

Evaluasi Desain Fondasi *Bored Pile* dengan Integrasi *Static Load Test* dan Pemodelan Elemen Hingga: Studi Kasus Struktur Fasilitas Heat Exchanger (HE) di Cepu, Kab. Blora, Jawa Tengah

M.I. Hudaya¹, F. Faris^{1*}

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: fikri.faris@ugm.ac.id

INTISARI

Risiko kegagalan fondasi meningkat ketika kondisi tanah aktual berbeda dengan asumsi desain, khususnya pada lingkungan tanah lempung jenuh air. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi korelasi hasil *Static Load Test* (SLT) terhadap parameter tanah aktual dalam menilai kinerja fondasi tiang bor pada Struktur Heat Exchanger (HE) di Cepu, Jawa Tengah. Data penyelidikan tanah berupa *Standard Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test* (CPT) dikombinasikan dengan analisis balik (*back-analysis*) SLT serta pemodelan elemen hingga. Hasil pengujian menunjukkan adanya penurunan 9.85 mm pada 10% beban rencana dan 25.53 mm pada 20% beban rencana akibat kondisi tanah terganggu dan jenuh air serta keterbatasan metode konstruksi. Analisis balik menghasilkan kalibrasi ulang parameter tanah untuk mencocokkan kurva SLT dan kekakuan tanah mengharuskan reduksi soil properties hingga 25% dari nilai parameter desain awal akibat distorsi dari gangguan konstruksi. Studi ini berposisi sebagai peringatan bahaya overestimasi daya dukung jika efek gangguan pengeboran (*remolding/smear zone*) pada lempung jenuh air tidak diakomodasi dalam desain awal dan meminimalkan risiko kegagalan struktur yang kedua kalinya pada tahap perbaikan fondasi.

Kata kunci: *Static Load Test*, fondasi tiang, *Back-Analysis*, penurunan, parameter tanah, metode elemen hingga.

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

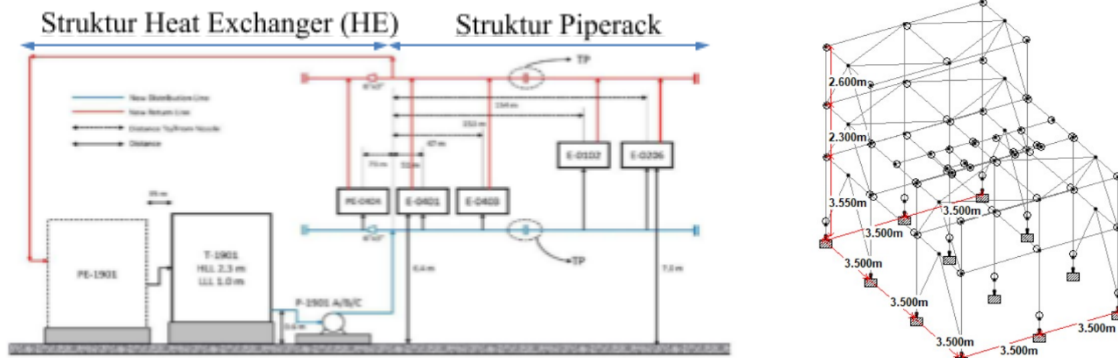
Pengembangan fasilitas proses pada industri pengolahan gas sering kali memerlukan modifikasi sistem utilitas untuk menjaga stabilitas operasi. Salah satu upaya yang dilakukan adalah penambahan unit penukar panas (*heat exchanger*) pada sistem pendinginan untuk mengendalikan temperatur proses. Oleh karena itu, diperlukan penambahan fasilitas berupa bangunan *heat exchanger* (HE) yang menggunakan fondasi tiang untuk mentransfer beban struktur ke lapisan tanah di bawahnya seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Dalam perencanaan fondasi tiang, kondisi tanah menjadi faktor utama yang mempengaruhi kapasitas dukung dan perilaku deformasi fondasi. Pada lokasi penelitian, kondisi tanah permukaan didominasi oleh tanah lempung jenuh air yang memiliki potensi deformasi relatif besar. Kondisi ini dapat menimbulkan berbagai permasalahan selama proses konstruksi fondasi tiang, terutama pada pekerjaan tiang bor, seperti ketidakstabilan dinding lubang bor, masuknya air tanah ke dalam lubang pengeboran, serta gangguan pada proses pengecoran beton.

Fondasi borepile dirancang sebagai *floating pile* yang sangat bergantung pada tahanan geser selimut. Namun, selama pelaksanaan konstruksi, keterbatasan dewatering dan penggunaan casing berpotensi mengganggu kondisi tanah di sekitar tiang, sehingga menurunkan kualitas interaksi tanah–struktur dan mengurangi tahanan geser selimut. Kondisi ini menyebabkan kapasitas dukung aktual tidak tercapai secara optimal, yang pada akhirnya memicu terjadinya penurunan berlebih hingga proyek harus dihentikan, meskipun desain awal telah dinyatakan aman. Integrasi SLT dan FEM melalui *back-analysis* digunakan untuk mengkalibrasi parameter tanah sehingga dapat diidentifikasi secara kuantitatif besarnya penurunan kekuatan tanah akibat gangguan konstruksi yang tidak tercermin dalam asumsi desain awal.

Sebagian besar studi terdahulu hanya berhenti pada interpretasi kapasitas ultimit berdasarkan kurva beban–penurunan, tanpa melakukan penyesuaian parameter tanah untuk mengevaluasi ulang respons deformasi fondasi secara komprehensif. Padahal, pada tanah lunak, kriteria penurunan sering kali menjadi faktor pengendali desain dibandingkan kapasitas ultimit semata. Meskipun *Static Load Test* (SLT) merupakan metode paling representatif untuk mengevaluasi kinerja fondasi tiang, dalam praktiknya pengujian sering kali tidak mencapai kondisi keruntuhan ultimit (*plunging failure*) akibat keterbatasan teknis, biaya, maupun faktor keamanan. Kondisi

ini menghasilkan kurva beban–penurunan yang tidak lengkap, sehingga validitas interpretasi kapasitas ultimit dipertanyakan.

Metode empiris konvensional dalam interpretasi SLT bergantung pada asumsi bentuk kurva yang tidak dapat dibenarkan secara fisik ketika data pengujian belum mencapai fase nonlinier atau keruntuhan, sehingga menghasilkan ekstrapolasi yang tidak terkendali dan berpotensi menyesatkan. Selain itu, metode-metode tersebut mengabaikan degradasi parameter tanah akibat proses konstruksi, sehingga menciptakan kesenjangan kritis dalam evaluasi kinerja fondasi berdasarkan data SLT yang tidak lengkap.



