

PERILAKU KEGAGALAN KONSTRUKSI JALAN RAYA YANG BERTUMPU PADA FONDASI TIANG DI TANAH *CLAY SHALE*

Hansel Adisurya¹ dan Chaidir Anwar Makarim²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
hansel.325180013@stu.untar.ac.id

² Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
chaidir259@gmail.com

Masuk: 18-01-2022, revisi: 11-02-2022, diterima untuk diterbitkan: 22-02-2022

ABSTRACT

Clay shale has unique mechanical properties compared to other soil types. When dry and undisturbed, clay shale will shrink and resemble hard rock. When the clay shale layer exposes to air and water, it will expand and experience weathering that causes its shear strength to decrease drastically. This research aimed to analyze highway construction that requires strengthening the pile foundation and found a layer of clay shale. The shear strength of clay shale can be reduced by 20% – 80% when exposed to air and water. This study assumes that the clay shale has reduced shear strength due to weathering by 50%. The displacement analysis will use the MIDAS GTS NX program. The results of the axial bearing capacity of the pile with a diameter of 0,8 m and a length of 8 m before the shear strength reduction was 47 tons, while after the shear strength reduction was 33 tons. It needs five piles to carry the design load, whereas if the clay shale's shear strength is 100%, it only needs four. The results of the analysis of highway displacement without pile reinforcement are 50 mm, and it would be 30 mm if the roads are using the pile reinforcement.

Keywords: clay shale; reduction; pile foundation; displacement; bearing capacity.

ABSTRAK

Clay shale memiliki sifat mekanis yang unik dibandingkan dengan jenis tanah lainnya. Ketika dalam kondisi kering dan tidak terganggu, *clay shale* akan menyusut dan sifatnya menyerupai batuan yang sangat keras. Ketika lapisan *clay shale* terekspos oleh udara dan air maka *clay shale* akan mengembang dan mengalami pelapukan yang menyebabkan kekuatan gesernya menurun secara drastis. Penulisan ini akan membahas konstruksi jalan raya yang memerlukan perkuatan fondasi tiang dan ditemukan lapisan *clay shale*. Kuat geser *clay shale* dapat tereduksi sebesar 20% – 80% bila terekspos udara dan air. Pada studi ini, diasumsikan *clay shale* mengalami reduksi kuat geser akibat pelapukan sebesar 50%. Analisis *displacement* akan menggunakan program MIDAS GTS NX. Hasil daya dukung aksial tiang dengan diameter 0,8 m dan panjang 8 m sebelum reduksi kuat geser sebesar 47 ton, sedangkan sesudah reduksi kuat geser sebesar 33 ton. Oleh karena itu diperlukan 5 buah tiang pancang untuk memikul beban rencana, sedangkan jika kuat geser *clay shale* tidak direduksi akan dibutuhkan hanya 4 buah tiang pancang. Hasil analisis *displacement* jalan raya tanpa perkuatan tiang pancang sebesar 50 mm dan *displacement* ketika menggunakan perkuatan tiang pancang sebesar 30 mm.

Kata kunci: *clay shale*; reduksi; fondasi tiang; *displacement*; daya dukung.

1. PENDAHULUAN

Pembangunan konstruksi di Indonesia terus meningkat setiap tahunnya, baik itu pembangunan gedung bertingkat, perumahan, jembatan, jalan, bendungan, dan infrastruktur lainnya untuk memenuhi kebutuhan masyarakat yang jumlahnya juga terus meningkat. Pembangunan infrastruktur tersebut tidak dapat terlepas dari pemahaman dalam bidang geoteknik karena sifat dan karakteristik tanah memegang peranan penting dalam perencanaan fondasi.

Permasalahan di bidang geoteknik yang cukup sering ditemukan di Indonesia antara lain, tanah longsor, tanah lunak, tanah gambut, tanah ekspansif, dan tanah lempung serpih (*clay shale*). *Clay shale* adalah batuan sedimen yang merupakan hasil sedimentasi dari tanah lempung (*clay*) atau tanah lanau (*silt*). *Clay shale* merupakan salah satu jenis tanah yang sulit untuk diidentifikasi melalui penyelidikan tanah karena sifatnya yang dapat berubah secara drastis ketika terekspos cuaca, yaitu udara dan air. Tanah *clay shale* ini banyak ditemukan di daerah Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur.

Pada umumnya, kerusakan dan kegagalan struktur akibat tanah *clay shale* terjadi karena kurang tepatnya analisis terhadap hasil penyelidikan tanah. *Clay shale* akan terlihat seperti batuan keras jika dilihat berdasarkan hasil penyelidikan tanah tanpa menyadari bahwa kekuatan dari *clay shale* ini tidak stabil dan dapat berubah drastis. Kekuatan geser dari tanah *clay shale* dapat turun drastis ketika tanah terekspos cuaca (udara dan air). Lapisan tanah *clay shale* yang menurun drastis kekuatannya akan sangat membahayakan bagi struktur bangunan yang berada di atasnya. Daya dukung tanah yang berkurang drastis akan menyebabkan tanah tidak mampu memikul beban konstruksi di atasnya dan dapat memicu penurunan yang besar bahkan keruntuhan dari konstruksi tersebut.

Kasus-kasus kerusakan konstruksi akibat tanah *clay shale* cukup banyak ditemukan di Indonesia karena masih kurangnya pemahaman akan jenis tanah ini dan menyebabkan kesalahan dalam desain. Beberapa kasus kerusakan akibat tanah *clay shale* yang cukup besar di Indonesia, yaitu Konstruksi Pembangkit Listrik Tenaga Air Tulis pada 1995, Wisma Atlet Hambalang pada 2013, Jalan Tol Penggaron pada 2015, Jalan Tol Cisomang pada 2017, Jalan Tol Cipularang KM 97+500 pada 2006, dan Jalan Tol Semarang – Bawen pada 2015 (Oktaviani et al, 2018).

Penelitian ini memiliki beberapa batasan masalah yang digunakan dalam analisis, yaitu:

1. Parameter tanah yang digunakan berdasarkan korelasi dari nilai N-SPT yang nilainya mendekati kasus nyata.
2. Tanah *clay shale* mengalami pelapukan dan degradasi sudut geser sebesar 50% akibat proses pembasahan dan pengeringan yang disebabkan naik turunnya muka air tanah.
3. Muka air tanah pada musim hujan berada di kedalaman -11,00 meter dan pada musim kemarau berada di kedalaman -15,00 meter.
4. Fondasi tiang yang dianalisis adalah fondasi tiang pancang (*driven pile*) dengan jenis *spun pile*.
5. Tidak memperhitungkan beban lateral dan beban gempa.
6. Kemiringan melintang permukaan jalan diabaikan saat analisis distribusi beban.

Rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini, yaitu:

1. Berapa persen penurunan kuat geser dan daya dukung tiang pada tanah *clay shale* yang mengalami pelapukan?
2. Berapa daya dukung total tiang tunggal dan tiang kelompok yang bertumpu di atas lapisan tanah *clay shale*?
3. Berapa daya dukung total tiang tunggal dan tiang kelompok yang menembus lapisan tanah *clay shale*?
4. Berapa jumlah dan ukuran tiang yang paling cocok digunakan untuk menahan beban konstruksi jalan raya?
5. Berapa *displacement* yang terjadi pada struktur jalan raya ketika diberikan beban rencana sebelum dan sesudah menggunakan perkuatan tiang pancang?

Penelitian ini memiliki beberapa tujuan, antara lain:

1. Mengetahui besar degradasi kekuatan fondasi tiang pancang akibat degradasi kekuatan geser tanah *clay shale*.
2. Mengetahui daya dukung total tiang pancang pada lapisan tanah *clay shale* sebelum dan sesudah mengalami degradasi kuat geser.
3. Mengetahui perbandingan daya dukung tiang yang bertumpu di atas tanah *clay shale* dan daya dukung tiang yang menembus lapisan tanah *clay shale*.
4. Mengetahui ukuran dan jumlah tiang pancang yang dibutuhkan untuk menahan beban konstruksi jalan raya yang bertumpu pada lapisan tanah *clay shale*.
5. Mengetahui *displacement* yang terjadi akibat proses konstruksi yang dilakukan sebelum dan sesudah menggunakan perkuatan tiang pancang.

Batuan

Berdasarkan sifat geologisnya, pada umumnya batuan dapat dibagi menjadi 3 (tiga) kelompok utama yaitu: batuan beku (*igneous rocks*), batuan metamorf (*metamorphic rocks*), dan batuan sedimen (*sedimentary rocks*). (Soetojo, 2009). Sedimen membentuk batuan sedimen melalui proses pemadatan dan sementasi. Sebaliknya, batuan sedimen yang mengalami pelapukan dan erosi dapat menyebabkan batuan tersebut berubah menjadi sedimen kembali. Peristiwa perubahan dari batuan sedimen menjadi sedimen ini yang terjadi pada *clay shale*.

Pelapukan batuan atau *weathering* adalah proses pelemahan dan perusakan batuan pada kulit bumi yang disebabkan oleh pengaruh cuaca, seperti suhu, curah hujan, kelembapan, dan angin. Oleh karena itu, batuan yang semula berupa gumpalan besar dapat hancur menjadi butiran kecil bahkan larut dalam air melalui proses pelapukan (*weathering*). Pelapukan dapat dibagi menjadi tiga macam, yaitu pelapukan fisika, pelapukan kimia, dan pelapukan biologis (Rolls & Bland, 1998).

Tanah Lempung

Tanah lempung merupakan tanah yang butirannya berukuran mikroskopis sampai dengan sub mikroskopis. Tanah lempung berasal dari pelapukan unsur-unsur kimiawi penyusun batuan, tanah lempung akan menjadi sangat keras

dalam keadaan kering dan menjadi bersifat plastis pada kadar air sedang. Pada kadar air lebih tinggi, lempung sangat bersifat lengket (kohesif) dan sangat lunak. (Das & Sobhan, 2014).

Clay Shale

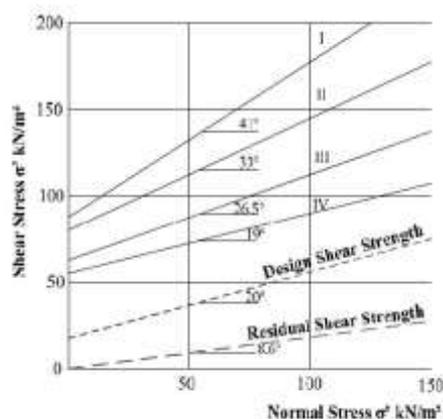
Clay shale merupakan jenis tanah yang sifatnya berada di antara lempung (*clay*) dan batuan (*rock*). Ketika berada di dalam tanah, *clay shale* akan menyerupai batuan yang sangat keras. *Clay shale* akan mengalami pelapukan (*soil weathering*) menjadi lunak dan mengalami degradasi kekuatan yang drastis apabila terjadi kontak dengan cuaca (udara dan air). Sifat ini yang membedakan jenis tanah *clay shale* dengan tanah lempung lainnya, di mana tanah lempung lain umumnya tidak mengalami pelapukan dan degradasi kekuatan yang cukup signifikan ketika terpapar cuaca.

Kuat geser *clay shale* akan berkurang drastis hingga mencapai sangat lunak (*fully softened strength*) apabila dalam kondisi basah dan terendam. Ketika *clay shale* menerima beban berulang (*cyclic loading*), kekuatannya secara bertahap berkurang dari sangat lunak hingga mencapai kekuatan sisa (*residual strength*) (Stark & Duncan, 1991). Karakteristik umum *clay shale* juga dapat diidentifikasi berdasarkan parameter teknik berikut (Wakim, 2005):

1. *Overconsolidated*.
2. Durabilitas rendah saat mengalami pembasahan.
3. Tekanan pengembangan (*swelling pressure*) tinggi.
4. Mengalami disintegrasi yang signifikan setelah mengalami kontak dengan air.

Pengujian laboratorium yang dapat dilakukan untuk mengetahui jenis tanah *clay shale* antara lain, pengujian *Index Properties*, *Direct Shear*, *Unconfined Compression Test*, *Slake Durability Test*, *Disintegration Ratio Test*, *Scanning Electron Microscope* (SEM), dan *X-Ray Diffraction Test* (XRD). Pengujian *index properties* (ASTM D-2216), *direct shear* (ASTM D-3080), dan *unconfined compression test* (ASTM D-2116) dapat digunakan untuk mengidentifikasi tanah *clay shale* di mana ketika kadar air dalam tanah meningkat maka kuat geser tanah tersebut akan menurun drastis.

Pengamatan terhadap tanah lempung ditemukan bahwa lempung yang kering dan keras dengan kuat geser tanah yang tinggi akan berubah menjadi tanah lunak dengan kuat geser tanah yang rendah apabila menyerap air yang cukup banyak. Tanah yang terbuka dan terpapar oleh cuaca juga akan mengalami pelapukan secara berkala sepanjang waktu. Zona tanah yang terpapar oleh cuaca akan mengalami pelapukan dan mengubah *properties* tanah. Selama proses pelapukan ini, kuat geser tanah berubah drastis dari kondisi semula. Kuat geser dan deformasi yang terjadi tergantung pada waktu awal tanah terekspos, tingkat pelapukan, dan *stress relieve* yang terjadi (Gartung, 1986). Gartung (1986) membagi tanah lempung ke dalam 4 zona berdasarkan tingkat pelapukan seperti yang terlihat pada Gambar 1.

