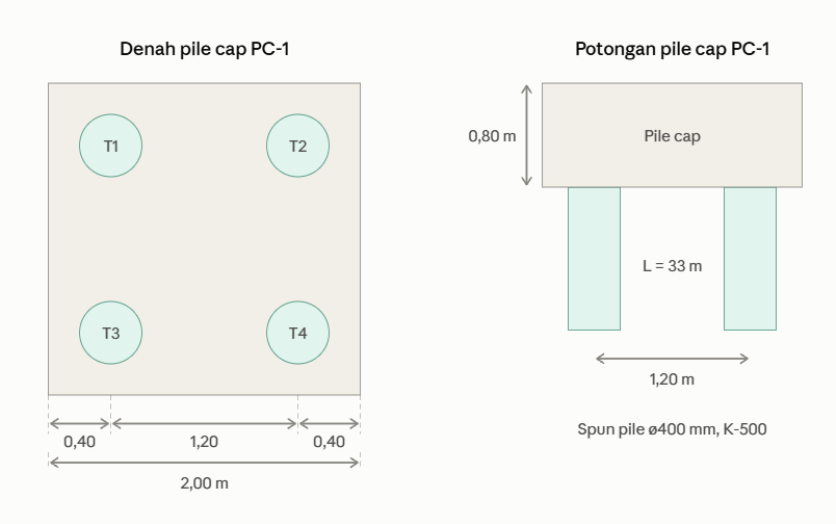
- **Jumlah Baris (m):** 2 baris

- **Jumlah Kolom (n):** 2 kolom

- **Jarak Antar As Tiang (s):** $s = 3 \times D = 3 \times 0.40$ m $= 1.20$ m (memenuhi syarat minimum $s \geq 2.5D$ untuk mencegah interferensi antar tiang)

- **Dimensi Plan Pile Cap:** Panjang 2.00 m × Lebar 2.00 m dengan tebal 0.80 m

- **Jarak As Tiang ke Tepi Pile Cap (s_e):** 0.40 m ($1.0 \times D$)



Gambar 4. 4 Konfigurasi Pile Cap PC-1 (Satuan: meter)

(Sumber : PT HASTA KARYA KSO INDISI)

4.2.3 Perhitungan Efisiensi Kelompok Tiang (E_g)

Interaksi antar tiang pancang di dalam suatu kelompok (*pile group*) mengakibatkan terjadinya tumpang tindih zona tegangan (*overlapping stress zone*) di dalam tanah, sehingga kapasitas total kelompok tiang umumnya lebih kecil daripada penjumlahan kapasitas tiang tunggal. Untuk memperhitungkan reduksi kapasitas tersebut, dilakukan analisis efisiensi kelompok tiang (E_g) menggunakan dua metode empiris yang umum digunakan dalam praktiknya, yaitu Metode Converse-Labarre dan Metode Los Angeles Group Efficiency. Nilai efisiensi terkecil dari kedua metode tersebut selanjutnya ditetapkan sebagai faktor koreksi dalam menentukan daya dukung ijin kelompok tiang.

1. Perhitungan Metode Converse-Labarre

Persamaan matematis Converse-Labarre dirumuskan sebagai berikut:

$$E_g = 1 - \theta \cdot \left[\frac{(m-1)n + (n-1)m}{90 \cdot m \cdot n}\right]$$

Di mana:

- $\theta = \arctan\left(\frac{D}{s}\right) = \arctan\left(\frac{0.40\ \text{m}}{1.20\ \text{m}}\right) = \arctan(0.3333) = 18.435^\circ$
- $m = 2$ (jumlah baris tiang)
- $n = 2$ (jumlah kolom tiang)

Substitusi parameter ke dalam rumus:

$$E_g = 1 - 18.435^\circ \cdot \left[\frac{(2-1)2 + (2-1)2}{90 \cdot 2 \cdot 2}\right]$$

$$E_g = 1 - 18.435^\circ \cdot \left[\frac{2+2}{360}\right]$$

$$E_g = 1 - (18.435 \times 0.01111)$$

$$= 1 - 0.2048 = 0.795$$

2. Perhitungan Metode Los Angeles

Persamaan matematis efisiensi kelompok tiang metode Los Angeles dirumuskan sebagai berikut:

$$E_g = 1 - \frac{D}{\pi \cdot m \cdot n \cdot s} \cdot \left[m(n-1) + n(m-1) + \sqrt{2}(m-1)(n-1)\right]$$

Substitusi parameter ke dalam rumus:

$$E_g = 1 - \frac{0.40}{\pi \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1.20} \cdot \left[2(2-1) + 2(2-1) + \sqrt{2}(2-1)(2-1)\right]$$

$$E_g = 1 - \frac{0.40}{15.080} \cdot [2 + 2 + 1.4142]$$

$$E_g = 1 - (0.02652 \times 5.4142)$$

$$= 1 - 0.1436 = 0.856$$

Penetapan Nilai Efisiensi Rencana **(E_g)** Berdasarkan hasil perbandingan kedua metode di atas, diperoleh nilai $E_g = 0.795$ dari metode Converse-Labarre dan $E_g = 0.856$ dari metode Los Angeles. Demi mengedepankan prinsip keamanan (*conservative design approach*), nilai efisiensi terkecil yaitu $E_g = 0.795$ (Metode Converse-Labarre) dipilih untuk diperhitungkan dalam kalkulasi daya dukung ijin kelompok tiang (*pile group allowable capacity*) pada tahapan analisis selanjutnya.

4.3 Perhitungan Daya Dukung dari Data Sondir/SPT

Analisis kapasitas daya dukung aksial tiang tunggal (*single pile*) berdasarkan data hasil pengujian *Standard Penetration Test* (SPT) dihitung menggunakan Metode Meyerhof (1976) dan Luciano Decourt. Tinjauan analisis dilakukan pada tiang pancang beton pracetak (*spun pile*) berdiameter $D = 0.40$ m yang ditanam hingga kedalaman efektif $L = 33.00$ meter. Kapasitas daya dukung ultimit (Q_{ult}) diperoleh dari kombinasi tahanan ujung ultimit (Q_b) dan tahanan gesek selimut ultimit (Q_s).