Gambar 1. Skema Jalur AGRU & DHU (kiri) dan struktur bangunan heat exchanger (kanan)

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk:

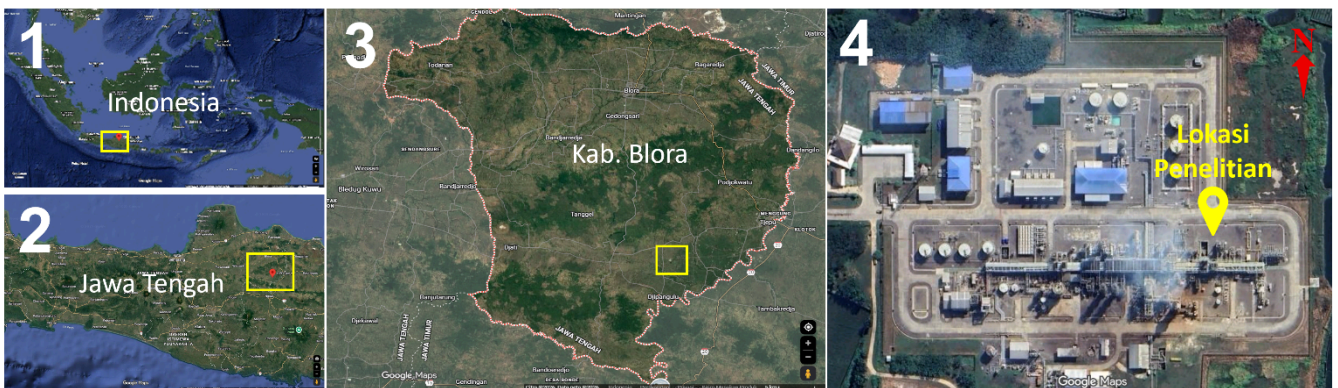
- (1) mengevaluasi anomali penurunan dini berdasarkan data empiris Static Load Test pada existing bored pile;
- (2) melakukan analisis balik (back-analysis) berbasis elemen hingga untuk mengkuantifikasi degradasi parameter kekuatan dan kekakuan tanah akibat efek instalasi konstruksi; dan
- (3) mengevaluasi kembali kapasitas dukung aktual serta memprediksi perilaku penurunan jangka panjang fondasi.

Kebaruan penelitian ini terletak pada kuantifikasi degradasi parameter tanah akibat metode konstruksi suboptimal pada lempung jenuh air, sehingga memungkinkan evaluasi kinerja fondasi yang tidak hanya lebih representatif, tetapi juga lebih relevan secara praktis bagi kondisi lapangan nyata.

2 METODOLOGI

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada proyek penambahan fasilitas heat exchanger dan sistem pompa air pendingin di sebuah fasilitas pengolahan gas di Cepu, Kabupaten Blora, Jawa Tengah yang ditunjukkan oleh Gambar 2.

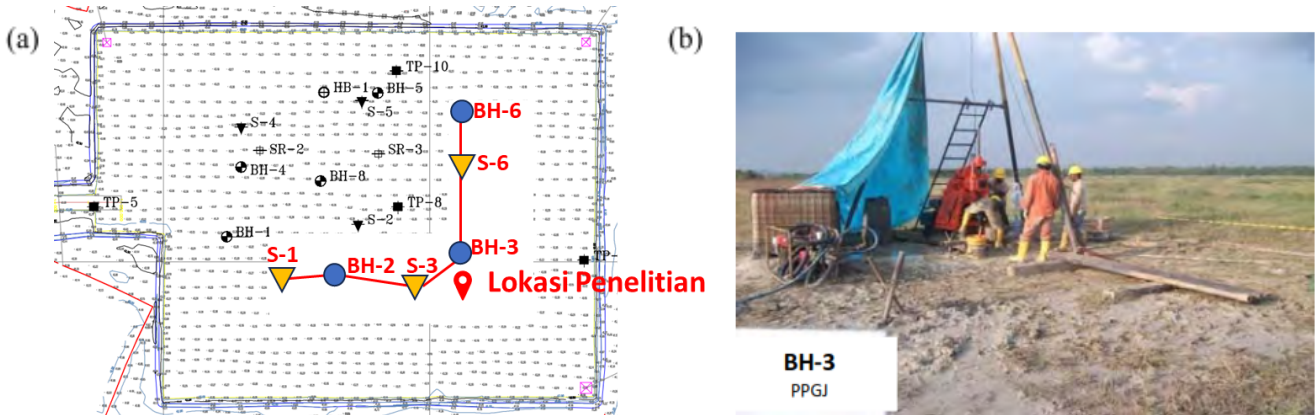


Gambar 2. Lokasi Penelitian di Cepu, Blora, Jawa Tengah

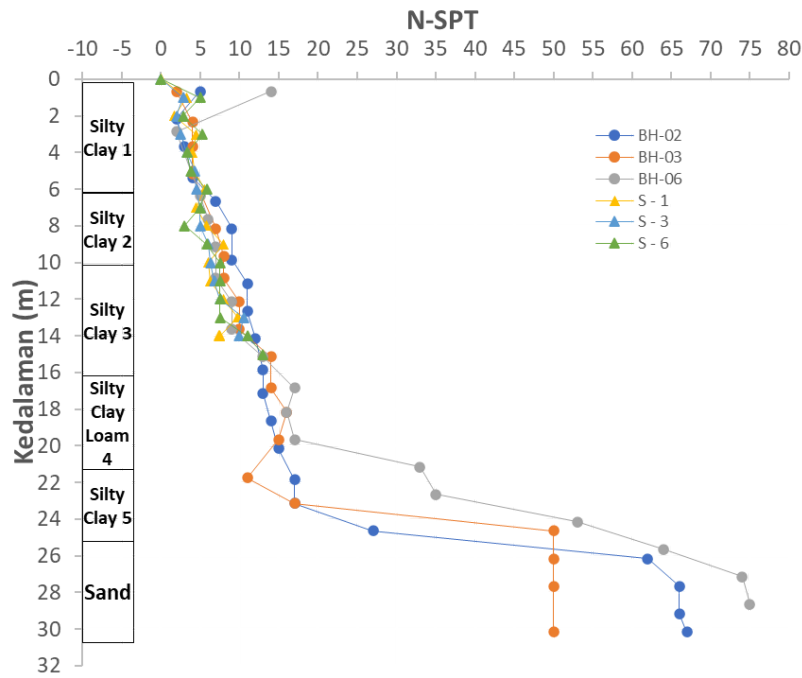
2.2 Data Tanah

Data profil tanah diperoleh dari penyelidikan tanah (soil investigation) awal pada tahun 2011, yang mencakup pengujian lapangan dan laboratorium. Data ini direferensikan karena desain awal fondasi existing menggunakan

parameter dari penyelidikan tersebut. Pengujian lapangan berupa Standard Penetration Test (SPT) dan Cone Penetration Test (CPT) ditunjukkan pada Gambar 3(a) dan 3(b). Sementara itu, hasil pengujian laboratorium untuk menentukan parameter mekanis geoteknik dasar (baseline parameters) disajikan pada Gambar 4.



