Available online https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/tekno

T E K N O

OPEN ACCESS

Volume 24, No. 97, Tahun 2026 p-ISSN: 0215-9617

Analisis Numerik Perilaku Fondasi Sumuran Menggunakan Metode Elemen Hingga

Rima M. J. Sumampouw[#a], Agnes T. Mandagi[#b], Alva N. Sarajar[#c]

[#]*Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia*
[a]rimasumampouw021@student.unsrat.ac.id, [b]agnes.mandagi@unsrat.ac.id, [c]alva.sarajar@unsrat.ac.id

Abstrak

Metode Elemen Hingga (Finite Element Method/FEM) telah menjadi pendekatan numerik yang banyak digunakan untuk menganalisis perilaku fondasi dalam yang menerima kondisi pembebanan dan tanah yang kompleks. Penelitian ini menerapkan FEM untuk menganalisis perilaku fondasi sumuran (caisson foundation) tunggal yang mendukung struktur gedung Data Center di kawasan Ibu Kota Nusantara (OIKN), dengan profil tanah berlapis: Lapisan 1 Silty Clay (0–2 m) dan Lapisan 2 Claystone (2–15 m). Analisis dilakukan pada tiga variasi diameter (D = 0,6 m; 0,8 m; dan 1,0 m) dengan kedalaman tertanam L = 4 m berdasarkan data Standard Penetration Test (SPT). Kapasitas daya dukung aksial dihitung dengan Metode λ VijayvergiyaFocht (1972) dan Meyerhof; perilaku lateral dianalisis dengan pendekatan Beam on Elastic Foundation (Model Winkler); dan penurunan disimulasikan menggunakan Metode Elemen Hingga melalui perangkat lunak Plaxis 2D dengan model konstitutif Mohr-Coulomb. Hasil analisis menunjukkan nilai kapasitas izin (Qall) masing-masing 698,52 kN; 1.031,89 kN; dan 1.415,53 kN dengan SF = 2,69; 2,58; dan 2,53 (memenuhi SF ≥ 2,5). Defleksi lateral sebesar 3,58 mm masih di bawah batas izin 12 mm. Simulasi FEM menunjukkan penurunan maksimum 15,53 mm; 16,14 mm; dan 19,59 mm, seluruhnya di bawah batas izin 25 mm sesuai SNI 8460:2017, dan lebih besar dibandingkan hasil analitis (0,7656–1,7496 mm) karena FEM mampu menangkap deformasi segera dan redistribusi tegangan dua dimensi. Berdasarkan seluruh hasil analisis, fondasi sumuran diameter D = 1,0 m direkomendasikan sebagai dimensi paling optimal untuk mendukung struktur gedung Data Center di kawasan OIKN.

Kata kunci: fondasi sumuran, metode elemen hingga, PLAXIS 2D, daya dukung aksial, penurunan, OIKN

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur yang terus berkembang pesat menuntut adanya perencanaan struktur yang andal, dimulai dari struktur bagian atas hingga struktur bagian bawah yaitu fondasi. Fondasi merupakan elemen struktural yang berfungsi meneruskan beban dari bangunan ke lapisan tanah di bawahnya, sehingga perencanaan fondasi yang tepat menjadi kunci keberhasilan suatu konstruksi. Kesalahan dalam pemilihan maupun perencanaan fondasi dapat mengakibatkan kerusakan bahkan kegagalan struktur secara keseluruhan, sehingga setiap keputusan desain harus didasarkan pada analisis geoteknik yang komprehensif dan akurat.

Secara umum, fondasi dibedakan menjadi dua kelompok besar, yaitu fondasi dangkal dan fondasi dalam. Fondasi dalam digunakan ketika lapisan tanah keras berada pada kedalaman yang relatif besar dari permukaan tanah, sehingga fondasi dangkal tidak mampu memikul beban bangunan secara aman. Salah satu jenis fondasi dalam yang banyak digunakan di Indonesia adalah fondasi sumuran atau yang dikenal juga sebagai *caisson foundation*. Fondasi sumuran merupakan jenis fondasi peralihan antara fondasi dangkal dan fondasi dalam, yang dibangun dengan cara menggali lubang berpenampang lingkaran kemudian dicor dengan beton atau campuran batu dan mortar. Fondasi ini diklasifikasikan sebagai fondasi dalam apabila perbandingan kedalaman terhadap diameter lebih besar dari empat, dan umumnya memiliki diameter antara 0,6 meter

hingga 2,5 meter dengan kedalaman yang menyesuaikan kondisi lapisan tanah keras di lokasi pembangunan.

Fondasi sumuran memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan jenis fondasi dalam lainnya, antara lain tidak menimbulkan getaran selama proses pelaksanaan sehingga cocok digunakan di kawasan padat penduduk, dapat dibuat dengan diameter besar yang menghasilkan daya dukung per tiang yang tinggi, serta kedalaman pemasangan yang fleksibel sesuai dengan kondisi tanah lapangan. Selain itu, fondasi sumuran juga memberikan kemudahan dalam pemeriksaan kondisi tanah secara langsung selama proses penggalian berlangsung. Meskipun demikian, fondasi sumuran juga memiliki keterbatasan, antara lain kualitas beton yang dicor di dalam air tanah sulit dikontrol secara langsung, kebutuhan beton yang besar karena dimensinya yang cukup besar, serta potensi kontaminasi adukan beton oleh tanah longsor di dasar galian apabila tidak ditangani dengan baik.