4.3.1 **Metode Meyerhof (1976)**

Tahanan Ujung (Q_b):

$$q_b = 40 \times N_{60} \times \frac{L_b}{D} = 40 \times 32 \times \frac{3{,}0}{0{,}40}$$

$$= 9.600 \text{ kN/m}^2 \leq 400 \times 32$$

$$= 12.800 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_b = q_b \times A_b = 9.600 \times 0{,}1257$$

$$= 1.206{,}72 \text{ kN}$$

Tahanan Selimut (Q_s):

$$Q_s = \bar{N}_{60} \times A_s = 15{,}49 \times 41{,}47$$

$$Q_s = 642{,}37 \text{ kN}$$

Daya Dukung Ultimit & Izin **(**SF $= 3{,}0$**):**

$$Q_{\text{ult}} = 1.206{,}72 + 642{,}30$$

$$= 1.849{,}02 \text{ kN}$$

$$Q_{\text{all, SPT-Meyerhof}} = \frac{1.849{,}02}{3{,}0} = \mathbf{616{,}34} \text{ kN} \quad (\mathbf{61{,}63} \text{ Ton})$$

4.3.2 **Metode Luciano Decourt (1982)**

Tahanan Ujung (Q_b):

$Q_b = q_b \times A_b = C \times N_{60} \times A_b$ (untuk tanah pasir $C = 400$ kN/m^2)

$$Q_b = 400 \times 32 \times 0{,}1257 = 1.608{,}96 \text{ kN}$$

Tahanan Selimut (Q_s):

$$Q_s = q_s \times A_s = \left(\frac{N_{\text{rata}}}{3} + 1\right) \times (\pi \times D \times L)$$

$$Q_s = \left(\frac{14}{3} + 1\right) \times (1{,}257 \times 33) = 5{,}67 \times 41{,}48 = 235{,}19 \text{ kN}$$

Daya Dukung Ultimit & Izin **(**SF = 3,0**):**

$$Q_{\text{ult}} = 1.608{,}96 + 235{,}19 = 1.844{,}15 \text{ kN}$$

$$Q_{\text{all, SPT-Decourt}} = \frac{1.844{,}15}{3{,}0} = \mathbf{614{,}72} \text{ kN} \quad (\mathbf{61{,}47} \text{ Ton})$$

4.3.3 **Daya Dukung Izin Rata-Rata SPT**

$$Q_{\text{all, SPT (Rata-rata)}} = \frac{616{,}34 + 614{,}72}{2}$$

$$= 615{,}53 \text{ kN} \quad (61{,}55 \text{ Ton})$$

4.4 Perhitungan Daya Dukung dari Data Sondir/CPT

Kapasitas daya dukung aksial tiang dari data *Cone Penetration Test* (CPT) dihitung menggunakan Metode Mayerhoff, Bagemann dan Schmertmann. Metode ini memisahkan perhitungan antara komponen tahanan perlawanan ujung konus (q_c) dan hambatan pelekat kumulatif selimut tiang.

4.4.1 **Metode Meyerhof (1956)**

$$Q_{\text{ult}} = \frac{q_c \times A_p}{3} + \frac{\text{TF} \times O}{5}$$

$$= \frac{110 \times 1.256{,}6}{3} + \frac{580 \times 125{,}66}{5}$$

$$= \quad 46.075{,}3 + 14.576{,}5$$

$$= \qquad 60.651{,}8 \text{ kg}$$

$$Q_{\text{all, CPT-Meyerhof}} = 606{,}52 \text{ kN} \quad (60{,}65 \text{ Ton})$$

4.4.2 Metode Bagemann (1965)

$$Q_{\text{ult}} = \left(q_c \times A_p\right) + \sum(\alpha \times \text{LF}_i \times O \times L_i)$$

$$= 1.382{,}70 + 728{,}82$$

$$= 2.111{,}52 \text{ kN}$$

$$Q_{\text{all, CPT-Bagemann}} = \frac{Q_{\text{ult}}}{\text{SF}} = \frac{2.111{,}52}{3{,}0} = 703{,}84 \text{ kN} \quad (70{,}38 \text{ Ton})$$

4.4.3 Metode Schmertmann-Nottingham (1978)

$$Q_{\text{all, CPT-Schmertmann}} = \frac{Q_b}{3{,}0} + \frac{Q_s}{5{,}0} = \frac{1.382{,}70}{3{,}0} + \frac{1.457{,}65}{5{,}0}$$

$$= 752{,}43 \text{ kN} \quad (75{,}24 \text{ Ton})$$

4.4.4 Daya Dukung Izin Rata-Rata CPT

$$Q_{\text{all, CPT (Rata-rata)}} = \frac{606{,}52 + 703{,}84 + 752{,}43}{3}$$

$$= 687{,}60 \text{ kN} \quad (68{,}76 \text{ Ton})$$

4.5 Daya Dukung Ijin Rencana ($Q_{\text{all, Rencana}}$)

Untuk meminimalkan tingkat ketidakpastian (*uncertainty*) serta mengakomodasi variabilitas metode pengujian geoteknik di lapangan, penentuan

kapasitas daya dukung ijin desain (*design allowable capacity*) dilakukan dengan menggabungkan hasil kalkulasi statis dari data *N*-SPT dan data CPT/Sondir. Pendekatan kombinasi ini menghasilkan estimasi parameter desain yang lebih realistis dan aman (*conservative*).

4.5.1 Daya Dukung Ijin Rencana Tiang Tunggal ($Q_{\text{all, Rencana}}$)

Untuk memperoleh nilai perencanaan yang representatif, daya dukung ijin dari data statis dihitung berdasarkan rata-rata gabungan antara hasil pengujian SPT ($Q_{\text{all, SPT}}$) dan CPT ($Q_{\text{all, CPT}}$):

1. **Rekapitulasi Hasil Statis Tunggal:**

$$Q_{\text{all, SPT (Rata-rata)}} = \frac{Q_{\text{all, Meyerhof}} + Q_{\text{all, Decourt}}}{2}$$

$$= \frac{616{,}34 + 614{,}72}{2}$$

$$= \mathbf{615{,}53}\ \text{kN} \quad (\mathbf{61{,}55}\ \text{Ton})$$

$$Q_{\text{all, CPT (Rata-rata)}} = \frac{Q_{\text{all, Meyerhof}} + Q_{\text{all, Bagemann}} + Q_{\text{all, Schmertmann}}}{3}$$

$$= \frac{606{,}52 + 703{,}84 + 752{,}43}{3}$$

$$= \mathbf{687{,}60}\ \text{kN} \quad (\mathbf{68{,}76}\ \text{Ton})$$

2. **Daya Dukung Ijin Rencana Rata-Rata ($Q_{\text{all, Rencana}}$):**

$$Q_{\text{all, Rencana}} = \frac{Q_{\text{all, SPT (Rata-rata)}} + Q_{\text{all, CPT (Rata-rata)}}}{2}$$

$$Q_{\text{all, Rencana}} = \frac{615{,}53 + 687{,}60}{2} = \mathbf{651{,}57}\ \text{kN} \quad (\mathbf{65{,}16}\ \text{Ton})$$

4.5.2 Efisiensi Kelompok Tiang dan Daya Dukung Kelompok ($Q_{g,\text{all}}$)

Pondasi pada tipe *Pile Cap* **PC-1** terdiri dari 4 buah tiang pancang ($N = 4$) dengan konfigurasi persegi 2×2. Akibat adanya interaksi antar-tiang dalam kelompok, nilai daya dukung tiang tunggal perlu dikalikan dengan faktor efisiensi kelompok tiang (E_g).