Gambar 3. (a) Soil Investigation dan titik-titik pengujian SPT(BH) dan Sondir/CPT (S) yang ditinjau (b) Dokumentasi aktivitas boring pada 2011 terpantau lahan masih kosong belum terdapat bangunan.



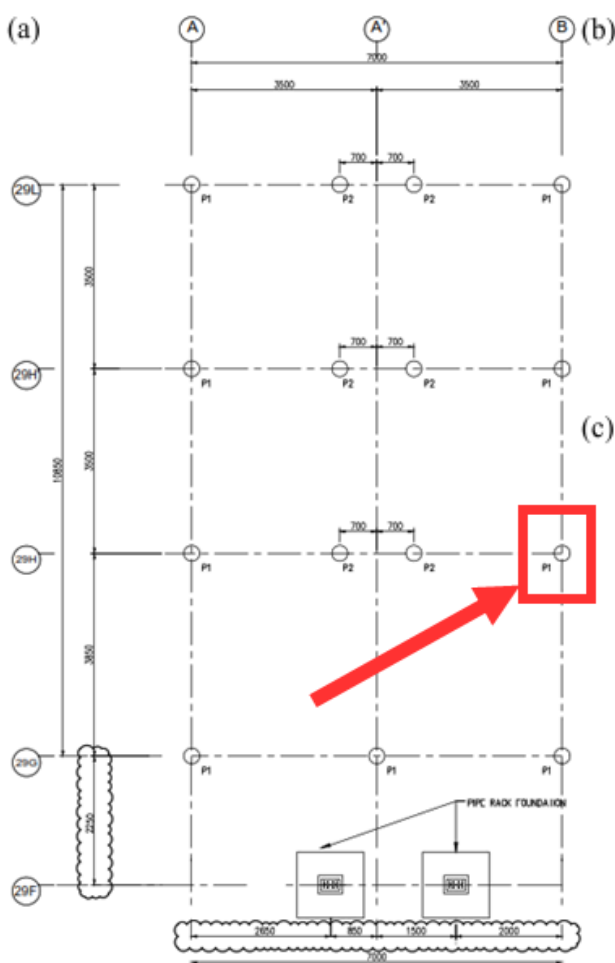
Gambar 4. Grafik N-SPT dari SPT dan korelasi CPT berdasarkan Meyerhof (1959) serta pembagian model tanah.

2.3 Kondisi Aktual Fondasi, Kendala Konstruksi, dan Keterbatasan Static Load Test sebagai Dasar Kebutuhan Back-Analysis

Fondasi yang dianalisis dalam penelitian ini merupakan tiang tunggal *bored pile* dengan diameter 0,30 m dan panjang 14 m, menggunakan mutu beton K-350. Tiang yang ditinjau adalah titik 29H-B sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5(a). Berdasarkan konfigurasi geometrinya, fondasi ini berpotensi bekerja sebagai floating pile, yaitu kondisi di mana kontribusi tahanan ujung relatif kecil sehingga sebagian besar beban dipikul oleh tahanan geser selimut. Pada tanah lempung jenuh air, kondisi ini umumnya dianalisis dalam keadaan tak terdrainase (*undrained condition*), di mana kuat geser direpresentasikan oleh kohesi tak terdrainase (c_u) dan sudut geser dalam efektif mendekati nol. Dalam kondisi tersebut, kapasitas ultimit merupakan kombinasi antara tahanan ujung dan tahanan selimut, dengan mobilisasi tahanan selimut yang terjadi secara progresif seiring bertambahnya deformasi, sehingga respons fondasi sangat dipengaruhi oleh karakteristik deformasi tanah.

Namun demikian, kondisi aktual di lapangan menunjukkan adanya kendala konstruksi yang signifikan. Proses dewatering tidak berjalan optimal dan penggunaan casing selama pengeboran berpotensi menyebabkan gangguan pada tanah di sekitar tiang, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5(b). Kondisi ini dapat mengakibatkan terbentuknya zona tanah terganggu (*disturbed zone*) yang berimplikasi pada penurunan kualitas interaksi tanah–struktur, khususnya dalam bentuk reduksi tahanan geser selimut. Pada sistem floating pile, kondisi ini menjadi kritis karena kinerja fondasi sangat bergantung pada kontribusi friksi selimut, sehingga degradasi lokal dapat berdampak langsung terhadap kapasitas dukung dan respons penurunan.

Untuk mengevaluasi kinerja aktual fondasi, dilakukan pengujian Static Load Test (SLT) menggunakan metode *Quick Test* sesuai ASTM D1143/D1143M. Pengujian ini menghasilkan hubungan beban–penurunan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5(c), yang secara umum digunakan sebagai dasar interpretasi kapasitas ultimit dan perilaku deformasi fondasi. Pada tanah lempung jenuh, metode *Quick Test* merepresentasikan respons tak terdrainase karena waktu pembebanan yang relatif singkat tidak memungkinkan disipasi tekanan air pori secara signifikan.



Data Tiang		
No. Tiang	29H/B	
Tanggal Uji	24/03/2025	
Jenis Tiang	Bor	
Diameter Tiang [mm]	300	
Panjang Tiang [m]	13.0	
Daya Dukung Tekan Rencana [ton]	8.92	
Daya Dukung Tekan Ultimate [ton]	17.83	
Penurunan yang diijinkan [mm]	25.0	
Jenis Pengujian	Quick Test	
Pengukuran Data Tiang Uji		
Pembebanan 10% [0.89 Ton]		
- Pergeseran Tiang [mm]	9.82	
Pembebanan 20% [1.78 Ton]		
- Pergeseran Tiang [mm]	25.53	
Interprestasi Daya Dukung Metode Chin [ton]	1.89	
Interprestasi Daya Dukung Metode Mazurkiewich [ton]	1.78	
Interprestasi Daya Dukung Metode Davisson [ton]	1.78	
Catatan:		
Pada saat pembebanan dari 1.873Ton (20%), dial indicator menunjukkan penurunan tiang yang signifikan sebesar 25.53mm (penurunan yang diijinkan sebesar 25.0mm). Sehingga pembebanan & pembacaan dihentikan		

Gambar 5. (a) Rencana Fondasi dan titik fondasi yang diuji SLT (b) kondisi *existing* fondasi di tahun 2025 pada tahap konstruksi dan (c) report hasil Uji Beban Statis pada *Existing Bored Pile*.