Dalam perencanaan fondasi sumuran, analisis daya dukung aksial dan lateral menjadi hal yang sangat penting untuk memastikan keamanan konstruksi. Di samping analisis daya dukung, perhitungan penurunan (*settlement*) fondasi sumuran juga merupakan aspek kritis dalam perencanaan. Besarnya penurunan dipengaruhi oleh sifat tanah, diameter sumuran, kedalaman fondasi, serta besar beban yang bekerja. Penurunan fondasi yang berlebihan atau tidak seragam dapat menyebabkan kerusakan struktural pada bangunan. Seiring dengan perkembangan teknologi komputasi, metode elemen hingga (*Finite Element Method*/FEM) telah menjadi pendekatan yang semakin populer dalam analisis geoteknik karena kemampuannya dalam memodelkan perilaku tanah dan interaksi tanah-struktur secara lebih realistis dibandingkan metode analitik konvensional. Perangkat lunak PLAXIS merupakan salah satu aplikasi berbasis metode elemen hingga yang telah banyak digunakan dalam simulasi perilaku fondasi. PLAXIS 2D mampu mensimulasikan penurunan tanah secara akurat, dengan estimasi penurunan yang lebih signifikan dibandingkan perangkat lunak lain pada kondisi yang sama. Dengan demikian, penggunaan PLAXIS dalam analisis fondasi sumuran diharapkan dapat menghasilkan prediksi perilaku yang lebih komprehensif dan akurat dalam mendukung perencanaan pembangunan di lokasi tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana sifat dan kondisi tanah di area pembangunan gedung data center kawasan OIKN berdasarkan data hasil penyelidikan tanah?
2. Bagaimana cara menentukan kapasitas daya dukung fondasi sumuran?
3. Bagaimana hasil analisis besarnya penurunan (*settlement*) pada fondasi sumuran akibat beban gedung Data Center dan gambaran penurunannya berdasarkan pemodelan numerik menggunakan PLAXIS 2D?

1.3 Batasan Masalah

1. Penyelidikan tanah dalam penelitian ini hanya mengacu pada data hasil uji SPT pada area pembangunan gedung Data Center kawasan OIKN, tanpa mempertimbangkan data penyelidikan tanah dari lokasi lain.
2. Perencanaan fondasi dibatasi pada fondasi sumuran (*caisson*) tunggal, tidak mencakup jenis fondasi dalam lainnya, dan perhitungan kapasitas daya dukungnya dilakukan berdasarkan data penyelidikan tanah yang tersedia.
3. Perhitungan penurunan (*settlement*) dibatasi pada penurunan akibat beban struktur gedung Data Center menggunakan pemsodelan numerik PLAXIS 2D, sedangkan peninjauan keamanan desain fondasi sumuran hanya mengacu pada standar yang berlaku tanpa pengujian fisik langsung di lapangan.

1.4 Tujuan Penelitian

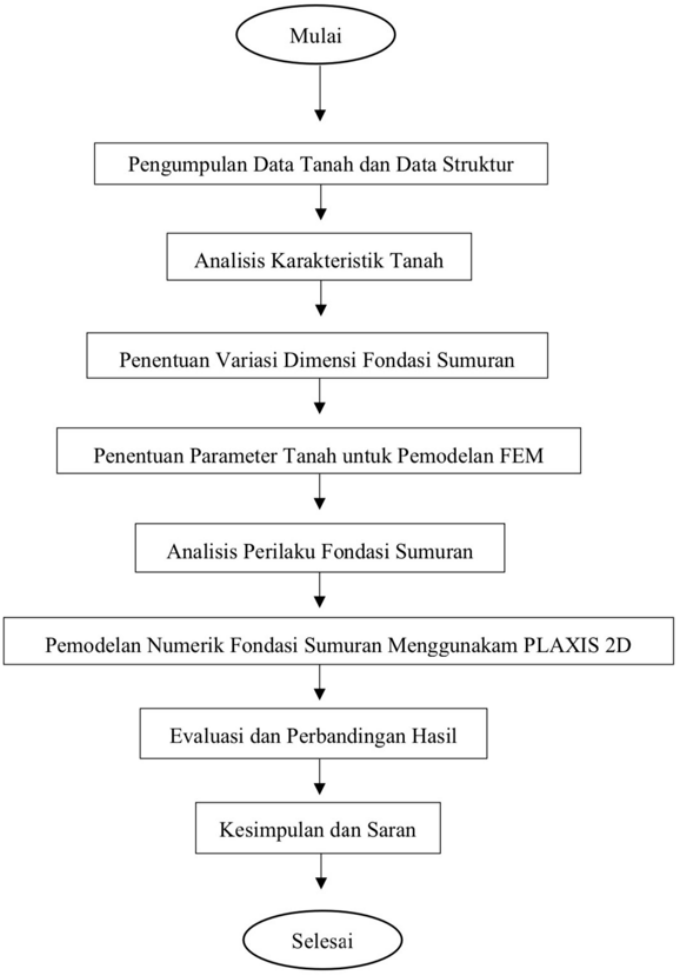
Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Menghitung nilai kapasitas daya dukung pada fondasi sumuran tunggal berdasarkan data yang diperoleh dari hasil penyelidikan tanah.
2. Menghitung besarnya penurunan (*settlement*) yang terjadi pada fondasi sumuran sebagai

akibat dari beban struktur gedung data center.
3. Meninjau kembali hasil perencanaan fondasi sumuran untuk memastikan bahwa desain yang digunakan telah memenuhi ketentuan keamanan sesuai standar yang berlaku.