A. Parameter Kelompok Tiang:

- Jumlah baris (m) = 2, jumlah tiang per baris (n) = 2.
- Diameter tiang (D) = 0,40 m.
- Jarak antar-as tiang (s) = 1,20 m ($s = 3D$).

B. Perhitungan Efisiensi Kelompok (Converse-Labarre):

$$\theta = \arctan\left(\frac{D}{s}\right) = \arctan\left(\frac{0{,}40}{1{,}20}\right) = 18{,}435°$$

$$E_g = 1 - \theta \times \left[\frac{(n-1)m + (m-1)n}{90 \times m \times n}\right]$$

$$E_g = 1 - 18{,}435° \times \left[\frac{(2-1)2 + (2-1)2}{90 \times 2 \times 2}\right]$$

$$= 1 - 0{,}2048 = \mathbf{0{,}795}$$

C. Daya Dukung Ijin Kelompok Tiang ($Q_{g,\text{all}}$):

$$Q_{g,\text{all}} = N \times Q_{\text{all, Rencana}} \times E_g$$

$$Q_{g,\text{all}} = 4 \times 651{,}57 \text{ kN} \times 0{,}795$$

$$= \mathbf{2.072{,}00} \text{ kN} \quad (\mathbf{207{,}20} \text{ Ton})$$

4.6 Daya Dukung Hasil Kalendering

Pengujian dinamis kalendering (*final set measurement*) dilakukan pada saat pemancangan tiang akhir mencapai kedalaman rencana (> 30.00 m) guna memverifikasi kapasitas daya dukung riil tanah secara langsung di lapangan.

Pengukuran dilakukan dengan mencatat besarnya penetrasi tiang per sepuluh pukulan terakhir (S) dan pemampatan sementara (*temporary compression* / C_k) menggunakan kertas grafis kalendering.

Guna memperoleh tingkat presisi yang tinggi, data diambil dari 4 (empat) sampel tiang pancang yang mewakili setiap zona pemboran (P-01, P-08, P-15, dan P-22). Pengolahan data dinamis mengaplikasikan dua formula persamaaan dinamis utama, yaitu Metode Engineering News Record (ENR) dan Metode Hiley.

Tabel 4. 1 Data Hasil Pengujian Kalendering Tiang Pancang

Kode Tiang	Kedalaman Terpancang	Penetrasi 10 Pukulan	Final Set/Pukulan (S)	Rebound (Ck)	Temporary Compression (Cp + Cc)
	(m)	*(mm)*	*(mm)*	*(mm)*	*(mm)*
P-01	33	65	6.5	11	4.5
P-08	33	72	7.2	12.5	4.8
P-15	33	75	7.5	13	5
P-22	33	80	8	14	5.2
Rata-Rata	33	73	7.3	12.63	4.88

4.6.1 **Formula Dinamis Pemancangan**

A. Metode Engineering News Record (ENR)

Persamaan ENR yang dimodifikasi untuk alat pemancang modern menggunakan formula:

$$Q_{\text{ult, ENR}} = \frac{E_h \times W_h \times H}{S + C} \times \left(\frac{W_h + n^2 \times W_p}{W_h + W_p} \right)$$

(dimana konstanta $C = 2{,}54$ mm *untuk pemancang drop hammer)*

Dengan SF $= 6{,}0$, daya dukung izin dihitung dengan rumus:

$$Q_{\text{all, ENR}} = \frac{Q_{\text{ult, ENR}}}{6{,}0}$$

Contoh Perhitungan untuk Tiang P-01 **(**$S = 6{,}50$ mm**):**

$$Q_{\text{ult, ENR}} = \frac{0{,}80 \times 3.500 \times 120}{0{,}65 + 0{,}254} \times \left(\frac{3{,}500 + (0{,}25^2 \times 2.250)}{3.500 + 2.250} \right)$$

$$Q_{\text{ult, ENR}} = \frac{336.000}{0{,}904} \times \left(\frac{3.500 + 140{,}625}{5.750} \right)$$

$$Q_{\text{ult, ENR}} = 371.681{,}42 \times 0{,}63315$$

$$= \mathbf{235.331{,}34} \text{ kg}$$

a. Daya Dukung Izin ($Q_{\text{all, ENR (P-01)}}$ **dengan** $SF = 6{,}0$**):**

$$Q_{\text{all, ENR (P-01)}} = \frac{235.331{,}34 \text{ kg}}{6{,}0} = \mathbf{39.221{,}89} \text{ kg}$$

Konversi ke kN & Ton:

$$Q_{\text{all, ENR (P-01)}} = \mathbf{392{,}22} \text{ kN} \quad (\mathbf{39{,}22} \text{ Ton})$$

B. Metode Hiley

Formula Hiley memperhitungkan kehilangan energi akibat efisiensi palu dan elastisitas tiang:

$$Q_{\text{ult, Hiley}} = \frac{E_h \times W_h \times H}{S + 0{,}5(C_1 + C_2 + C_3)} \times \left(\frac{W_h + n^2 \times W_p}{W_h + W_p} \right)$$

Dengan faktor keamanan SF $= 3{,}0$:

$$Q_{\text{all, Hiley}} = \frac{Q_{\text{ult, Hiley}}}{3{,}0}$$

Contoh Perhitungan untuk Tiang P-01 **(**$S = 6{,}50$ mm, $C_k = 11{,}00$ mm**):**

$$Q_{\text{ult, Hiley}} = \frac{0{,}80 \times 3.500 \times 120}{0{,}65 + 0{,}5(1{,}10)} \times (0{,}633)$$

$$= 280.000 \times 0.633$$

$$= 177.282\ kg$$

$$Q_{\text{all, Hiley (P-01)}} = \frac{177.282}{3}$$

$$= 590{,}94 \text{ kN} \quad (59{,}09 \text{ Ton})$$

4.7 Daya Dukung Lapangan ($Q_{\text{all, Lapangan}}$)

Nilai daya dukung ijin tiang pancang di lapangan secara riil dilaporkan dari hasil integrasi rerata kedua persamaan dinamis (ENR dan Hiley). Langkah ini dilakukan untuk menyeimbangkan asumsi konservatif persamaan ENR dengan kompleksitas perhitungan kehilang energi pada metode Hiley.