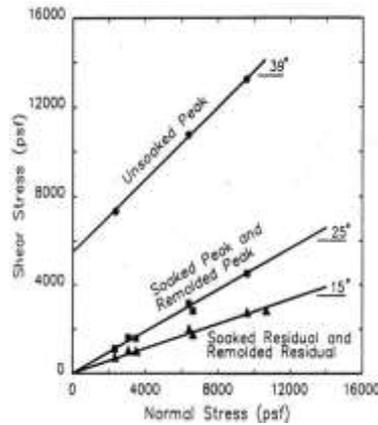


Gambar 1 Zona Kuat Geser Tanah *Clay Shale* (Sumber: Gartung, 1986)

Pada zona 1, tanah *clay shale* belum mengalami pelapukan (*weathering*) sedangkan pada zona 4 tanah *clay shale* sudah mengalami proses akhir pelapukan. Dapat dilihat pada gambar bahwa perubahan yang terjadi pada kuat geser tanah awal sampai ke proses akhir pelapukan terjadi penurunan kuat geser yang sangat besar. Oleh karena itu, perlu memilih parameter tanah yang tepat agar tidak terjadi penurunan berlebih atau kerusakan struktur ketika pelapukan tersebut terjadi.

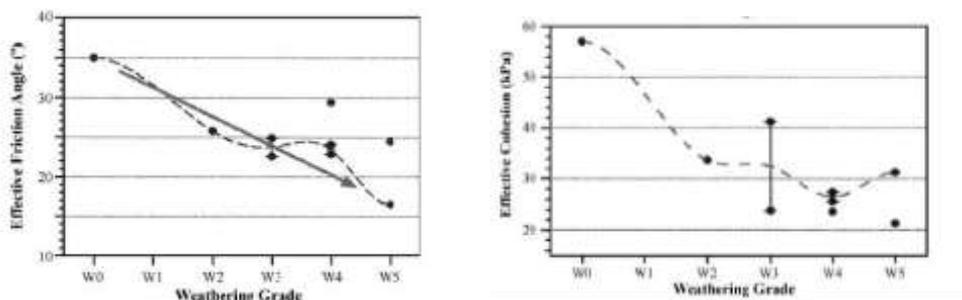
Dalam pengujian *direct shear* pada tanah *clay shale* ditemukan bahwa terjadi penurunan kuat geser tanah *clay shale* yang sangat besar ketika dalam kondisi basah/terendam. Pada *clay shale* yang tersaturasi sebagian, air di dalam rongga akan terkonsentrasi di sekitar partikel tanah dan menghasilkan ikatan antar partikel. Dalam kondisi kering ini, *clay shale* akan menunjukkan tekanan prakonsolidasi semu yang terkait dengan kekuatan ikatan antar

partikel. Merendam *clay shale* akan menghilangkan tekanan negatif pori dan merusak ikatan antar partikel. Penurunan kuat geser tanah *clay shale* pada kondisi kering dan terendam dapat dilihat pada Gambar 2 (Stark & Duncan, 1991).



Gambar 2 Penurunan Kuat Geser Tanah *Clay Shale* (Sumber: Stark dan Duncan, 1991)

Penurunan parameter kohesi dan sudut geser tanah juga terjadi sangat signifikan pada lapisan tanah *clay shale* seiring dengan meningkatnya tingkat pelapukan yang dialami *clay shale*. Semakin meningkatnya tingkat pelapukan yang terjadi yaitu berdasarkan durasi sampel tanah tersebut lapuk maka akan menghasilkan penurunan sudut geser dalam dan kohesi tanah yang signifikan seperti pada Gambar 3 (Stark & Duncan, 1991).



Gambar 3 Penurunan Kuat Geser Berdasarkan Tingkat Pelapukan *Clay Shale* (Sumber: Stark dan Duncan, 1991)

Alatas et al (2015) melakukan pengujian untuk mengetahui besarnya penurunan kuat geser *clay shale* di jalan tol Semarang – Bawen. Perilaku penurunan kuat geser *clay shale* dilakukan dengan cara mengeringkan *clay shale* menggunakan sinar matahari selama 40 hari dan 80 hari agar *clay shale* mengalami pelapukan. Hasil penurunan kuat geser *undrained* yang terjadi pada lapisan tanah *clay shale* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Penurunan Kuat Geser pada Kondisi Tegangan Puncak (Alatas et al, 2015)

Waktu Pengeringan (hari)	Peak Stress Condition					
	Cohesion Undrained			Internal Angel Friction		
	Unsat	Saturated		Unsat	Saturated	
	Cu	Cu total	Cu eff ^a	φ _u	φ _u total	φ _u eff
	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	°	°	°
0	700	300	300	59,4	53,2	53,2
40	270	105	107	68,1	24,2	23,7
80	220	70	79	38,1	19,3	19,3
Reduksi (%)	31	10	11	64	32	32

Tantra dan Prihatiningsih (2019) melakukan pengujian *Unconfined Compression Test* pada sampel tanah *clay shale* di Citereup, Bogor. Pengujian dilakukan dalam dua kondisi, yaitu pengujian pada sampel yang terendam dan pengujian pada sampel yang tidak terendam. Setelah dilakukan percobaan, diperoleh besarnya perbedaan kohesi yang paling besar antara sampel terendam dan tidak terendam adalah sebesar 99,173% pada durasi 5 minggu yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Nilai Kuat Tekan Sampel *Clay Shale* Terendam dan Tidak Terendam (Tantra dan Prihatiningsih, 2019)

Kuat Tekan q_u (kN/m ²)	0 minggu	1 minggu	3 minggu	5 minggu	7 minggu
Tidak Rendam	288.915	570.425	848.755	1133.2275	997.705
Terendam	-	11.635	9.42	9.37	9.45

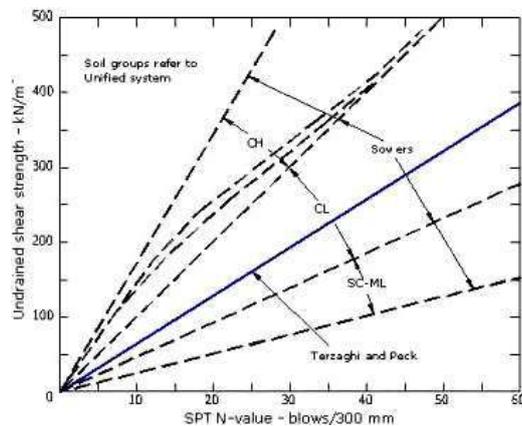
Shale yang mengalami siklus pembasahan dan pengeringan secara berulang kali akan merusak *shale* tersebut dan menyebabkan parameter tanahnya mengalami penurunan yang sangat signifikan. Penelitian yang dilakukan oleh Schaefer (2013) pada tanah *shale* dengan kandungan mineral lempung 48% di kedalaman 63 m, 63,6 m, dan 70,3 m. Sampel tanah *clay shale* diuji melalui siklus pembasahan dan pengeringan selama 48 hingga 72 jam setiap siklusnya. Hasil penelitian tersebut menunjukkan penurunan pada parameter sudut geser tanah dalam residual yang terjadi cukup signifikan yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Sudut Geser Residual Clay Shale Setelah Pelapukan (Schaefer, 2013)

Kedalaman (m)	Siklus Pelapukan	ϕ_r'
63	0	6,8
63	5	5,4
63,6	0	6,1
63,6	5	5,2
70,3	0	6,7
70,3	5	6,6

Kuat Geser Tanah

Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan/tarikan (Hardiyatmo, 2012). Parameter kuat geser tanah dapat diperoleh menggunakan korelasi dengan nilai N-SPT berdasarkan grafik yang diusulkan oleh Terzaghi dan Peck (1976) pada Gambar 4.