Namun, dalam kasus ini, data SLT yang diperoleh tidak sepenuhnya mencapai kondisi ultimit atau menunjukkan indikasi *plunging failure*. Hal ini menyebabkan keterbatasan dalam penerapan metode interpretasi empiris konvensional seperti metode Davisson (1972), Chin (1970), dan Mazurkiewicz (1972) yang pada dasarnya bergantung pada asumsi bentuk kurva tertentu yang hanya valid apabila respons nonlinier telah berkembang secara memadai. Ketika kurva beban–penurunan masih berada pada tahap awal atau belum menunjukkan kecenderungan menuju keruntuhan, hasil interpretasi menjadi tidak unik dan berpotensi menghasilkan estimasi kapasitas yang tidak representatif terhadap kondisi lapangan.

Selain itu, metode empiris tersebut juga tidak mempertimbangkan pengaruh degradasi parameter tanah akibat proses konstruksi, seperti gangguan tanah di sekitar tiang yang terjadi akibat penggunaan casing dan keterbatasan

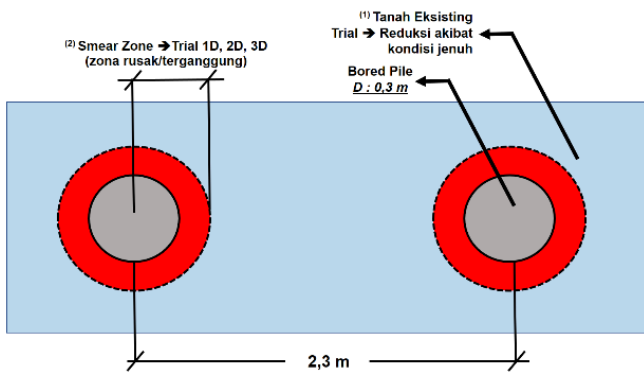
dewatering. Akibatnya, interpretasi yang dihasilkan cenderung tidak mampu merepresentasikan kondisi aktual sistem tanah–struktur pasca konstruksi.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, diperlukan pendekatan alternatif yang mampu mengintegrasikan data lapangan dengan model mekanistik, yaitu melalui back-analysis berbasis Finite Element Method (FEM). Dalam pendekatan ini, kurva load–settlement hasil SLT digunakan sebagai acuan untuk mengkalibrasi parameter tanah dalam model numerik, seperti modulus deformasi dan kuat geser. Proses ini dilakukan secara iteratif hingga respons hasil simulasi mendekati respons lapangan dalam batas toleransi tertentu.

Melalui pendekatan *back-analysis*, tidak hanya diperoleh representasi perilaku fondasi yang lebih realistis, tetapi juga memungkinkan untuk mengidentifikasi secara kuantitatif besarnya degradasi parameter tanah akibat kondisi konstruksi yang tidak ideal. Dengan demikian, metode ini menjadi krusial dalam menjembatani kesenjangan antara asumsi desain dan kondisi aktual di lapangan, khususnya pada fondasi tiang di tanah lempung jenuh air yang sensitif

2.4 Pemodelan Elemen Hingga untuk Mengakomodir Soil Disturbance

Model Mohr–Coulomb merupakan model elastoplastik linier yang paling umum digunakan dalam analisis geoteknik. Model ini didefinisikan oleh empat parameter utama: modulus elastisitas (E), rasio Poisson (ν), kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Dalam kondisi undrained untuk tanah lempung jenuh, analisis biasanya dilakukan dengan pendekatan total stress menggunakan parameter kohesi tak terdrainase. Kelebihan utama model Mohr–Coulomb adalah kesederhanaan dan kemudahan kalibrasi (Vermeer & Brinkgreve, 1994). Namun, model ini memiliki keterbatasan karena mengasumsikan perilaku elastis linier sebelum mencapai kriteria keruntuhan, serta tidak merepresentasikan kekakuan tanah yang bergantung pada tingkat tegangan (*stress-dependent stiffness*) (Duncan & Chang, 1970). Akibatnya, prediksi penurunan dapat menjadi kurang akurat apabila parameter modulus elastisitas tidak dikalibrasi dengan baik (Benz, 2007). Oleh karena itu, dalam konteks evaluasi fondasi berbasis data lapangan, diperlukan pendekatan back-analysis untuk menyesuaikan parameter c_u , ϕ dan E agar kurva numerik dapat merepresentasikan respons aktual hasil SLT. Input parameter tanah dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 6. Pemodelan Simulasi SLT dengan FEM

Metode penentuan *soil properties* untuk kondisi tanah *existing* dilakukan dengan pemodelan/Simulasi SLT dengan FEM hingga mendapatkan nilai penurunan simulasi sama atau mendekati dengan nilai hasil uji SLT aktual lapangan pada 10% dan 20% pembebanan. Pemodelan dilakukan dengan simulasi bahwa diperkirakan sudah terjadi kerusakan tanah (*smear zone*) (Fellenius, 2016). Tanah terganggu (*remoulded*) ini disimulasikan sebagai remoulded soft clay atau tanah sangat lunak dengan nilai c_u : 1 kPa, ϕ : 1° , yang mana merupakan trik numerik yang umum digunakan dalam pemodelan FEM dan nilai modulus elastisitas yang disarankan Jamiolkowski et al., (1985) dengan rentang 100–500 kPa secara konservatif diambil nilai tengah sehingga nilai E : 300 kPa digunakan pada radius 1D (1

kali diameter), 2D (2 kali diameter), dan 3D (3 kali diameter) pada tiang seperti yang terlihat pada Gambar 6. Lapisan terganggu ini sangat berpengaruh karena terjadi keruntuhan pada dinding lubang dan terjadi infiltrasi air ke dinding lubang. Pemodelan dilakukan dengan memodelkan lapisan tanah lokal mengalami reduksi akibat kondisi terendam tersebut. Pemodelan dilakukan dengan *Mohr-Coulomb model*.