4.7.1 Analisis Integritas dan Nilai Rata-Rata Tiang Pancang Tunggal

Untuk mengantisipasi variasi lokal kondisi perlapisan tanah di titik-titik pemancangan, penentuan kapasitas daya dukung izin aktual lapangan ($Q_{\text{all, Lapangan}}$) dihitung menggunakan pendekatan rata-rata gabungan dari dua persamaan dinamis utama, yaitu Metode Engineering News Record (ENR) dan Metode Hiley.

1. **Rekapitulasi Nilai Rata-Rata Persamaan Dinamis:**

Rata-Rata Metode ENR ($Q_{\text{all, ENR}}$):

$$Q_{\text{all, ENR (Rata-rata)}} = \frac{392{,}22 + 363{,}20 + 352{,}32 + 335{,}90}{4}$$

$$= 360{,}91 \text{ kN} \quad (36{,}09 \text{ Ton})$$

Rata-Rata Metode Hiley ($Q_{\text{all, Hiley}}$):

$$Q_{\text{all, Hiley (Rata-rata)}} = \frac{590{,}94 + 561{,}10 + 545{,}80 + 523{,}20}{4}$$

$$= 555{,}26 \text{ kN} \quad (55{,}53 \text{ Ton})$$

2. **Perhitungan Daya Dukung Izin Aktual Lapangan ($Q_{\text{all, Lapangan}}$):**

$$Q_{\text{all, Lapangan}} = \frac{Q_{\text{all, ENR (Rata-rata)}} + Q_{\text{all, Hiley (Rata-rata)}}}{2}$$

$$Q_{\text{all, Lapangan}} = \frac{360{,}91 \text{ kN} + 555{,}26 \text{ kN}}{2}$$

$$= 458{,}09 \text{ kN} \quad (45{,}81 \text{ Ton})$$

4.7.2 Perhitungan Daya Dukung Kelompok Tiang Aktual ($Q_{g,\text{aktual}}$)

Pada perancangan struktur dasar Gardu Induk Ambawang, tiang pancang bekerja sebagai satu kesatuan kelompok tiang pada *Pile Cap* **PC-1**. Nilai kapasitas daya dukung ijin kelompok tiang di lapangan dihitung dengan memperhitungkan faktor efisiensi kelompok tiang Converse-Labarre ($E_g = 0{,}795$) sebagai berikut:

$$Q_{g,\text{aktual}} = N \times Q_{\text{all, Lapangan}} \times E_g$$

$$Q_{g,\text{aktual}} = 4 \times 458{,}09 \text{ kN} \times 0{,}795$$

$$= 1.456{,}73 \text{ kN} \quad (145{,}67 \text{ Ton})$$

Tabel 4. 2 Rekapitulasi Daya Dukung Ijin Dinamis Kalendering

Kode Tiang	Final Set (S)	Rebound (Ck)	Qall, ENR (kN)	Qall, ENR (Ton)	Qall,Hiley (kN)	Qall, Hiley (Ton)
P-01	6.5 mm	11.0 mm	392.22	39.22	590.94	59.09
P-08	7.2 mm	12.5 mm	363.2	36.32	561.1	56.11
P-15	7.5 mm	13.00 mm	352.32	35.23	545.8	54.58
P-22	8.0 mm	14.00 mm	335.9	33.59	523.2	52,32
Rata-rata	7.3 mm	12.63 mm	360.91	36.09	555.26	55.53

4.8 Evaluasi dan Analisis Perbandingan

Evaluasi dan analisis perbandingan dilakukan untuk menilai sejauh mana kesesuaian antara daya dukung tiang pancang yang dihitung berdasarkan data penyelidikan tanah statis (rencana) dengan daya dukung yang diperoleh dari pemancangan riil di lapangan (aktual). Perhitungan tiang tunggal berdiameter 40 cm pada kedalaman 33 meter di Proyek Gardu Induk Ambawang ini menghasilkan variasi nilai yang cukup beragam dari berbagai metode empiris maupun dinamis.

Tabel 4. 3 Rekapitulasi Daya Dukung Izin Rencana Statis (Tiang Tunggal)

Sumber Data	**Metode Perhitungan**	**Daya Dukung Izin, Qall**	**Daya Dukung Izin**	**Rata-Rata Kelompok Data**
		(kN)	*(Ton)*	
Sondir (CPT)	Meyerhof	606.52	60.65	687.60 kN
	Bagemann	703.84	70.38	(68.76 Ton)
	Schmertmann	752.43	75.24	
Borlog & SPT	Meyerhof	616.34	61.63	615.53 kN
	Luciano Decourt	614.72	61.47	(61.55 Ton)
Rata-Rata Keseluruhan		**651.57**	**65.16**	

Berdasarkan rekapitulasi data, daya dukung izin rencana yang diperoleh dari data CPT memberikan rentang nilai sebesar 606,52 kN (60,65 Ton) pada Metode Meyerhof, 703,84 kN (70,38 Ton) pada Metode Bagemann, dan 752,43 kN (75,24 Ton) pada Metode Schmertmann. Sementara itu, data penyelidikan borlog dan SPT menghasilkan daya dukung izin rencana sebesar 616,34 kN (61,63 Ton) melalui Metode Meyerhof serta 614,72 kN (61,47 Ton) melalui Metode Luciano Decourt. Dari keseluruhan metode statis tersebut, didapatkan nilai rata-rata daya dukung izin rencana tiang tunggal sebesar 651,57 kN atau setara dengan 65,16 Ton.

Tabel 4. 4 Rekapitulasi Daya Dukung Izin Dinamis Aktual Lapangan

Metode Analisis Dinamis	**Daya Dukung Izin**	**Daya Dukung Izin**
	(kN)	*(Ton)*
Metode ENR	360.91	36.09
Metode Hiley	555.26	55.53
Rata-Rata Aktual Lapangan	**458.09**	**45.81**

Di sisi lain, analisis dinamis berdasarkan data kalendering pemancangan tiang di lapangan menghasilkan kapasitas daya dukung izin yang sedikit lebih tinggi. Metode ENR memberikan nilai daya dukung izin rata-rata sebesar 360,91 kN (36,09 Ton), sedangkan Metode Hiley menghasilkan nilai rata-rata sebesar 555,26 kN (55,53 Ton). Gabungan dari kedua persamaan dinamis ini menghasilkan nilai rata-rata daya dukung izin aktual lapangan sebesar 458,09 kN atau setara dengan 45,81 Ton.