Gambar 4 Grafik Hubungan N-SPT dengan Kuat Geser *Undrained* (Sumber: Terzaghi dan Peck, 1976)

Fondasi Tiang

Fondasi tiang merupakan salah satu fondasi dalam yang dapat didefinisikan sebagai fondasi yang meneruskan beban bangunan ke tanah keras atau batuan yang terletak relatif jauh dari permukaan, contohnya fondasi sumuran dan fondasi tiang. (Hardiyatmo, 2011).

Fondasi tiang dapat dibedakan menjadi tiga kategori, yaitu tiang perpindahan besar (tiang pancang pejal), tiang perpindahan kecil (tiang pancang berlubang dengan ujung terbuka atau tiang profil baja), dan tiang tanpa perpindahan (tiang bor). (Hardiyatmo, 2008).

Berdasarkan titik tumpunya di dalam tanah, fondasi tiang dapat dibedakan menjadi dua, yaitu tiang yang tertahan pada ujungnya (*end bearing pile* atau *point bearing pile*) dan tiang yang tertahan oleh gesekan antara tiang dan tanah (*friction pile*) (Wesley, 2012).

Daya Dukung Fondasi Tiang

Berdasarkan rumusan yang diusulkan oleh Terzaghi, daya dukung fondasi tiang dihasilkan oleh daya dukung ujung tiang dan friksi yang terjadi antara tanah dan kulit sepanjang tiang. Hasil penjumlahan kedua daya dukung tersebut menghasilkan daya dukung batas (Q_u) fondasi tiang yang dapat dituliskan dalam persamaan berikut (Das, 2014).

$$Q_u = Q_p + Q_s - W_p \quad (1)$$

dengan Q_u = daya dukung batas tiang, Q_p = daya dukung ujung tiang, Q_s = daya dukung selimut tiang, dan W_p = berat tiang.

Perhitungan daya dukung tiang pada lapisan tanah *clay shale* dilakukan dengan menggunakan persamaan yang diusulkan oleh beberapa ahli untuk menghitung daya dukung tiang di lapisan tanah lempung. Daya dukung yang didapat akan direduksi karena sifat dari *clay shale* yang dapat mengalami reduksi kuat geser dalam kondisi terbuka dan terkena air atau udara.

Daya Dukung Ujung Tiang

Metode Meyerhof

Meyerhof (1976) mengusulkan persamaan untuk menghitung daya dukung ujung tiang yang berada di tanah lempung tersaturasi dalam kondisi *undrained* ($\phi' = 0$) menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$Q_p = 9A_p c_u \quad (2)$$

dengan c_u = kohesi tanah *undrained* di bagian bawah ujung tiang dan A_p = luas penampang tiang.

Metode Vesic

Vesic (1977) juga mengusulkan sebuah metode untuk menghitung daya dukung ujung tiang yang berada pada lapisan tanah lempung yang tersaturasi ($\phi=0$). Persamaan yang diusulkan Vesic adalah sebagai berikut.

$$Q_p = A_p c_u N_c^* \quad (3)$$

$$N_c^* = \frac{4}{3} (\ln I_{rr} + 1) + \frac{\pi}{2} + 1 \quad (4)$$

$$I_{rr} = \frac{E_s}{3c_u} \quad (5)$$

dengan c_u = kohesi tanah *undrained* di bagian bawah ujung tiang, A_p = luas penampang tiang, dan E_s = modulus elastisitas tanah.

Metode N-SPT

Meyerhof (1976) mengusulkan persamaan untuk menghitung daya dukung ujung tiang menggunakan nilai N-SPT, yaitu sebagai berikut.

$$Q_p = 40 \times N_{60} \times \frac{L_B}{D} \times A_p \leq 400 \times N_{60} \times A_p \quad (6)$$

Briaud (1985) juga mengusulkan sebuah persamaan daya dukung ujung tiang menggunakan N-SPT sebagai berikut.

$$Q_p = A_p (19,7 p_a N_{60}^{0.36}) \quad (7)$$

dengan A_p = luas penampang tiang, p_a = tekanan atmosfer (100 kPa), dan N_{60} = nilai N-SPT rata-rata 10D di atas sampai 4D di bawah ujung tiang.

Daya Dukung Selimut Tiang

Daya dukung selimut tiang dapat dihitung menggunakan persamaan yang diusulkan oleh Terzaghi, yaitu:

$$Q_s = \Sigma p \Delta L f \quad (8)$$

dengan Q_s = daya dukung selimut tiang, p = keliling penampang tiang, L = panjang bagian tiang yang ditinjau, dan f = koefisien friksi tiang.

Metode Lambda

Vijayvergiya dan Focht (1972) mengusulkan metode perhitungan koefisien friksi tiang pada lapisan tanah lempung yang dapat dilihat pada persamaan berikut ini.

$$f = \lambda(\bar{\sigma}'_o + 2c_u) \quad (9)$$

dengan f = koefisien friksi tiang, λ = koefisien panjang tiang, c_u = kohesi tanah *undrained*, dan $\bar{\sigma}'_o$ = tegangan vertikal efektif rata-rata.

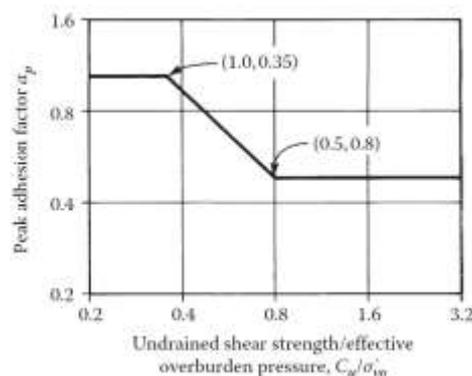
Metode Alfa

Tomlinson (1971) mengusulkan persamaan untuk menghitung koefisien friksi tiang pada lapisan tanah lempung yang dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$f = \alpha c_u \quad (10)$$

dengan f = koefisien friksi tiang, α = faktor adhesi empiris, dan c_u = kohesi tanah *undrained*.

Tomlinson dan Woodward (2015) mengusulkan sebuah grafik korelasi antara faktor adhesi empiris (α) dengan perbandingan kuat geser *undrained* (c_u) dan tegangan vertikal efektif yang dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Grafik Korelasi α dengan c_u/σ_o (Sumber: Tomlinson dan Woodward, 2015)

Metode N-SPT

Meyerhof (1976) dan Briaud (1985) mengusulkan persamaan untuk menghitung koefisien friksi tiang pada lapisan tanah non-kohesif dengan menggunakan korelasi dengan nilai N-SPT, yaitu sebagai berikut.

$$f = x_m N_{60} \quad (11)$$

$$f = 22,4(N_{60})^{0.29} \quad (12)$$

dengan $X_m = 2$ untuk tiang perpindahan besar dan 1 untuk tiang perpindahan kecil, N_{60} = nilai N-SPT.