2. Tahap Penelitian

Tahap penelitian digambarkan dalam alur yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

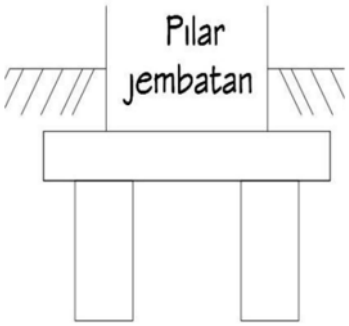
3. Kajian Literatur

3.1 Fondasi

Fondasi merupakan elemen struktur yang berfungsi untuk menyalurkan seluruh beban bangunan ke dalam tanah pendukung secara aman tanpa menyebabkan keruntuhan maupun deformasi berlebihan. Secara umum, fondasi diklasifikasikan menjadi fondasi dangkal dan fondasi dalam berdasarkan kedalaman penyaluran bebannya.

3.2 Fondasi Sumuran

Fondasi sumuran merupakan fondasi berbentuk silinder dengan diameter relatif besar yang dibuat melalui proses penggalian tanah hingga kedalaman tertentu, kemudian diisi dengan beton bertulang. Fondasi ini umumnya diterapkan pada pembangunan gedung bertingkat menengah, jembatan, menara, dan struktur lain yang membutuhkan kapasitas daya dukung besar. Selain itu, fondasi sumuran dipilih karena metode pelaksanaannya relatif sederhana serta lebih ekonomis dibandingkan beberapa jenis fondasi dalam lainnya pada kondisi tertentu.



Gambar 2. Fondasi Sumuran

3.3 Kapasitas Daya Dukung Ultimit Fondasi Sumuran

Kapasitas dukung ultimit (qu) fondasi sumuran didefinisikan sebagai tegangan kontak rata-rata antara fondasi sumuran dan tanah pada saat terjadi keruntuhan. Ketika beban yang bekerja pada fondasi sumuran terus ditingkatkan, pada suatu kondisi tertentu tanah di bawah dan di sekitar fondasi sumuran akan mengalami keruntuhan geser. Untuk mempertimbangkan berbagai ketidakpastian dalam penyelidikan tanah, variabilitas sifat-sifat tanah di lapangan, serta kemungkinan adanya beban-beban yang tidak terduga, maka kapasitas dukung ultimit harus dibagi dengan suatu faktor keamanan (FS) untuk mendapatkan kapasitas dukung izin (q_{all}). Persamaannya dapat ditulis sebagai berikut (Das, 1995):

$$q_{all} = q_u / FS$$

Keterangan:
q_{all} = Daya dukung izin (kN/m^2)
q_u = Daya dukung ultimit
FS = Faktor keamanan

1. *Daya Dukung Aksial*
   Kapasitas ultimit fondasi sumuran secara aksial dinyatakan sebagai penjumlahan dari tahanan selimut dan tahanan ujung, yaitu:
   $$Q_u = Q_s + Q_p$$
   Dengan :
   Q_u = Kapasitas ultimit tiang (kN)
   Q_s = Tahanan selimut tiang (kN)
   Q_p = Tahanan ujung tiang (kN)

2. *Kapasitas Dukung Sepanjang Tiang / Tahanan Selimut (Qs) pada Metode Vijayvergiya dan Focht (1972)*
   Perhitungan tahanan selimut dapat menggunakan metode λ (lambda) yang dikemukakan oleh Vijayvergiya dan Focht (1972). Metode ini mempertimbangkan pengaruh tegangan overburden vertikal efektif serta kohesi tanah terhadap besarnya tahanan gesek yang terjadi di sepanjang sisi fondasi.
   Persamaan yang digunakan adalah:
   $$Q_s = pL(\lambda(\sigma'_v + 2c_u)$$
   Keterangan:
   Qs = Kapasitas tahanan selimut total (kN)
   P = Keliling penampang fondasi/tiang (m)
   L = Panjang atau kedalaman fondasi tertanam (m)
   λ = Faktor adhesi tanah lempung (koefisien empiris)
   σ'v = Tegangan vertikal efektif rata-rata pada kedalaman tiang (kN/m²)
   c_u = Kohesi tak terdrainase tanah lempung (kPa)

3. *Kapasitas Dukung Ujung Tiang / Tahanan Ujung (Qp) pada Metode Meyerhof*
   Pada tanah lempung, salah satu metode yang umum digunakan untuk menghitung tahanan

ujung adalah metode Meyerhof.
Persamaan yang digunakan adalah:

$$Q_p = \frac{1}{4}\pi D^2(9c_u)$$

Keterangan:
Qp = Kapasitas dukung ujung fondasi (kN)
D = Diameter fondasi atau tiang (m)
π = Konstanta phi (3,14)
cu = Kohesi tak terdrainase tanah lempung (kN/m²)

3.4 Gaya Dukung Lateral

Gaya dukung lateral adalah kemampuan fondasi dalam menahan beban yang bekerja secara horizontal terhadap sumbu fondasi. Beban lateral umumnya berasal dari gaya angin, gempa bumi, tekanan tanah, arus air, getaran mesin, maupun gaya eksentris dari struktur atas. Pada fondasi dalam seperti tiang pancang, tiang bor, dan fondasi sumuran, beban lateral perlu diperhitungkan karena dapat menyebabkan pergeseran horizontal, rotasi, bahkan kegagalan struktur apabila melebihi kapasitas tanah penahan di sekeliling fondasi.