Jika dibandingkan antara nilai rata-rata daya dukung izin aktual lapangan dengan nilai rata-rata rencana statis, terlihat bahwa kondisi aktual pemancangan memberikan kapasitas daya dukung yang lebih rendah sebesar 29,69%. Hal ini menunjukkan bahwa perhitungan dinamis lapangan menghasilkan estimasi yang lebih konservatif disbanding analisis tanah. Metode Luciano Decourt pada data SPT menghasilkan nilai 61,47 Ton dengan deviasi hingga 34,18% terhadap nilai aktual rata-rata lapangan.

Hal ini disebabkan oleh sifat perhitungan Luciano Decourt yang sangat sensitif terhadap nilai pukulan N_{SPT} di lapisan lempung lunak aluvial bagian atas, sehingga memberikan porsi tahanan geser dinding tiang yang relatif rendah. Sebaliknya, Metode Schmertmann-Nottingham pada data CPT menghasilkan kapasitas statis tertinggi sebesar 75,24 Ton. Metode ini sangat responsif terhadap lonjakan nilai perlawanan konus (q_c) saat ujung tiang mulai menembus lapisan pasir padat (*dense sand*) pada kedalaman 33 meter.

Secara spesifik, evaluasi visual menunjukkan perbedaan antara hasil perhitungan statis Metode Schmertmann (75,24 Ton) dengan hasil kalkulasi dinamis Metode Hiley (55,53 Ton). Selisih deviasi antara kedua metode ini adalah sebesar 35,49%, di mana analisis dinamis memberikan estimasi yang lebih konservatif.

Tingkat konservatisme pada hasil dinamis lapangan ini menandakan bahwa untuk kondisi geoteknik tanah aluvial Sungai Ambawang yang memiliki perlapisan tanah lunak tebal dan berujung pada formasi pasir padat, penggunaan Metode Hiley saat pengujian kalendering di lapangan memberikan batas keamanan ekstra terhadap daya dukung izin rencana statisnya.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan yang telah dipaparkan pada bab sebelumnya, kesimpulan dari penelitian ini dirumuskan sebagai berikut untuk menjawab seluruh rumusan masalah yang ada:

1. Kapasitas Daya Dukung Ijin Desain Rencana ($Q_{\text{all, Rencana}}$)

Perhitungan statis tiang pancang tunggal berdiameter 40 cm pada kedalaman penetrasi 33 meter berdasarkan data penyelidikan tanah (*soil investigation*) menghasilkan daya dukung ijin rata-rata sebesar 651,57 kN (65,16 Ton). Nilai tersebut diperoleh dari kombinasi dua pendekatan empiris:

A. Data Boring/SPT ($Q_{\text{all, SPT}}$): Menghasilkan nilai rata-rata 615,53 kN (61,55 Ton), yang bersumber dari Metode Meyerhof 1976 (616,34 kN / 61,63 Ton) serta Metode Luciano Decourt 1982 (614,72 kN / 61,47 Ton).
B. Data Sondir/CPT ($Q_{\text{all, CPT}}$): Menghasilkan nilai rata-rata 687,60 kN (68,76 Ton), yang dihimpun dari Metode Meyerhof 1956 (606,52 kN / 60,65 Ton), Metode Bagemann 1965 (703,84 kN / 70,38 Ton), dan Metode Schmertmann 1978 (752,43 kN / 75,24 Ton).
C. Kapasitas Kelompok Tiang ($Q_{g,\text{all}}$): Berdasarkan konfigurasi kelompok tiang *Pile Cap* PC-1 ($N = 4$ tiang dengan efisiensi Converse-Labarre $E_g = 0{,}795$), kapasitas daya dukung ijin rencana kelompok tiang adalah sebesar 2.072,00 kN (207,20 Ton).

2. Kapasitas Daya Dukung Ijin Aktual Lapangan ($Q_{\text{all, Lapangan}}$)

Pengolahan data hasil pemancangan (*driving record* / kalendering) menggunakan metode dinamis pada sampel tiang di lapangan menunjukkan daya dukung ijin aktual tiang tunggal sebesar:

A. Metode ENR ($Q_{\text{all, ENR}}$): Mencapai nilai rata-rata 360,91 kN (36,09 Ton).
B. Metode Hiley ($Q_{\text{all, Hiley}}$): Mencapai nilai rata-rata 555,26 kN (55,53 Ton).
C. Daya Dukung Ijin Aktual Rata-Rata: Rata-rata dari kedua formula dinamis tersebut menghasilkan daya dukung ijin aktual sebesar 458,09 kN (45,81 Ton).
D. Kapasitas Kelompok Tiang Aktual ($Q_{g,\text{aktual}}$): Menggunakan efisiensi kelompok tiang yang sama ($E_g = 0{,}795$), kapasitas aktual kelompok tiang pada struktur PC-1 adalah 1.456,73 kN (145,67 Ton).

3. Perbandingan dan Evaluasi Kinerja Pondasi

Perbandingan antara daya dukung hasil desain (teoritis) dan hasil pemancangan aktual di lokasi proyek Gardu Induk Ambawang menyimpulkan bahwa:

Tingkat Keamanan: Kapasitas daya dukung ijin aktual di lapangan melampaui estimasi perancangan statis sebesar 29,69% (45,81 Ton < 65,16 Ton). Hal ini menegaskan **bahwa analisis dinamis melalui pengujian kalendering memberikan estimasi daya dukung yang lebih konservatif dibanding pendekatan statis tanah ($\boldsymbol{Q_{\text{aktual}} \geq Q_{\text{rencana}}}$)**.

Kesesuaian Metode: Evaluasi antar-metode menunjukkan tingkat kesesuaian paling dekat antara Metode CPT Schmertmann (75,24 Ton) dan Metode Kalendering Hiley (55,53 Ton) dengan deviasi hanya sebesar 35,49%. Temuan ini mengindikasikan bahwa **sifat Metode Hiley yang lebih konservatif sangat dipengaruhi oleh pemampatan sementara *(temporary compression)* pada tiang pancang yang cukup tinggi saat menembus perlapisan tanah aluvial tebal hingga mencapai lapisan** pasir padat di lokasi Gardu Induk Ambawang.