Analisis Displacement Menggunakan Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan suatu metode perhitungan numerik untuk mempermudah perhitungan dalam berbagai kasus rekayasa. Metode elemen hingga membagi struktur menjadi bagian-bagian kecil (*mesh*) dan sederhana untuk mendapatkan solusi perhitungan. Umumnya, metode elemen hingga digunakan untuk perhitungan struktur yang bentuknya tidak beraturan di mana penyelesaian secara eksak tidak dapat dilakukan sehingga dilakukan pendekatan menggunakan metode elemen hingga. Metode elemen hingga untuk analisis bidang geoteknik sedikit berbeda dengan analisis bidang struktur karena dalam bidang geoteknik terjadi suatu interaksi antar elemen dengan kekakuan yang berbeda, seperti interaksi antara elemen fondasi dan lapisan tanah.

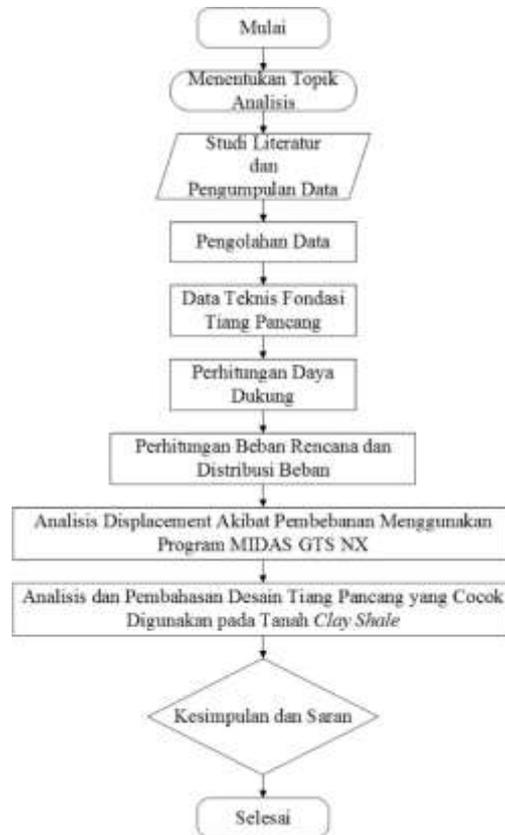
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini memiliki beberapa tahapan, yaitu sebagai berikut.

1. Tahapan awal penelitian ini merupakan studi literatur melalui jurnal dan buku yang berhubungan dengan penelitian ini sehingga dapat memahami permasalahan yang akan dibahas dan metode yang digunakan dalam penelitian.
2. Tahap selanjutnya adalah mengumpulkan data-data yang diperlukan untuk analisis dalam penelitian ini, seperti data tanah, hasil pengujian SPT, dan spesifikasi teknis tiang pancang.
3. Langkah berikutnya merupakan pengolahan data dengan melakukan korelasi dari nilai N-SPT pada *borlog* sehingga diperoleh parameter tanah yang diperlukan untuk analisis.
4. Langkah berikutnya perhitungan daya dukung fondasi tiang dan menentukan degradasi kuat geser lapisan tanah *clay shale* dengan mempertimbangkan kondisi jalan yang dimodelkan, seperti kedalaman muka air tanah saat musim kemarau dan musim hujan.
5. Langkah berikutnya adalah menentukan besarnya beban rencana yang akan dipikul oleh tiang pancang sebagai perkuatan tanah untuk konstruksi jalan raya. Beban yang digunakan berdasarkan nilai tipikal berat jenis lapisan perkerasan dan muatan sumbu terberat kendaraan sesuai kelas jalan yang direncanakan.
6. Langkah berikutnya memodelkan kondisi struktur jalan raya sebelum dan sesudah menggunakan perkuatan tiang pancang pada program MIDAS GTS NX untuk melakukan analisis perpindahan (*displacement*). Parameter tanah, elevasi muka air tanah, properti tiang pancang dan *pile cap*, serta beban dimodelkan dan dilakukan analisis.
7. Langkah terakhir adalah analisis dan pembahasan desain tiang pancang yang akan digunakan, yaitu ukuran tiang pancang dan jumlah tiang pancang yang akan dipakai sebagai perkuatan tanah. Lalu, dilakukan perbandingan *displacement* yang terjadi apakah dengan menggunakan perkuatan tiang pancang dapat mengurangi *displacement* yang terjadi dan bagaimana pengaruh degradasi kuat geser *clay shale* terhadap desain yang digunakan. Setelah itu, dapat ditarik kesimpulan dari analisis dan pembahasan yang telah dilakukan.

Metode analisis yang digunakan pada penelitian ini adalah metode statis untuk perhitungan daya dukung ujung dan daya dukung selimut tiang yang diusulkan oleh ahli berdasarkan beberapa literatur. Nilai daya dukung akan dipilih yang paling konservatif agar diperoleh desain yang paling aman. Analisis perpindahan (*displacement*) yang terjadi sebelum dan sesudah menggunakan perkuatan tiang pancang dilakukan menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*) dengan bantuan program MIDAS GTS NX.

Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Summary Parameter Tanah Desain

Sebelum memulai analisis daya dukung tiang dan analisis *displacement*, diperlukan untuk mengetahui parameter lapisan tanah yang akan dianalisis. Pada penelitian ini parameter tanah diperoleh berdasarkan korelasi dengan nilai N-SPT yang diperoleh dari *borlog*. Hasil korelasi nilai N-SPT dan parameter tanah yang akan digunakan untuk analisis dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4 Summary Parameter Tanah

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	N-SPT	γ (kN/m ³)	S_u (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ' (°)	E_s (MPa)	u
0.00 – 2.00	<i>Silty Clay</i>	7	17	42	8,4	25,2	12,6	0,35
2.00 – 4.00	<i>Sandy Clay</i>	8	18	48	9,6	26,0	14,4	0,35
4.00 – 6.00	<i>Silty Clay</i>	7	17	42	8,4	25,2	12,6	0,35
6.00 – 8.00	<i>Silty Clay</i>	10	19	60	12	27,2	18	0,3
8.00 – 10.00	<i>Clay Shale</i>	30	21	180	36	30,0	35	0,3
10.00 – 12.00	<i>Clay Shale</i>	50	21	300	60	30,9	50	0,3
12.00 – 14.00	<i>Clay Shale</i>	55	21	330	66	31,1	50	0,3
14.00 – 16.00	<i>Clay Shale</i>	55	21	330	66	31,1	50	0,3
16.00 – 18.00	<i>Clay Shale</i>	60	21	360	72	31,2	50	0,3
18.00 – 20.00	<i>Clay Shale</i>	60	21	360	72	31,2	50	0,3

Penurunan Kuat Geser *Clay Shale*

Berdasarkan perilaku penurunan kuat geser tanah *clay shale* yang dibahas pada Bab 1, dapat dilihat bahwa besarnya penurunan kuat geser tanah *clay shale* cukup bervariasi.