Salah satu parameter penting dalam analisis ini adalah faktor kekakuan relatif yang dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$R = \sqrt[4]{\frac{E_p \,.\, I_p}{k \,.\, B}}$$

Dengan :
R = Faktor kekakuan relatif atau panjang karakteristik tiang (m)
E_p = Modulus elastisitas material tiang (Mpa)
I_p = Momen inersia penampang tiang
k = Koefisien reaksi tanah horizontal atau modulus reaksi tanah
B = Diameter tiang (m)

Selain itu, dalam analisis lanjut digunakan parameter lain yang berkaitan dengan kekakuan tanah–struktur (*soil–structure stiffness parameter*) pada analisis fondasi dalam terhadap beban lateral, yaitu:

$$k = 0.65 \sqrt[12]{\frac{E_s D^4}{E_p I_p}} \,.\, \frac{E_s}{1 - \mu_s^2}$$

Dengan :
K = Koefisien reaksi tanah (kN/m²)
E_s = Modulus elastisitas tanah (Mpa)
D = Diameter tiang bor/lebar elemen fondasi (m)
E_p = Modulus elastisitas material tiang (Mpa)
I_p = Momen inersia penampang tiang (m^4)
μ_s = Angka Poisson tanah

3.5 Daya Dukung Terhadap Beban

Daya dukung tanah terhadap beban merupakan aspek penting dalam perencanaan fondasi karena tanah harus mampu menahan beban struktur di atasnya. Menurut Braja M. Das (1995), beban yang bekerja pada fondasi akan menghasilkan tegangan vertikal di bawah fondasi. Apabila tegangan tersebut melebihi daya dukung tanah, maka dapat terjadi kegagalan berupa kegagalan geser (shear failure) maupun penurunan berlebih (excessive settlement) yang membahayakan struktur. Persamaan yang digunakan dalam perhitungan adalah sebagai berikut:

$$SF = \frac{Q_u}{Q_{desain}}$$

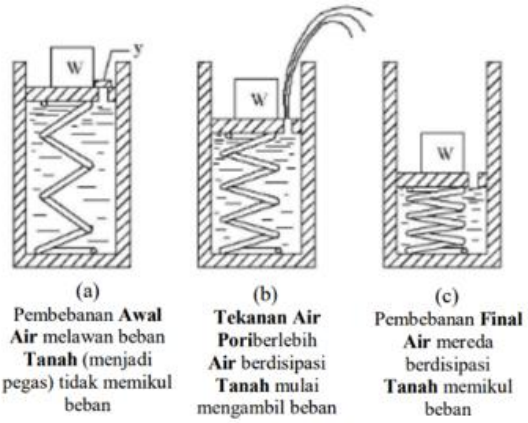
Ketrangan :
Q_u = Kapasitas ultimit fondasi

Q_{desain} = Beban rencana
SF = Faktor Keamanan (2,5 sampai 3,0)

3.6 Penurunan Fondasi

Dalam perencanaan suatu struktur, selain kapasitas dukung tanah, besarnya penurunan (*settlement*) yang terjadi akibat pembebanan merupakan hal yang harus diperhatikan secara seksama. Penurunan (*settlement*) merupakan pergerakan vertikal ke bawah dari fondasi akibat beban struktur yang bekerja pada tanah pendukung. Menurut Braja M. Das, penurunan terjadi karena tanah mengalami deformasi atau pemampatan ketika menerima tambahan tegangan dari beban bangunan.

1. *Penurunan Konsolidasi (Consolidation Settlement)*
   Penurunan konsolidasi pada tanah lempung terjadi akibat keluarnya air pori dari dalam tanah ketika tanah menerima tambahan beban. Menurut Das (1995), penurunan konsolidasi pada tanah lempung terbagi menjadi dua tahap utama yang terjadi secara berurutan, yaitu konsolidasi primer (*primary consolidation*) dan konsolidasi sekunder (*secondary consolidation*). Untuk memahami proses terjadinya penurunan konsolidasi pada tanah lempung, digunakan analogi *rheology* berupa sistem pegas dan air pori seperti ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 3. Rheology Penurunan Konsolidasi Tanah Lempung

2. *Konsolidasi Primer (Primary Consolidation)*
   Penurunan konsolidasi primer (*primary consolidation*) merupakan komponen penurunan terbesar yang terjadi pada tanah lempung jenuh air akibat pembebanan.
   Untuk menghitung penurunan akibat konsolidasi primer satu dimensi menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$S_c = \Delta\sigma \times H \times M_v$$

   atau untuk setiap sublapisan:

$$S_{c,i} = \Delta\sigma_i \times H_i \times m_v$$

   Dimana:
   Sc = Penurunan konsolidasi primer (m)
   Δσ = Tambahan tegangan vertikal akibat beban fondasi (kPa)
   H = Tebal lapisan tanah (m)
   M_v = Koefisien kompresibilitas volume tanah (m²/kN)

3.7 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial dalam domain yang kompleks. Metode ini bekerja dengan membagi domain masalah menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung, di mana setiap elemen memiliki persamaan yang menggambarkan hubungan antara gaya dan deformasi berdasarkan parameter material yang diberikan.