Tabel 1. Parameter Tanah *Existing* dari uji laboratorium dan korelasi N-SPT yang akan digunakan sebagai input parameter

Layers		Borehole (m)		General Properties			Stiffness Properties		Strength Properties		Interface
Materia l	Soil Class	To p	Botto m	γ_{unsat}	γ_{sat}	e_{init}	E (kPa)	ν	c_u (kPa)	ϕ (°)	R_{inter}
Layer 1	Silty Clay	0	-6	17.14	17.5	1.14	5286.40	0.35	4.08	1.86	0.58
Layer 2	Silty Clay	-6	-10	16.55	16.6	1.27	6592.00	0.3	12.00	15.09	0.58

Layer 3	<i>Silty Clay</i>	-10	-16	17.03	17.3	1.16	7360.00	0.3	44.00	6.30	0.50
Layer 4	<i>Silty Clay Loam</i>	-16	-21	18.99	19.2	0.70	8384.00	0.3	75.00	15.30	0.50
Layer 5	<i>Silty Clay</i>	-21	-25	17.00	17.2	1.10	7610.00	0.25	66.00	15.10	0.60
Bedrock	<i>Sand</i>	-25	-50	20.00	20.0 7	0.50	27500.00	0.25	12.00	41.00	Rigid

Preliminary trial dilakukan untuk menentukan radius smear zone yang digunakan. Berdasarkan uji coba awal (*preliminary analysis*), zona terganggu (*smear zone*) yang mendekati adalah 1D atau radius 30 cm dari tiang, sehingga radius 1D digunakan dalam pemodelan. Trial Kembali dilakukan hingga hasil penurunan pada hasil simulasi pembebanan 10% dan 20% memiliki kesamaan dengan hasil uji SLT >90%. Ketersediaan hasil uji SLT yang hanya dilakukan pada pembebanan 10% dan 20% merupakan kekurangan data dalam investigasi lapangan, sehingga perlu dilakukan ekstrapolasi terhadap data pada pembebanan 21% sampai 100%. Ekstrapolasi dilakukan dengan meningkatkan beban secara bertahap 30%, 40%, 50%, 60% dan seterusnya berdasarkan kebutuhan evaluasi daya dukung.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Interpretasi Soil Stratigraphy

Berdasarkan interpretasi data hasil uji lapangan, karakteristik per lapisan tanah dapat dikategorikan dalam beberapa lapisan. Kedalaman -0.00 s/d -10.00 merupakan lapisan tanah lempung sangat lunak hingga lunak yang berpotensi runtuh ketika pelaksanaan pekerjaan boring. Rentang kedalaman tersebut memiliki kuat dukung friksi yang rendah, sehingga kesalahan metode konstruksi dapat mengakibatkan hilangnya nilai kuat dukung friksi pada tiang atau tiang dapat dianggap melayang (*floating pile*). Selanjutnya, pada rentang kedalaman -10.00 s/d -20.00 m tanah memiliki konsistensi *medium to stiff* yang mana memiliki kekuatan yang sedikit lebih baik dari lapisan di atasnya. Pada lapisan ini tanah sudah dapat digunakan sebagai *end bearing pile*, namun perlu diperhatikan lebih lanjut terkait dengan penurunan vertikal ujung tiang. Terakhir, kedalaman >-20.00 m, merupakan tanah keras (*hard clay to bedrock*) yang mana lebih memungkinkan diandalkan sebagai *end bearing pile*.

3.2 Review Static Load Test

Review hasil uji pembebanan statis dilakukan untuk menentukan parameter tanah yang sesuai dengan kondisi aktual. Berdasarkan hasil uji SLT pada Gambar 5(c), ketika pembebanan 20% dari beban rencana dilakukan, penurunan tiang menunjukkan 25.53 mm yang mana melebihi penurunan izin 1 inchi atau 25.4 mm. Berdasarkan hasil uji tersebut diketahui bahwa kuat dukung aktual tidak tercapai seperti yang direncanakan. Interpretasi awal terkait kapasitas dukung aktual diperoleh menggunakan metode Chin (1970), Davisson (1972) dan Mazurkiewicz (1972) yang mana metode-metode tersebut merupakan pendekatan berbasis grafis yang memplot rasio penurunan per beban terhadap penurunan untuk menentukan kapasitas ultimit yang memungkinkan estimasi daya dukung ultimit aktual bahkan jika pembebanan pada uji statik tidak mencapai keruntuhan total tanah. Perbandingan antara kapasitas aktual dengan beban rencana dan kapasitas desain ultimit ditunjukkan pada Tabel 2. Untuk mengetahui reduksi kapasitas dukung yang terjadi, nilai kuat dukung tiang aktual yang didapat dibandingkan dengan beban uji rencana dan kapasitas ultimit desain.

Tabel 2. Perbandingan antara Kapasitas Aktual dengan Beban Rencana dan Kapasitas Desain Ultimit

Metode Interpretasi SLT	Q_u (Aktual) (Kapasitas Ultimit Aktual Hasil Interpretasi SLT) (ton)	P (Rencana) (Beban Rencana Uji SLT (ton))	Q_u (Ultimit) (Kapasitas Ultimit Desain) (ton)	Reduksi Kekuatan	
				Q_u (Aktual) / P (Rencana)	Q_u (Aktual) / Q_u (Ultimit)
Metode Chin	1.89	8.92	17.45	-78.81%	-89.34%
Metode Davisson	1.78			-80.04%	-90.02%
Metode Mazurkiewicz	1.78			-80.04%	-90.02%
Rata-rata Reduksi Kekuatan				-79.63%	-89.79%

Berdasarkan Tabel 2, kapasitas aktual tiang mengalami reduksi yang sangat signifikan yaitu 79.63% mendekati 80% dari beban uji yang direncanakan dan kapasitas aktual tereduksi hingga 90.93% dari kapasitas ultimit desain. Perlu menjadi catatan bahwa nilai tersebut juga mengandung ketidakpastian yang tinggi karena kurva SLT berhenti secara prematur di beban 20%. Pemberhentian kurva secara prematur tidak dapat diterima apabila digunakan sebagai dasar analisis desain ulang fondasi karena dapat menghasilkan bias nilai yang cukup besar.

Metode-metode grafis yang telah disebutkan membutuhkan trend hiperbolik yang jelas dan sangat rentan overestimasi jika belum ada *nonlinear behavior* yang mana akurasi akan turun drastis jika data belum mendekati failure atau hanya sedikit titik. Namun, apabila sudut pandang dihadapkan pada pertanyaan kenapa kegagalan penurunan pile bisa terjadi? Langkah ini bukanlah semata ekstrapolasi asimtotik tak beralasan, tapi *early-stage prediction with strong assumptions* yang dapat menjadi *technical judgement* yang kuat bagi *stakeholder* bahwa data penyelidikan tanah awal sudah tidak akurat sehingga keputusan dapat diarahkan untuk melakukan investigasi ulang *soil properties* dari kondisi *existing* tanah serta estimasi awal biaya perbaikan fondasi dapat diperoleh.