Pengujian yang dilakukan oleh Alatas et al (2015) ditemukan bahwa *clay shale* yang telah mengalami pelapukan setelah dikeringkan di bawah sinar matahari selama 80 hari akan mengalami penurunan kohesi *undrained* sebesar 31%, sedangkan penurunan sudut geser dalamnya bisa mencapai 64%.

Pengujian yang dilakukan oleh Tantra dan Prihatiningsih (2019) ditemukan bahwa kohesi antara sampel terendam dan tidak terendam mengalami penurunan hingga 99,173%.

Gartung (1986) melakukan penelitian pada tanah *clay shale* dan ditemukan penurunan kuat geser yang terjadi antara kuat geser desain dengan kuat geser residual *clay shale* sebesar 57% yang dapat dilihat pada Gambar 1.

Pengujian yang dilakukan Stark dan Duncan (1991) menemukan bahwa penurunan kuat geser tanah *clay shale* antara sampel terendam dan tidak terendam sebesar 36% yang dapat dilihat pada Gambar 2.

Penelitian yang dilakukan oleh Schaefer (2013) pada tanah *shale* menunjukkan penurunan sudut geser sebesar 21%.

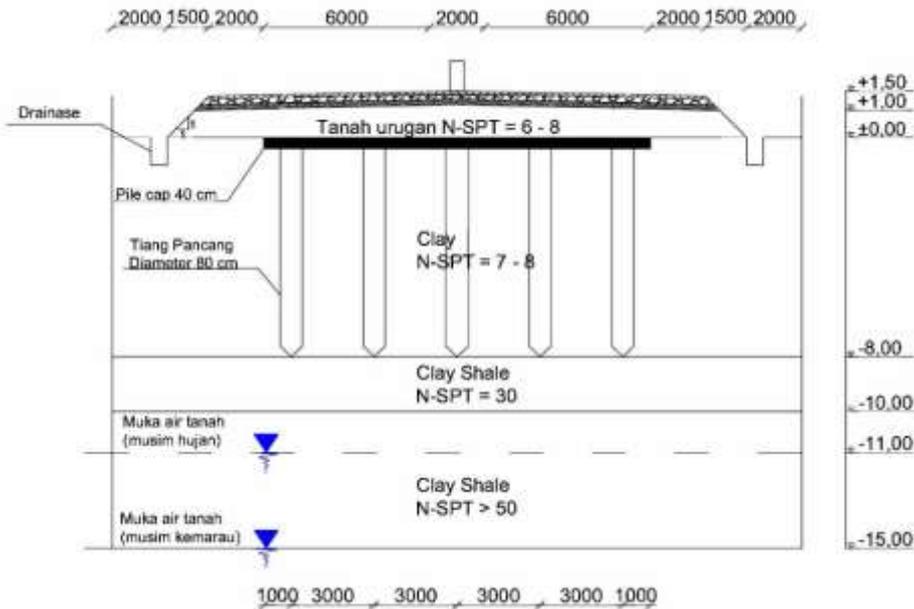
Reduksi pada *clay shale* ini dapat terjadi seiring berjalannya pelapukan yang terjadi, semakin lama suatu tanah *clay shale* mengalami pelapukan maka kuat gesernya juga akan turun hingga mencapai kuat geser residual seperti penelitian yang dilakukan oleh Stark dan Duncan (1991). Reduksi pada *clay shale* ini dapat terjadi selama proses pelapukan itu terjadi dan kemungkinan tanah *clay shale* tersebut untuk kembali ke kondisi semula membutuhkan waktu yang cukup lama karena perlu melalui proses sementasi dan mengalami tekanan di dalam tanah. Cukup sulit untuk menentukan berapa lama waktu yang dibutuhkan oleh *clay shale* untuk mengalami reduksi paling besar dan mencapai kuat geser tanah paling rendahnya karena bergantung pada siklus pelapukan yang terjadi dan seberapa lama tanah *clay shale* tersebut terekspos atau terganggu. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Alatas et al pada tahun 2015 kuat geser *clay shale* mencapai kuat geser residualnya ketika mengalami proses pelapukan selama 80 hari. Metode pelapukan yang digunakan adalah mengeringkan tanah *clay shale* di bawah sinar matahari selama 80 hari.

Pada penelitian ini penurunan kuat geser tanah *clay shale* diambil sebesar 50% dengan pertimbangan bahwa fondasi yang digunakan adalah tiang pancang dan tidak dilakukan proses pengeboran sehingga *clay shale* yang berada di dalam tanah tidak rusak. Selain itu, *clay shale* yang menumpu ujung tiang tidak mengalami proses pembasahan dan pengeringan yang signifikan akibat air tanah karena muka air tanah musim hujan berada di kedalaman -11,00 m. Oleh

karena itu, diharapkan penurunan kuat geser sebesar 50% sudah cukup aman dan dapat digunakan meskipun *clay shale* mengalami pelapukan. Meskipun lapisan *clay shale* yang menumpu tiang tidak mengalami pembasahan dan pengeringan berulang, kuat gesernya tetap direduksi 50% dengan pertimbangan untukantisipasi jika terjadi kenaikan muka air tanah suatu saat dan terjadi rembesan air tanah dari daerah sekitar yang dapat menyebabkan *clay shale* lapuk.

Potongan Melintang Desain Rencana

Potongan melintang desain rencana perkuatan tanah untuk memikul beban jalan raya dapat dilihat pada Gambar 7.



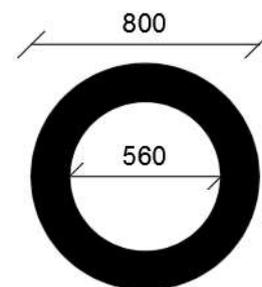
Gambar 7 Potongan Melintang Desain Rencana

Spesifikasi Teknis Tiang

Setelah memperoleh parameter tanah desain, perhitungan selanjutnya adalah analisis daya dukung tiang pancang. Spesifikasi teknis tiang pancang yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 5. Spesifikasi teknis tiang pancang ini diperoleh dari PT. Jaya Beton Indonesia, penampang *spun pile* dapat dilihat pada Gambar 8.

Tabel 5 Spesifikasi Teknis Tiang Pancang

Parameter	Data Teknis
Tipe Fondasi	<i>Spun Pile</i>
Panjang Fondasi	8 m
Diameter Luar	0,8 m
Tebal Dinding	0,12 m
Berat Tiang	5,13 ton



Gambar 8 Penampang *Spun Pile*

Analisis Beban Rencana

Beban rencana yang akan digunakan dalam analisis ini adalah beban lapisan perkerasan, beban median, dan beban kendaraan yang diubah menjadi beban terpusat untuk menentukan jumlah tiang yang akan digunakan sebagai perkuatan tanah. Beban sumbu kendaraan terberat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebesar 10 ton untuk jalan kelas II. Beban sumbu kendaraan tersebut kemudian didistribusikan sebagai beban merata dengan sudut 45° hingga lapisan tanah dasar dan besarnya beban merata ini digunakan di seluruh potongan melintang jalan.