3.8 Pemodelan Numerik PLAXIS 2D

Pemodelan numerik menggunakan PLAXIS 2D dilakukan sebagai pendekatan komplementer terhadap analisis analitis yang telah dilakukan. PLAXIS 2D berbasis Metode Elemen Hingga (FEM) mampu mensimulasikan perilaku fondasi sumuran secara lebih representatif dengan mempertimbangkan interaksi non-linier antara tanah dan struktur fondasi yang tidak dapat diakomodasi oleh pendekatan analitis konvensional.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Data Parameter Tanah

Tabel 1. Parameter Mekanik Tanah Hasil Korelasi Data N-SPT

No.	Deskripsi Tanah	Tebal (m)	N-SPT	N_{60}	γ (kN/m³)	E (kPa)	c_u (kN/m²)	c' (kN/m²)	φ (°)	ν
1	Lempung Kelanauan *(Silty Clay)*, kekuningan — *Medium*	2	13	10,79	18,42	6.04	64,74	298,80	27,49	0,35
2	Batu Lempung *(Claystone)*, abu-abu — *Very Dense*	13	60	49,80	24,27	17.7	298,80	29,88	41,83	0,35

4.2 Perencanaan Dimensi Tiang Sumuran

Variasi diameter fondasi sumuran yang dianalisis dalam penelitian ini adalah D = 0,6 m; D = 0,8 m; dan D = 1,0 m.

Tabel 2. Variasi Dimensi Fondasi Sumuran yang Dianalisis

Variasi	**D (m)**	**L Minimum (m)**	**Ap (m²)**	**As per meter L (m²/m)**	**Ip (m⁴)**
D = 1,0 m	1,0	4	0,7854	3,1416	$7{,}854 \times 10^{-2}$
D = 0,8 m	0,8	4	0,5027	2,5133	$2{,}011 \times 10^{-2}$
D = 0,6 m	0,6	4	0,2827	1,8850	$6{,}362 \times 10^{-3}$

4.3 Analisis Daya Dukung Aksial Fondasi Sumuran

Tahanan selimut fondasi sumuran dihitung menggunakan Metode λ yang dikemukakan oleh *Vijayvergiya* dan *Focht* (1972) dan Tahanan ujung fondasi sumuran dihitung menggunakan metode Meyerhof.

Tabel 3. Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Fondasi Sumuran

D (m)	SF	Qs (kN)	Qp (kN)	Qu (kN)	Qall (kN)	L (m)
1,0	2,5	1.582,62	1.570,80	3.153,42	1.261,37	4
0,8	2,5	1.266,10	1.005,31	2.271,41	908,56	4
0,6	2,5	949,57	565,49	1.515,06	606,02	4

4.4 Analisis Daya Dukung Lateral Fondasi Sumuran

Gedung Data Center merupakan bangunan yang selain menerima beban vertikal yang besar, juga harus mampu menahan beban horizontal yang berasal dari gaya gempa bumi dan angin sesuai SNI 1726:2019.

Tabel 4. Parameter dan Hasil Analisis Kapasitas Daya Dukung Lateral Fondasi Sumuran

Parameter	Nilai	Satuan
Mutu beton (fc')	25	MPa
Modulus elastisitas beton (Ep)	23.500.000	kPa
Momen inersia penampang (Ip) — D = 0,6 m	$6{,}362 \times 10^{-3}$	m^4
Kekakuan lentur (EI)	149,50	$kN \cdot m^2$
Es rata-rata tanah	16.068,14	kPa
Modulus reaksi tanah horizontal (k)	14.294,37	kN/m^3
Angka Poisson tanah (μs)	0,30	—
Faktor kekakuan relatif (R)	1,798	m
L/R	2,224	—
Klasifikasi fondasi	Tiang Pendek ($2 \leq L/R < 4$)	—
Beban lateral desain (Qg)	50	kN
Momen desain (Mg)	50	kN·m
Defleksi kepala fondasi (z = 0)	$3{,}584 \times 10^{-3}$	m
Momen lentur maksimum (Mz,maks)	70,13	kN·m
Defleksi izin (SNI)	12×10^{-3}	m
Kontrol defleksi	3,584 mm < 12 mm → OK	—

4.5 Analisis Daya Terhadap Beban

Analisis daya dukung terhadap beban rencana dilakukan dengan membandingkan kapasitas ultimit fondasi dengan beban desain yang bekerja.

Tabel 5. Rekapitulasi Q Desain Maksimum

Diameter (m)	Qu (kN)	Qdesign (kN)	SF	Evaluasi
0,6	1746.297	650	2.69	Aman
0,8	2579.723	1000	2.58	Aman
1,0	3538.813	1400	2.53	Aman