Meskipun data SLT yang terbatas (hanya dua titik pembebanan awal) tidak memadai untuk interpretasi menggunakan metode empiris konvensional, data tersebut tetap mengandung informasi penting mengenai kekakuan awal sistem tanah–tiang terutama pada tahap awal kegagalan. Dengan mengintegrasikan respons tahap awal ini ke dalam model mekanistik serta memasukkan asumsi kuat terkait perilaku tanah, permasalahan dapat diformulasikan ulang sebagai suatu analisis invers terkendali (*constrained inverse analysis*) untuk mengestimasi degradasi parameter tanah dan memprediksi respons lengkap kurva beban–penurunan.

3.3 Penentuan Kalibrasi Parameter Tanah

Degradasi parameter tanah di sekitar tiang akibat proses konstruksi dapat dijelaskan melalui mekanisme remoulding dan pembentukan smear zone, yang menyebabkan penurunan kuat geser tak terdrainase dan modulus deformasi tanah. Selain itu, kualitas interaksi tanah–beton juga menurun akibat terbentuknya lapisan lemah pada interface, yang direpresentasikan melalui penurunan nilai kohesi. Berdasarkan teori tahanan selimut pada tanah lempung, kombinasi penurunan parameter tersebut secara signifikan mengurangi kapasitas dukung tiang sekaligus meningkatkan deformasi, sehingga menghasilkan respons load–settlement yang lebih lunak dibandingkan asumsi desain awal.

Tanah yang sudah dianggap terganggu perlu untuk dimodelkan sehingga dapat dilakukan kalibrasi parameter dengan mereduksi parameter kekuatan c_u , ϕ dan E yang didapatkan dari soil investigation. Dalam pemodelan, trial dalam mereduksi parameter diperlukan untuk mendekati parameter yang akan dituju. Trial input dalam simulasi tersebut dilakukan dapat dilihat pada Tabel 3 s/d 5. Tanah yang dimodelkan dengan masing-masing reduksi kekuatan saat diberikan beban menghasilkan penurunan yang berbeda-beda. Penurunan dalam model inilah yang dibandingkan dengan penurunan aktual yang terjadi di lapangan.

Tabel 3. Nilai kohesi tanah untuk simulasi dengan beberapa kekuatan tinjau

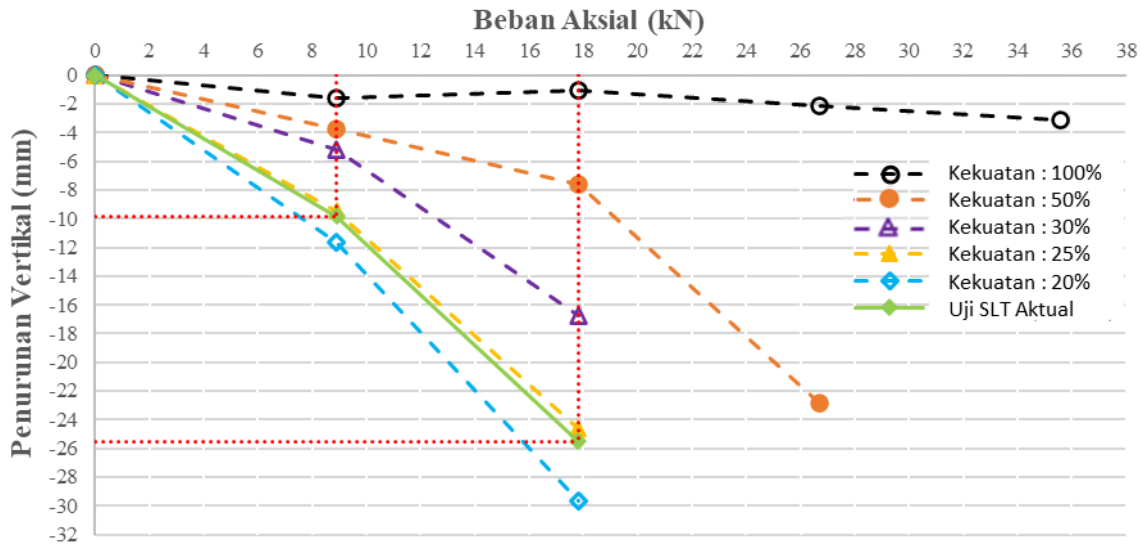
Lapisan		Kekuatan c'_{ref} (kPa)				
Material	Kategori Tanah	100%	50%	30%	25%	20%
Layer 1	Silty Clay	4.08	2.54	1.92	1.77	1.62
Layer 2	Silty Clay	12.00	6.50	4.30	3.75	3.20
Layer 3	Silty Clay	44.00	22.50	13.90	11.75	9.60
Layer 4	Silty Clay Loam	75.00	38.00	23.20	19.50	15.80
Layer 5	Silty Clay	66.00	33.50	20.50	17.25	14.00

Tabel 4. Nilai sudut gesek tanah untuk simulasi dengan beberapa kekuatan tinjau

Lapisan		Kekuatan ϕ' (°)				
Material	Kategori Tanah	100%	50%	30%	25%	20%
Layer 1	Silty Clay	1.86	1.43	1.26	1.22	1.17
Layer 2	Silty Clay	15.09	8.05	5.23	4.52	3.82
Layer 3	Silty Clay	6.30	3.65	2.59	2.33	2.06
Layer 4	Silty Clay Loam	15.30	8.15	5.29	4.58	3.86
Layer 5	Silty Clay	15.10	8.05	5.23	4.53	3.82