Hasil perhitungan beban rencana yang akan digunakan dalam analisis dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6 Perhitungan Beban Rencana

Keterangan	Material	Berat Isi (kN/m ³)	Panjang (m)	Ketebalan (m)	q (kN/m)	P (kN)
Median	Beton	22	0,5	1,1	24,2	12,1
Perkerasan	Aspal Beton	22	18	0,1	2,2	39,6
	Batu Pecah	14,5	18	0,2	2,9	52,2
	Pasir Batu	18	18	0,2	3,6	64,8
<i>Pile Cap</i>	Beton Bertulang	24	14	0,4	9,6	134,4
Beban Kendaraan (MST = 10 ton) (kN)					49,05	882,9
Tanah Timbunan Setebal 1 m (kN)						360
Total Beban (kN)						1546
Total Beban (ton)						157,6

Analisis Daya Dukung Aksial Tiang

Perhitungan daya dukung tiang dapat dilakukan menggunakan persamaan yang diusulkan oleh Terzaghi. Perhitungan daya dukung tiang dilakukan dalam dua kondisi, yaitu kondisi *clay shale* tidak direduksi kuat gesernya dan kondisi ketika *clay shale* direduksi kuat gesernya sebesar 50%. Daya dukung ujung tiang pada penelitian ini dihitung menggunakan metode Meyerhof (1976), metode Vesic (1977), dan metode N-SPT (Meyerhof (1976) dan Briaud (1985)). Daya dukung selimut tiang pada penelitian ini menggunakan metode Alfa (1971), metode Lambda (1972) dan metode N-SPT (Meyerhof (1976) dan Briaud (1985)). Faktor keamanan untuk perhitungan daya dukung izin tiang dalam SNI 8460:2017 minimum sebesar 2,5, pada penelitian ini faktor keamanan yang digunakan sebesar 3.

Pada penelitian ini akan dilakukan analisis daya dukung tiang ketika tiang bertumpu di atas tanah *clay shale* (panjang tiang 8 m) dan ketika tiang menembus lapisan tanah *clay shale* sedalam 2 m (panjang tiang 10 m). Analisis pada dua keadaan ini dan menggunakan dua ukuran diameter tiang dilakukan untuk membandingkan daya dukung izin yang diperoleh dan jumlah tiang pancang yang akan digunakan sehingga dapat dipilih ukuran dan panjang tiang pancang yang cocok digunakan untuk penelitian ini. Hasil perhitungan daya dukung dapat dilihat pada Tabel 7 – Tabel 9.

Tabel 7 Daya Dukung Ujung Tiang

Panjang tiang (m)	Diameter (m)	Daya dukung ujung	Data Lab		Data N-SPT	
			Metode Meyerhof Qp (kN)	Metode Vesic Qp (kN)	Metode Meyerhof Qp (kN)	Metode Briaud Qp (kN)
8	0,8	<i>Clay shale</i> sebelum reduksi	814,30	856,479	2814,87	2560,6
		<i>Clay shale</i> setelah reduksi	407,15	454,396	1809,56	2184,054
	0,6	<i>Clay shale</i> sebelum reduksi	458,0442	481,77	1583,36	1440,34
		<i>Clay shale</i> setelah reduksi	229,0221	255,598	1017,88	1228,53
10	0,8	<i>Clay shale</i> sebelum reduksi	1357,168	1396,47	3015,929	2625
		<i>Clay shale</i> setelah reduksi	678,584	757,327	1809,557	2184,05
	0,6	<i>Clay shale</i> sebelum reduksi	763,407	785,515	1696,46	1476,56
		<i>Clay shale</i> setelah reduksi	381,703	425,996	1114,817	1269,43

Tabel 8 Daya Dukung Selimut Tiang

Panjang tiang (m)	Diameter (m)	Daya dukung selimut	Data Lab		Data N-SPT	
			Metode Alfa	Metode Lambda	Metode Meyerhof	Metode Briaud
			Qs (kN)	Qs (kN)	Qs (kN)	Qs (kN)
8	0,8		728,0452	937,794	321,6691	821,2644
	0,6		546,0339	703,346	241,2743	615,9483
10	0,8	<i>Clay shale</i> sebelum reduksi	1180,4346	1460,56	542,8672	1097,2081
		<i>Clay shale</i> setelah reduksi	1103,5284	1238,893	432,2831	1046,9593
	0,6	<i>Clay shale</i> sebelum reduksi	885,326	1095,42	407,15	822,9061
		<i>Clay shale</i> setelah reduksi	827,646	929,170	324,212	785,2195

Tabel 9 Daya Dukung Izin Tiang

Panjang tiang (m)	Diameter (m)	Daya dukung ujung	Data Lab	Data N-SPT
			Qall (kN)	Qall (kN)
8	0,8	<i>Clay shale</i> sebelum reduksi	463,7901	910,442
		<i>Clay shale</i> setelah reduksi	328,0733	660,094
	0,6	<i>Clay shale</i> sebelum reduksi	308,614	528,459
		<i>Clay shale</i> setelah reduksi	226,273	387,639
10	0,8	<i>Clay shale</i> sebelum reduksi	782,9846	993,0746
		<i>Clay shale</i> setelah reduksi	531,1546	684,3979
	0,6	<i>Clay shale</i> sebelum reduksi	509,5529	587,879
		<i>Clay shale</i> setelah reduksi	363,0918	439,6515

Analisis Jumlah Tiang yang Diperlukan

Total beban rencana yang akan dipikul oleh tiang pancang adalah sebesar 158 ton. Hasil perhitungan daya dukung tiang kelompok yang akan digunakan sebagai desain dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10 Daya Dukung Total

Panjang tiang (m)	Diameter (m)	Daya dukung izin	Qall (kN)	Jumlah tiang	Qall (kN)
			Tiang tunggal		Tiang kelompok
8	0,8	<i>Clay shale</i> sebelum reduksi	463,7901	4	1855,1602
		<i>Clay shale</i> setelah reduksi	328,0733	5	1640,3663
	0,6	<i>Clay shale</i> sebelum reduksi	308,614	6	1851,684
		<i>Clay shale</i> setelah reduksi	226,273	7	1583,911
10	0,8	<i>Clay shale</i> sebelum reduksi	782,9846	2	1565,9692
		<i>Clay shale</i> setelah reduksi	531,1546	3	1593,4638
	0,6	<i>Clay shale</i> sebelum reduksi	509,5529	4	2038,2116
		<i>Clay shale</i> setelah reduksi	363,0918	5	1815,459