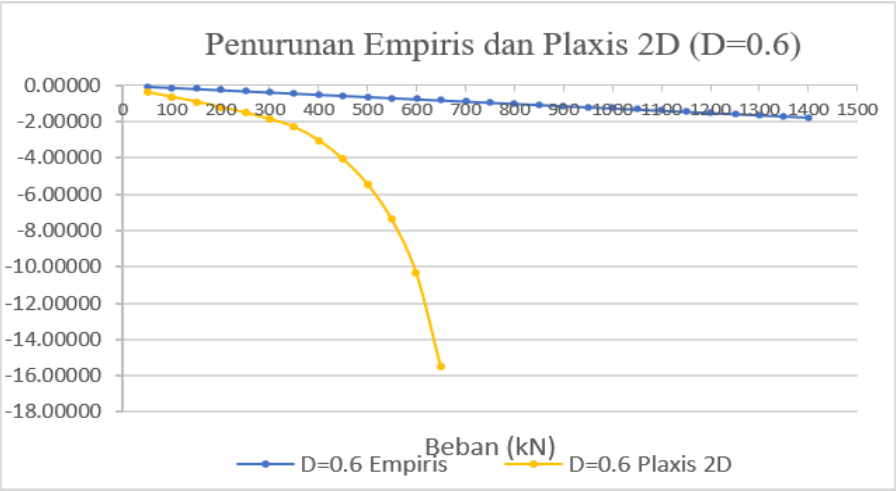
4.6 Analisis Penurunan

Penurunan total yang diizinkan dilakukan dengan membandingkan nilai penurunan konsolidasi primer (Sc) hasil perhitungan analitis terhadap batas penurunan izin sebesar Sizin = 25 mm sesuai SNI 8460:2017.

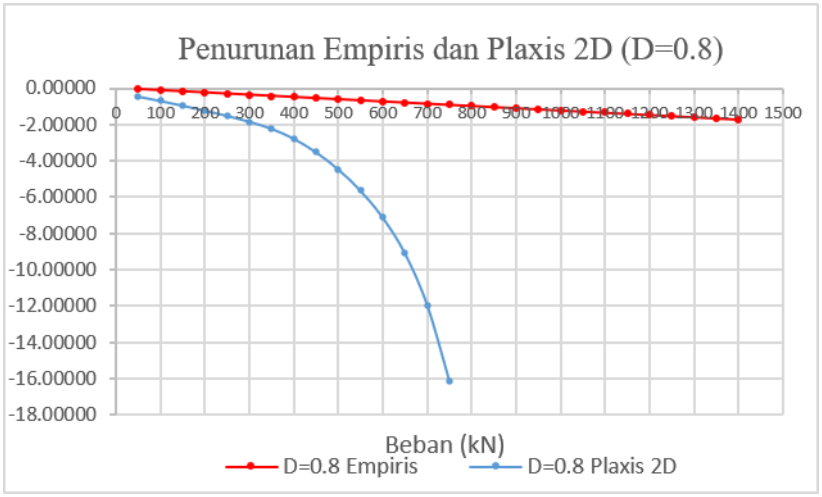
Tabel 6. Evaluasi Penurunan Konsolidasi Primer (Sc) terhadap Penurunan Izin

Skenario Beban	Diameter (m)	Sc Total (mm)	Sizin (mm)	Evaluasi
Q = 650 kN	0,6	0,8123	25	Aman
Q = 650 kN	0,8	0,7886	25	Aman
Q = 650 kN	1,0	0,7656	25	Aman
Q = 1.400 kN	0,6	1,7496	25	Aman
Q = 1.400 kN	0,8	1,6986	25	Aman

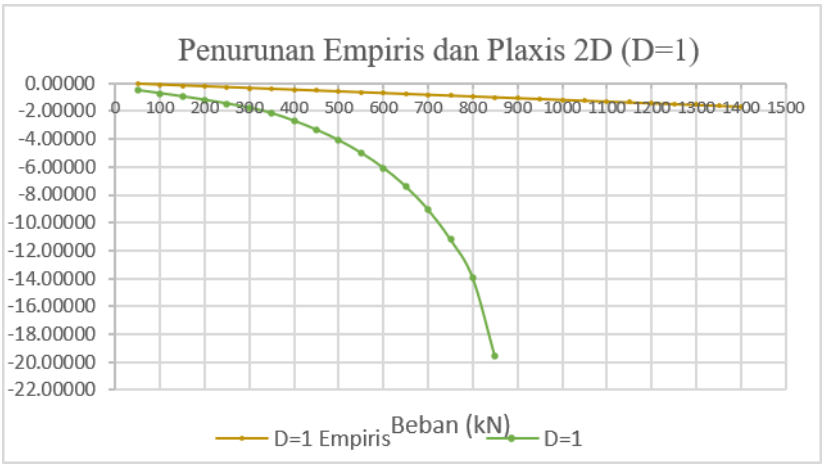
Skenario Beban	Diameter (m)	Sc Total (mm)	Sizin (mm)	Evaluasi
Q = 1.400 kN	1,0	1,6497	25	Aman



Gambar 4. Grafik Perbandingan Penurunan Empiris dan Penurunan PLAXIS 2D, D = 0.6



Gambar 5. Grafik Perbandingan Penurunan Empiris dan Penurunan PLAXIS 2D, D = 0.8



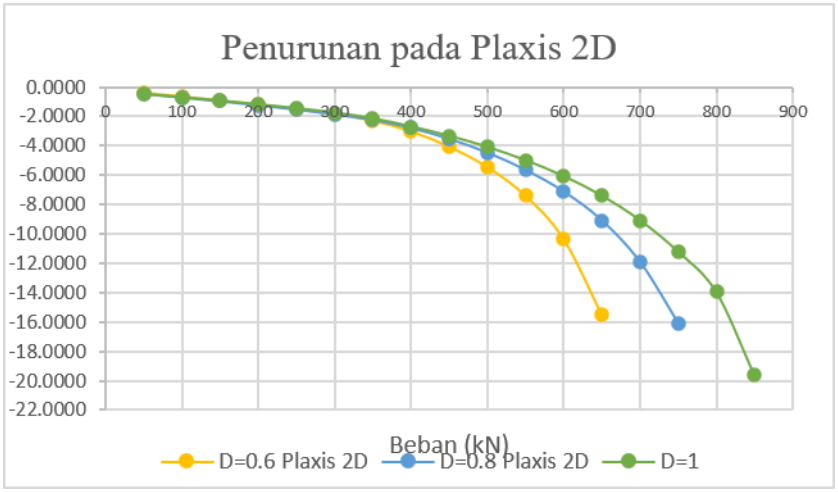
Gambar 6. Grafik Perbandingan Penurunan Empiris dan Penurunan PLAXIS 2D, D = 1