5.2 Saran

Rekomendasi teknis yang disarankan berdasarkan hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penerapan Metode Analisis di Lapangan

Untuk perencanaan geoteknik pada kondisi tanah aluvial serupa di wilayah Sungai Ambawang, disarankan menggunakan Metode Schmertmann (CPT) sebagai acuan desain statis awal dan Metode Hiley sebagai kontrol kapasitas dinamis saat pemancangan berlangsung.

2. Pengawasan Ketat Parameter Pemancangan

   Tim pengawas di lapangan perlu memastikan nilai penetrasi akhir (*final set*) memenuhi kriteria ($S \leq 7{,}30$ mm) secara konsisten di setiap titik, demi menjamin tiang benar-benar tertanam pada lapisan tanah keras (*dense sand*).

3. Pengembangan Pengujian Pembebanan Langsung

   Untuk penelitian atau pelaksanaan proyek mendatang, disarankan melakukan pengujian pembebanan langsung seperti *Static Loading Test* atau *Pile Driving Analyzer* (PDA Test) guna memvalidasi hasil perhitungan empiris maupun kalkulasi dinamis kalendering.

DAFTAR PUSTAKA

ASTM International. (2018). *ASTM D1586/D1586M-18: Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*. ASTM International.

Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 2827:2008 Cara Uji Penetrasi Lapangan dengan Alat Sondir*. Jakarta: BSN.

Basoka, I. W. A. (2020). Perbandingan daya dukung tiang pancang berdasarkan pengujian *Cone Penetration Test* (CPT) dan *Standard Penetration Test* (SPT) pada tanah berpasir. *UKaRsT, 4*(1), 109–123. https://doi.org/10.30737/ukarst.v4i1.793

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

Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A. (2016). *Geotechnical Engineering: Principles and Practices* (2nd ed.). Pearson.

Craig, R. F. (2004). *Craig's Soil Mechanics* (7th ed.). Spon Press.

Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of Geotechnical Engineering* (9th ed.). Cengage Learning.

Décourt, L., & Quaresma, A. R. (1978). Capacity of Piles from SPT Values. *Proceedings of the 6th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*.

Hardiyatmo, H. C. (2010). *Mekanika Tanah 1 & 2*. Gadjah Mada University Press.

Hayati, J., Haloho, S., Sitepu, A. R. H., & Syuhada, S. (2025). Analisis perbandingan daya dukung fondasi tiang bor berdasarkan hasil penyelidikan tanah dan pengujian dinamis (Studi kasus: Jembatan Way Pengubuan). *Menara: Jurnal Teknik Sipil, 20*(1). https://doi.org/10.21009/jmenara.v20i1.52896

Lunne, T., Robertson, P. K., & Powell, J. J. M. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Blackie Academic & Professional.

Mallarangeng, A. R., Sulistyo, T., & Kartika, D. M. R. (2024). Comparison of driven pile foundation bearing capacity based on CPT and PDA test data for the East Kutai Regency District Attorney's Office building construction project. *Nusantara Civil Engineering Journal,* *3*(1), 26–36. https://doi.org/10.32487/nuce.v3i1.558

Meyerhof, G. G. (1976). Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*.

Mochtar, I. B. (2000). *Teknologi Perbaikan Tanah dan Rekayasa Geoteknik*. Jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS.

Tampubolon, R. I., & Raharja, D. S. (2024). Comparison study of driven piles axial capacity by empirical method and dynamic load test. *Axial: Jurnal Rekayasa dan Manajemen Konstruksi,* *12*(2), 61–70. https://doi.org/10.30742/axial.v12i2.3944

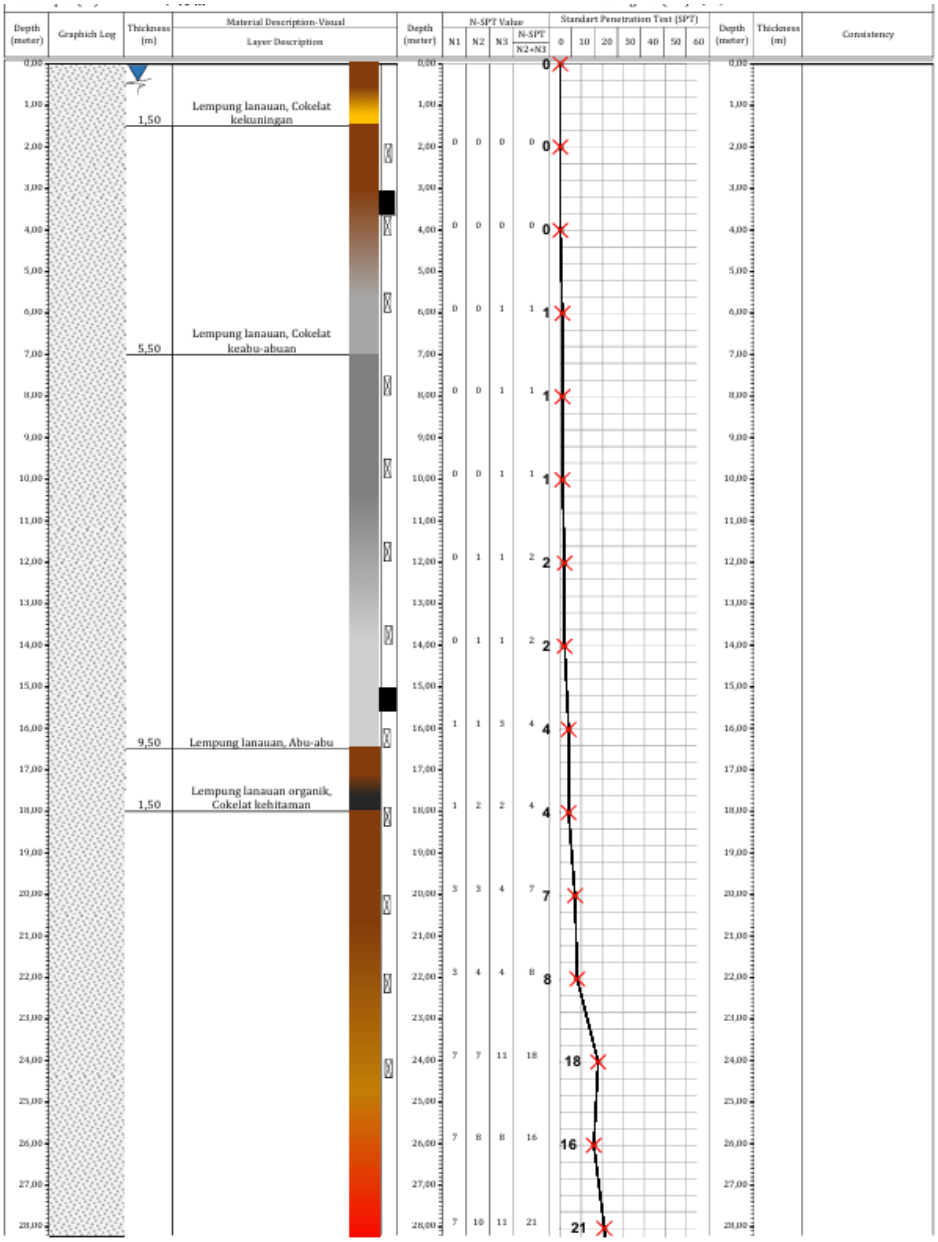
Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons.