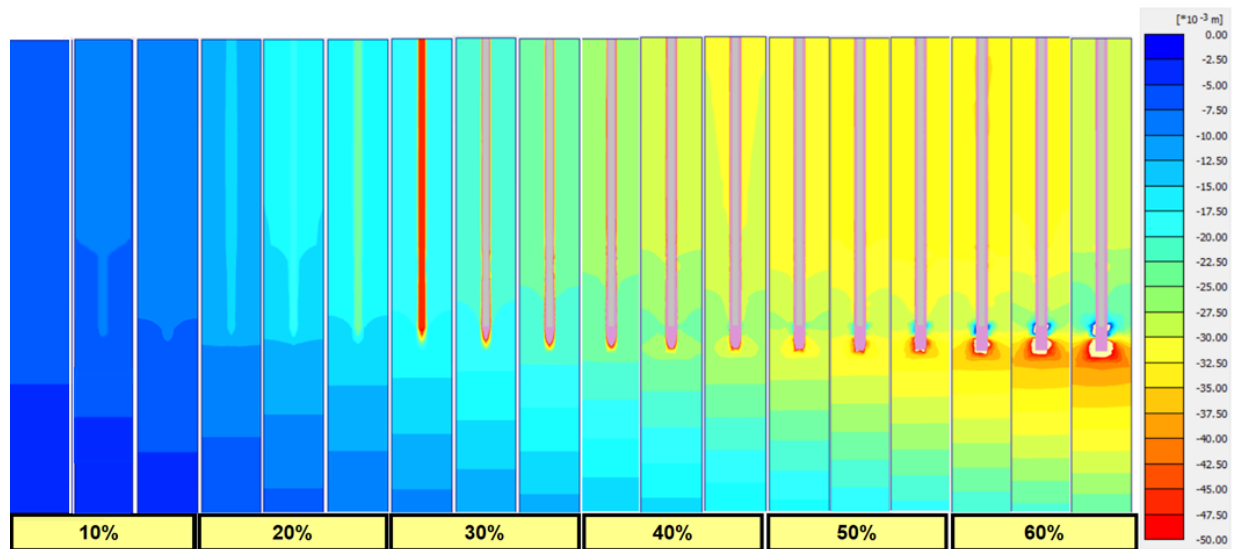
Tabel 5. Nilai sudut gesek tanah untuk simulasi dengan beberapa kekuatan tinjau

Lapisan		Kekuatan E_{ref} (kPa)				
Material	Kategori Tanah	100%	50%	30%	25%	20%
Layer 1	Silty Clay	5286	2643	1796	1322	1057
Layer 2	Silty Clay	6592	3296	2188	1648	1318
Layer 3	Silty Clay	7360	3680	2418	1840	1472
Layer 4	Silty Clay Loam	8384	4192	2725	2096	1677
Layer 5	Silty Clay	7616	3808	2495	1904	1523



Gambar 7. Grafik hasil simulasi SLT berdasarkan reduksi parameter

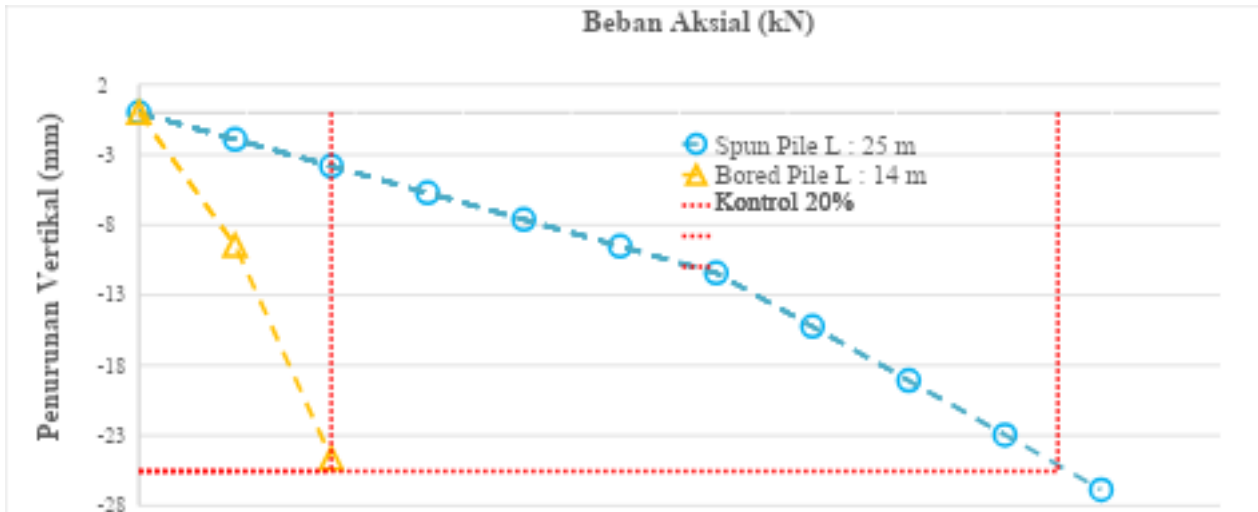
Berdasarkan Gambar 7, apabila tanah masih dalam kondisi kekuatan awalnya penurunan yang terjadi seharusnya mendekati model kekuatan 100%. Pada model tanah strength 25% didapatkan penurunan sedikit lebih kecil daripada penurunan SLT aktual. Kondisi yang ideal tentunya adalah sama atau sedikit lebih besar dari penurunan pada SLT aktual. Simulasi ulang dapat mendekati hasil simulasi agar sesuai SLT aktual. Meski begitu, hasil tersebut sudah cukup untuk menunjukkan bahwa model tanah sudah mendekati kondisi tanah di lapangan. Pada tahap ini, model tanah sudah dapat dikenai beban rencana dengan seri pembebanan >20% serta perilakunya dapat diamati pada Gambar 8 terlihat bahwa pada ujung tiang memiliki shading merah yang mana kondisi pile sudah runtuh. Iterasi terus dilakukan hingga diyakini bahwa model tanah 25% strength sudah mendekati kondisi tanah secara aktual di lapangan maka didapatkanlah parameter yang melekat pada model tanah 25% yang ditunjukkan pada Tabel 6. Model tanah ini dapat digunakan untuk mendesain ulang fondasi dan membandingkannya dengan fondasi lama yang gagal lebih dulu pada beban rendah seperti pada Gambar 9.



Gambar 8. *Vertical Displacement (Uz)* Hasil Simulasi FEM dengan presentase pembebanan pada saat pembebanan, penurunan segera, dan *Primary Settlement*.