4.7 Analisis Penurunan Pada PLAXIS 2D

Penurunan maksimum pada fondasi sumuran untuk setiap variasi diameter fondasi akibat pemberian beban secara bertahap sebesar 50 kN hingga fondasi mengalami kondisi kegagalan (*failure*).

Tabel 7. Penurunan Maksimum pada Diameter 0,6 m, 0,8 m dan 1,0 m

Beban (kN)	Penurunan Diameter 0.6		Penurunan Diameter 0.8		Penurunan Diameter 1.0	
	(m)	(mm)	(m)	(mm)	(m)	(mm)
50	-0.00037	-0.37	-0.00045	-0.45	-0.00051	-0.51
100	-0.00063	-0.63	-0.00069	-0.69	-0.00072	-0.72
150	-0.00090	-0.90	-0.00095	-0.95	-0.00095	-0.95
200	-0.00119	-1.19	-0.00122	-1.22	-0.00120	-1.20
250	-0.00150	-1.50	-0.00151	-1.51	-0.00146	-1.46
300	-0.00185	-1.85	-0.00184	-1.84	-0.00177	-1.77
350	-0.00229	-2.29	-0.00223	-2.23	-0.00215	-2.15
400	-0.00302	-3.02	-0.00278	-2.78	-0.00270	-2.70
450	-0.00406	-4.06	-0.00352	-3.52	-0.00334	-3.34
500	-0.00546	-5.46	-0.00446	-4.46	-0.00409	-4.09
550	-0.00741	-7.41	-0.00564	-5.64	-0.00500	-5.00
600	-0.01037	-10.37	-0.00713	-7.13	-0.00608	-6.08
650	-0.01553	-15.53	-0.00910	-9.10	-0.00741	-7.41
700	-	-	-0.01195	-11.95	-0.00908	-9.08
750	-	-	-0.01614	-16.14	-0.01121	-11.21
800	-	-	-	-	-0.01395	-13.95
850	-	-	-	-	-0.01959	-19.59
900	-	-	-	-	-	-



Gambar 7. Grafik Penurunan Maksimum pada PLAXIS 2D

5. Kesimpulan

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis numerik perilaku fondasi sumuran menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) melalui perangkat lunak PLAXIS 2D serta perhitungan analitis berdasarkan data hasil uji Standard Penetration Test (SPT) di kawasan OIKN, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Kapasitas daya dukung aksial fondasi sumuran tunggal dihitung menggunakan Metode λ Vijayvergiya dan Focht (1972) untuk tahanan selimut (Qs) serta Metode Meyerhof untuk tahanan ujung (Qp), berdasarkan data hasil penyelidikan tanah (SPT) di kawasan OIKN. Fondasi sumuran dengan kedalaman tertanam L = 4 m yang bertumpu pada Lapisan 2 (Claystone) menghasilkan kapasitas daya dukung ultimit sebesar Qu = 1.746,30 kN (D = 0,6 m); Qu = 2.579,72 kN (D = 0,8 m); dan Qu = 3.538,81 kN (D = 1,0 m). Berdasarkan faktor

keamanan SF = 2,5, diperoleh kapasitas daya dukung izin sebesar Qall = 698,52 kN; Qall = 1.031,89 kN; dan Qall = 1.415,53 kN, seluruhnya memenuhi persyaratan Qall ≥ Qdesain dengan faktor keamanan aktual SF = 2,69; 2,58; dan 2,53, memenuhi syarat minimum SF ≥ 2,5 sesuai SNI 8460:2017.