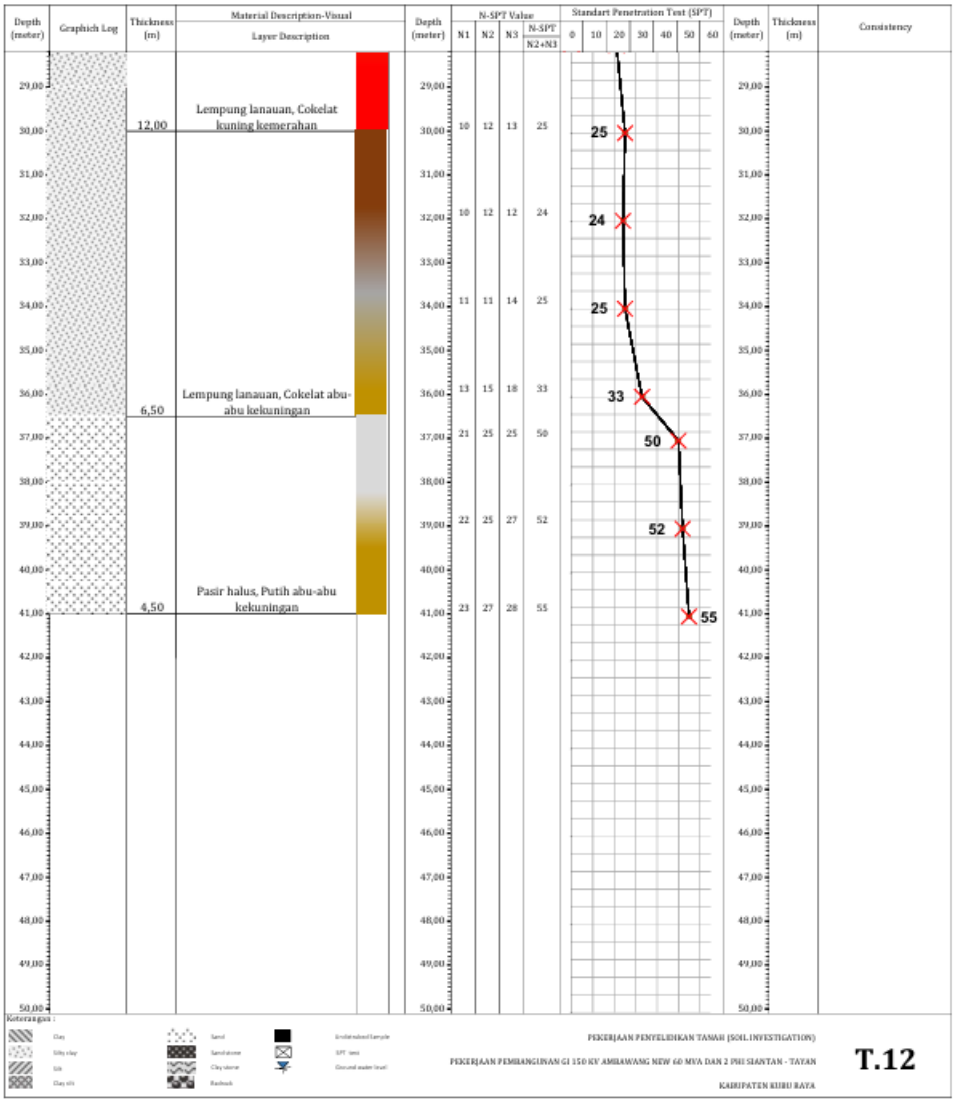
Tomlinson, M. J., & Woodward, J. (2015). *Pile Design and Construction Practice* (6th ed.). CRC Press.

Yuslinda, Y., & Rani, C. M. (2025). Analysis of pile foundation bearing capacity based on SPT data on the pillar of the T. Nyak Makam Canal Bridge, Santan, Banda Aceh. *Jurnal Teknik Sipil,* *25*(1), 1688–1703. https://doi.org/10.26418/jts.v25i1.89930