Tabel 6. Parameter tanah dengan *shear strength properties* aktual 25%

<i>Layers</i>		<i>Borehole (m)</i>		<i>General Properties</i>			<i>Stiffness Properties</i>		<i>Strength Properties</i>		<i>Interfac e</i>
<i>Materia l</i>	<i>Soil Class</i>	<i>Top</i>	<i>Bottom</i>	γ_{unsat}	γ_{sat}	e_{init}	E (kPa)	ν	c_u (kPa)	ϕ (°)	R_{inter}
Layer 1	<i>Silty Clay</i>	0	-6	16.2 9	16.3 8	1.1 4	1322.00	0.40	4.08	1.22	0.58
Layer 2	<i>Silty Clay</i>	-6	-10	16.1 4	16.1 5	1.2 7	1648.00	0.40	12.00	4.52	0.58
Layer 3	<i>Silty Clay</i>	-10	-16	16.2 6	16.3 3	1.1 6	1840.00	0.35	44.00	2.33	0.50
Layer 4	<i>Silty Clay Loam</i>	-16	-21	16.7 5	16.8 0	0.7 0	2096.00	0.35	75.00	4.58	0.50
Layer 5	<i>Silty Clay</i>	-21	-25	16.2 5	16.3 0	1.1 0	1904.00	0.25	66.00	4.53	0.60
Bedrock	<i>Sand</i>	-25	-50	20.0 0	20.7 0	0.5 0	27500.00	0.25	12.00	1.22	<i>Rigid</i>



Gambar 9. Grafik simulasi SLT dengan FEM (*Existing Bored Pile* dan *New Spun Pile*)

Berdasarkan Gambar 9, simulasi penurunan pada model tanah dengan kekuatan aktual 25% menunjukkan hasil yang berbeda signifikan antara kedua tipe tiang. Penurunan melebihi batas 25,4 mm terjadi pada beban 17,45 kN untuk *bored pile* ($L=14$ m), sementara pada *spun pile* ($L=25$ m) baru tercapai saat beban menyentuh 85 kN. Trial penggunaan panjang 25 m didasarkan pada kedalaman lapisan tanah keras (tanah dasar) yang merupakan kedalaman akhir dari *floating pile* dan awal dari *end bearing*, di mana tiang dengan panjang melebihi kedalaman tersebut memiliki potensi penurunan yang lebih kecil. Dengan demikian, spun pile baru dengan kedalaman 25 m *pile* belum aman sebagai solusi perbaikan karena pada beban rencana 8,92-ton (87,47 kN) penurunan kritis masih terjadi. Maka, berdasarkan estimasi desain perbaikan fondasi, skema *floating pile* tidak relevan sehingga skema *end-bearing pile* digunakan.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi terhadap fondasi bored pile pada tanah lempung jenuh air, penelitian ini menghasilkan beberapa temuan utama sebagai berikut:

(1) Hasil interpretasi data Static Load Test (SLT) menunjukkan bahwa respons penurunan fondasi pada tahap awal pembebanan telah menyimpang dari prediksi desain ditunjukkan oleh kenaikan *settlement* yang relatif besar dengan 9.85 mm pada 10% beban rencana dan 25.53 mm pada 20% beban rencana. Kondisi ini mengindikasikan adanya anomali perilaku deformasi. Selain itu, keterbatasan data SLT yang belum mencapai kondisi ultimit menyebabkan metode interpretasi empiris konvensional tidak memberikan hasil yang representatif.

(2) Melalui pendekatan back-analysis berbasis Finite Element Method (FEM) yang dikalibrasi terhadap kurva load–settlement hasil SLT, dapat disimpulkan bahwa telah terjadi degradasi signifikan pada parameter tanah, khususnya: penurunan kohesi tak terdrainase (c_u), sudut gesek dalam (ϕ) dan penurunan modulus deformasi (E) menjadi hanya menyisakan 25%. Degradasi ini diinterpretasikan sebagai akibat dari gangguan tanah selama proses konstruksi, seperti penggunaan casing dan kondisi dewatering yang tidak optimal, yang memicu terbentuknya zona tanah terganggu (*smear zone*) di sekitar tiang. Hasil ini menegaskan bahwa parameter desain awal tidak lagi merepresentasikan kondisi aktual di lapangan.

(3) Berdasarkan parameter hasil kalibrasi, kapasitas dukung aktual fondasi mengalami penurunan dibandingkan nilai desain kapasitas ultimit sebesar 17.45 kN. atau berkurang 89.79%. Selain itu, hasil analisis menunjukkan bahwa fondasi memiliki kecenderungan penurunan jangka panjang yang lebih besar, terutama akibat dominasi mekanisme friksi selimut pada kondisi *floating pile* serta rendahnya kekakuan tanah di sekitar tiang. Penurunan melebihi batas 25,4 mm masih terjadi pada pile dengan kedalaman 25 m mencapai tanah keras pada pembebanan 85 kN yang menegaskan bahwa skema *floating pile* sudah tidak relevan.

REFERENSI

- Benz, T. (2007). *Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences*. Dordrecht: Springer.
 Chin, F. K. (1970). Estimation of the Ultimate Load of Piles Not Carried to Failure. *Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering*, 81–90.

- Davisson, M. T. (1972). High Capacity Piles. *Design of Foundations for Control of Settlements* (pp. 81–112). Illinois: ASCE.
- Duncan, J. M., & Chang, C. Y. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *ournal of the Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE*, 1629-1653.
- Fellenius, B. H. (2016). *Basics of Foundation Design* (Vol. Electronic Edition). Calgary: Self-published: www.fellenius.net.
- Fleming, K., Weltman, A., Randolph, M. F., & Elson, K. (2009). *Piling Engineering*. New York: Taylor & Francis.
- Gioda, G., & Maier, G. (2009). *Parameter identification in geotechnical engineering*. Berlin: Springer.
- Hirany, A., & Kulhawy, F. H. (1989). Interpretation of load–settlement behavior of drilled shafts. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 799-818.
- Jamiolkowski, M. B., Ladd, C. C., Germaine, J. T., & Lancellota, R. (1985). New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils. *11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 57–153). Rotterdam: A.A. Balkema.
- Levasseur, S., & Potvin, J. M. (2009). *Parameter identification in geotechnical engineering: Back-analysis perspective*. Dordrecht: Springer.
- Mazurkiewicz, B. K. (1972). Load Tests on Piles. *Proceedings of the Symposium on Bearing Capacity of Piles* (pp. 45–60). Warsaw: Polish Academy of Sciences.
- Meyerhof, G. G. (1959). Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 82, 1–19.
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Pile Foundation Analysis and Design*. New York: John Wiley & Sons.
- Randolph, M. F., & Wroth, C. P. (1978). Analysis of deformation of vertically loaded piles. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*.
- Reese, L. C., & O'Neill, M. W. (1999). *Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods*. Washington D.C.: US Department of Transportation.
- Sharhrou, I., Boulon, M., & Kassir, M. K. (2008). *Back analysis in pile foundation engineering*. Abingdon, UK: Taylor & Francis.
- Tomlinson, M. J., & Woodward, J. (2015). *Pile Design and Construction Practice*. London: E&FN SPON.
- Vermeer, P. A., & Brinkgreve, R. (1994). *A new effective stress model for soils: The Soft Soil Model*. Berlin: Springer.