2. Nilai penurunan konsolidasi primer terbesar diperoleh pada diameter D = 0,6 m dengan beban Q = 1.400 kN, yaitu sebesar 1,7496 mm, sedangkan nilai terkecil terjadi pada D = 1,0 m dengan beban Q = 650 kN sebesar 0,7656 mm. Adapun hasil simulasi PLAXIS 2D dengan pembebanan bertahap 50 kN hingga kondisi kegagalan menunjukkan penurunan maksimum sebesar 15,53 mm pada D = 0,6 m (beban kegagalan 650 kN), 16,14 mm pada D = 0,8 m (beban kegagalan 750 kN), dan 19,59 mm pada D = 1,0 m (beban kegagalan 850 kN). Seluruh nilai penurunan yang diperoleh, baik secara analitis maupun numerik, masih jauh berada di bawah batas penurunan izin S_izin = 25 mm sesuai SNI 8460:2017.
3. Peninjauan kembali hasil perencanaan fondasi sumuran dilakukan dengan membandingkan seluruh hasil analisis terhadap ketentuan keamanan SNI 8460:2017, meliputi kapasitas daya dukung, faktor keamanan, defleksi lateral, dan penurunan. Analisis beban lateral dengan pendekatan Beam on Elastic Foundation (Model Winkler) menunjukkan bahwa fondasi sumuran D = 0,6 m memiliki kekakuan lentur EI = 149,501 kN·m² dan faktor kekakuan relatif R = 1,798 m, sehingga berdasarkan rasio L/R = 2,224 fondasi diklasifikasikan sebagai tiang pendek (rigid pile) dengan defleksi lateral total sebesar 3,58 mm, masih memenuhi batas izin 12 mm. Hasil rekapitulasi evaluasi menunjukkan bahwa seluruh variasi diameter fondasi sumuran (D = 0,6 m; D = 0,8 m; dan D = 1,0 m) dengan kedalaman tertanam L = 4 m telah memenuhi seluruh ketentuan keamanan yang disyaratkan. Dengan demikian, desain fondasi sumuran yang direncanakan dinyatakan aman dan layak digunakan untuk mendukung struktur gedung Data Center di kawasan OIKN, dengan diameter D = 1,0 m sebagai pilihan yang paling direkomendasikan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan, terdapat beberapa saran yang dapat dijadikan pertimbangan untuk pengembangan penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Data tanah yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder hasil uji Standard Penetration Test (SPT) dengan parameter tanah yang diperoleh melalui korelasi empiris. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar dilengkapi dengan data hasil pengujian laboratorium secara langsung seperti uji triaksial, uji konsolidasi oedometer, dan uji batas Atterberg guna memperoleh parameter tanah yang lebih akurat dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.
2. Penelitian ini membatasi analisis pada fondasi sumuran tunggal dengan kedalaman tertanam L = 4 m dan tiga variasi diameter. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar dilakukan variasi kedalaman tertanam yang lebih beragam, misalnya L = 6 m; L = 8 m; hingga L = 10 m, guna mengevaluasi pengaruh kedalaman penanaman terhadap kapasitas daya dukung aksial dan besarnya penurunan fondasi sumuran secara lebih menyeluruh, serta dilakukan analisis terhadap kelompok fondasi sumuran (group caisson) dengan mempertimbangkan efek interaksi antar fondasi, sehingga hasil yang diperoleh dapat lebih merepresentasikan kondisi aktual pada proyek pembangunan gedung Data Center di kawasan OIKN.
3. Pemodelan numerik dalam penelitian ini menggunakan model konstitutif Mohr-Coulomb yang merupakan model elastoplastis sederhana dengan parameter yang diperoleh dari korelasi data N-SPT. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar menggunakan model tanah yang lebih kompleks seperti Hardening Soil (HS) atau Soft Soil Creep (SSC) dalam pemodelan PLAXIS 2D, sehingga perilaku tanah lempung jenuh air yang bersifat non-linier dan bergantung terhadap waktu dapat direpresentasikan dengan lebih akurat dan realistis.

Referensi

Bhardwaj, A., & Sharma R. (2022). Bearing Capacity Evaluation Of Shallow Foundations On Stabilized Layered Soil Using ABAQUS. Studia Geotechnica et Mechanica.

Bowles, Joseph E. (1997). Foundation Analysis and Design (Fifth Edition).
Singapore: McGraw-Hill.

Das, Braja M. (2009). Shallow Foundations: Bearing Capacity and Settlement. Broken Sound Parkway

NW.
Daud, Agatta F. E., Oktovian B. A Sompie & Agnes T. Mandagi. (2024). Analisis Daya Dukung Fondasi Sumuran Pada Pembangunan Gedung Rumah Sakit Liun Kendage Tahuna. TEKNO.
Ering, Inggrid A., Roski R. I. Legrans & Steeva G. Rondonuwu. (2024). Analisis Kapasitas Dukung Fondasi Rakit Dan Fondasi Sumuran Pada Konstruksi Gedung Kuliah Jurusan Farmasi FMIPA UNSRAT. TEKNO.
Irma Ridhayani, Irfan Saputra. 2021. Studi Analisis Daya Dukung Tanah Berdasarkan Data Sondir Di Kampus Padhang-Padhang Universitas Sulawesi Barat Vol. 3, No. 2, Oktober 2021.
Prima, Y., & Rumbyarso, A. (2024). Aplikasi Perangkat Lunak Plaxis dan Geostudio dalam Studi Subsiden Tanah di Kecamatan Tarumajaya akibat Pemanfaatan Air Tanah Berlebih.
Sihombing, S., Darmiyanti, L., & Prima, Y. (2023). Pengaruh Electroosmosis Terhadap Kuat Geser Tanah Lempung.
Kalendesang, Natanael C., Jack H. Ticoh, & Roski R. I. Legrans. (2022). Analisis Penurunan Fondasi Dangkal Menggunakan Program Settle3D (Studi Kasus: SMA Eben Haezer Manado). TEKNO.
SIMALANGO, S. P., PURBA, A., & SAWITO, K. (2021). Studi Perencanaan Pondasi Sumuran Pada Pembangunan Gedung Bertingkat Tinggi (Perbandingan Antara Pondasi Tiang Pancang dan Pondasi Sumuran).
Ticoh, J. H., Waani, J. E., Mandagi, A. T., Supit, C. J., & Manaroinsong, L. D. (2022). Studi Daya Dukung Izin Tanah Untuk Pondasi Gedung di Desa Sea,Kec. Pineleng, Kabupaten Minahasa. TEKNO-Volume 20 Nomor 80-April 2022.
Wagh, D., Jaydeep & Bambole, N., Abhay. (2024). Improved Correlation of Soil Modulus with SPT N Values. Vol.14.