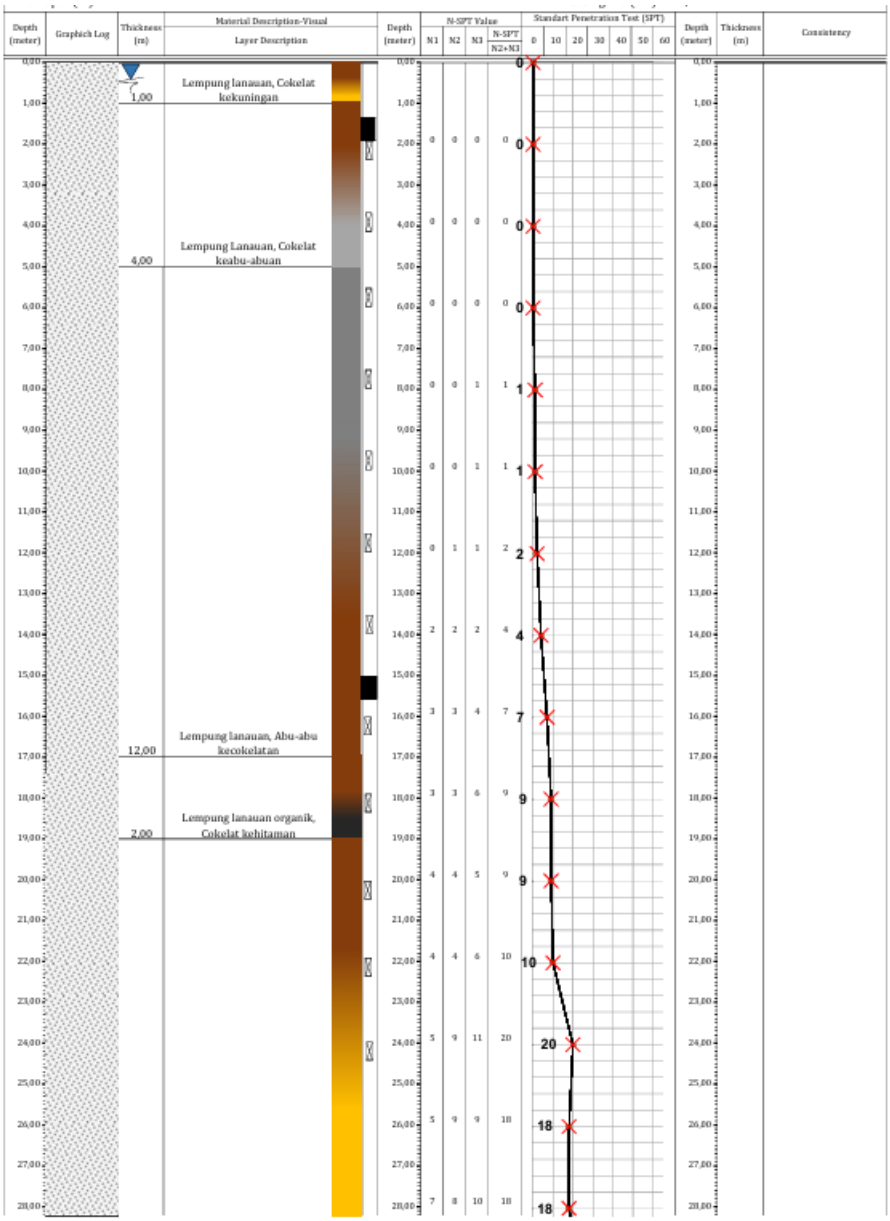
LAMPIRAN

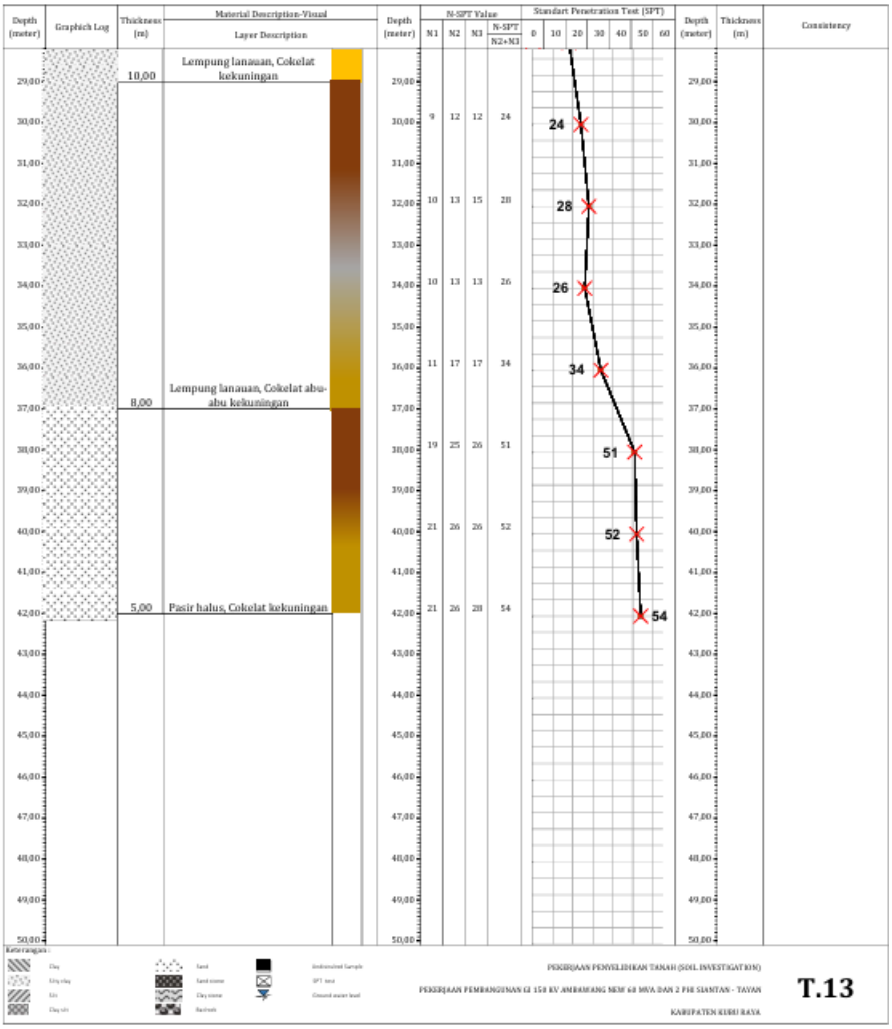
A. Hasil SPT dari T.12





B. Hasil SPT dari T.13


Depth (meter)
Graphich Log
Thickness (m)
Material Description-Visual
Layer Description
Depth (meter)
N-SPT Value
N1
N2
N3
N-SPT N2+N3
Standart Penetration Test (SPT)
0
10
20
30
40
50
60
Depth (meter)
Thickness (m)
Consistency
1,00
Lempung lanauan, Cokelat kekuningan
4,00
Lempung Lanauan, Cokelat keabu-abuan
12,00
Lempung lanauan, Abu-abu kecokelatan
2,00
Lempung lanauan organik, Cokelat kehitaman


Depth (meter)
Graphich Log
Thickness (m)
Material Description-Visual
Layer Description
Depth (meter)
N-SPT Value
N1
N2
N3
N-SPT N2+N3
Standart Penetration Test (SPT)
0
10
20
30
40
50
60
Depth (meter)
Thickness (m)
Consistency
10,00
Lempung lanauan, Cokelat kekuningan
8,00
Lempung lanauan, Cokelat abu-abu kekuningan
5,00
Pasir halus, Cokelat kekuningan
9 12 12 24
10 13 15 28
10 13 13 26
11 17 17 34
19 25 26 51
21 26 26 52
21 26 28 54
24
28
26
34
51
52
54
PEKERJAAN PENYELIDIKAN TANAH (SOIL INVESTIGATION)
PEKERJAAN PEMBANGUNAN GI 150 KV AMBAWANG NEW 60 MVA DAN 2 FSE SIANTAN - TAYAN
KABUPATEN KUBU RAYA
T.13