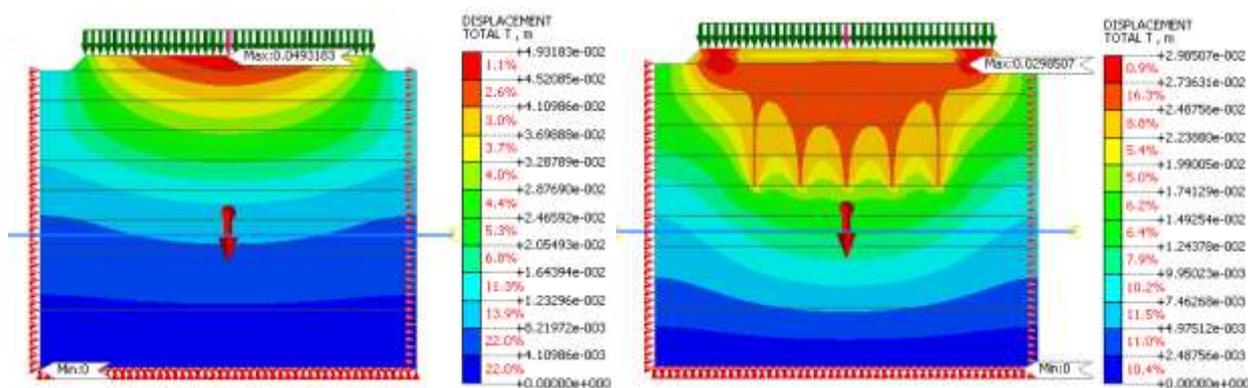
Pada Tabel 10 dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan jumlah tiang yang dibutuhkan ketika *clay shale* tidak direduksi dan ketika *clay shale* kuat gesernya direduksi sebesar 50%. Hal ini menunjukkan bahwa reduksi kekuatan geser *clay shale* memberikan perbedaan yang sangat signifikan dan dapat menyebabkan kegagalan konstruksi jika tidak dianalisis dengan tepat.

Tiang pancang yang menembus tanah *clay shale* sedalam 2 m akan menghasilkan daya dukung yang lebih besar sehingga jumlah tiang pancang yang diperlukan akan lebih sedikit. Namun, dalam pelaksanaannya tiang pancang ini tidak dapat dipancang menggunakan *diesel hammer* untuk menembus tanah *clay shale* yang menyerupai batuan karena dikhawatirkan tiang akan patah dan tidak dapat digunakan. Tiang pancang yang akan menembus lapisan batuan *clay shale* harus dilakukan dengan metode *pre-boring* di mana dilakukan proses pengeboran pada lapisan tanah *clay shale* tersebut sedalam 2 m. Metode ini berisiko akan menyebabkan friksi yang terjadi pada tiang pancang menjadi berkurang karena proses pengeboran serta akan menyebabkan biaya dan waktu yang diperlukan jadi lebih banyak untuk proses pelaksanaannya. Oleh karena itu, pada penelitian ini dipertimbangkan untuk menggunakan tiang pancang dengan diameter 80 cm dan panjang 8 m agar tiang bertumpu di atas lapisan tanah *clay shale* agar lebih ekonomis dengan panjang tiang yang juga lebih pendek dibandingkan harus menembus lapisan tanah *clay shale*. Jumlah tiang pancang yang diperlukan untuk memikul beban rencana sebesar 158 ton adalah 5 buah tiang pancang diameter 80 cm dan panjang 8 m.

Analisis Displacement

Analisis perpindahan (*displacement*) pada penelitian ini menggunakan bantuan program MIDAS GTS NX dengan cara memodelkan seluruh lapisan tanah, elevasi muka air tanah, tiang pancang, *pile cap*, dan beban rencana yang akan dianalisis. *Displacement* yang akan dianalisis dalam penelitian ini adalah *displacement* yang terjadi sebelum menggunakan perkuatan tiang pancang dan *displacement* yang terjadi setelah menggunakan perkuatan tiang pancang. Lapisan tanah *clay shale* dimodelkan dengan asumsi kuat geser tanah mengalami degradasi kuat geser sebesar 50%. Beban rencana yang dimodelkan adalah beban merata dari lapisan perkerasan dan beban kendaraan dengan total 57,75 kN/m². Beban median yang terbuat dari bahan beton dimodelkan sebagai beban terpusat di tengah potongan melintang jalan sebesar 12,1 kN. Berat sendiri lapisan tanah juga dimodelkan sebagai *self-weight*. Lapisan tanah dimodelkan sebagai elemen *plane strain* dengan jenis material *isotropic-mohr coulomb*, sedangkan tiang pancang dan *pile cap* dimodelkan sebagai elemen *beam* dengan jenis material *isotropic-elastic*. Tiang pancang dan *pile cap* dimodelkan sesuai dengan dimensi dan panjang yang telah direncanakan. Muka air tanah dimodelkan pada elevasi -11,00 m ketika melakukan input tahapan konstruksi untuk analisis.

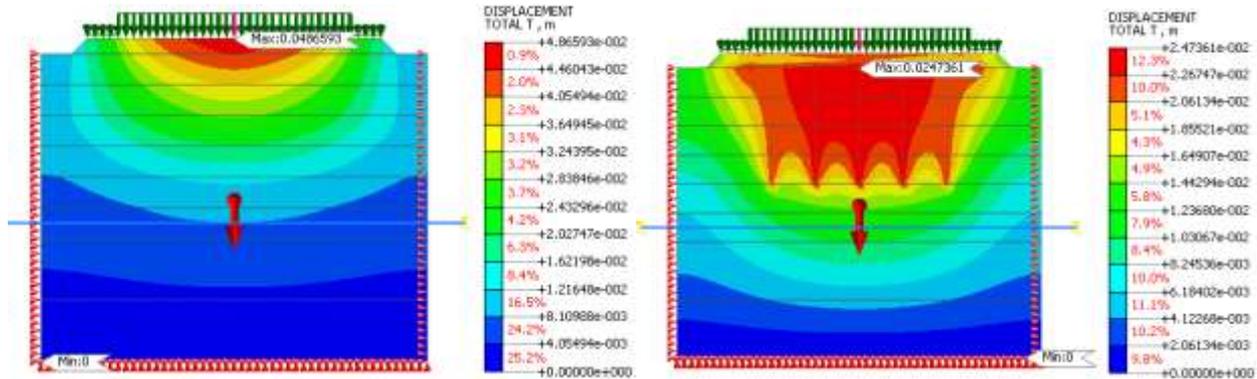
Hasil analisis *displacement* dari kedua pemodelan dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9 Hasil Analisis *Displacement* Sebelum dan Sesudah Perkuatan Tiang

Berdasarkan hasil analisis *displacement* menggunakan program MIDAS GTS NX dapat diketahui bahwa ketika struktur jalan raya tidak menggunakan perkuatan tiang pancang akan mengalami *displacement* paling tinggi sebesar 50 mm yang terletak di tengah potongan melintang jalan. Ketika struktur jalan raya menggunakan perkuatan tiang pancang, *displacement* paling tinggi sebesar 30 mm yang terletak di bahu jalan. Hal ini disebabkan bagian bahu jalan tidak diperkuat dengan tiang pancang juga dengan pertimbangan bahu jalan hanya digunakan dalam kondisi darurat dan cenderung kendaraan tidak berhenti terlalu lama atau beban yang terjadi tidak menerus seperti pada bagian lajur jalan. Hal tersebut juga dilakukan agar biaya yang diperlukan untuk proses perkuatan tanah menjadi lebih efisien dengan *pile cap* yang lebih pendek jika bahu jalan tidak diperkuat.

Jika diasumsikan bahwa beban kendaraan hanya bekerja pada lajur jalan, sedangkan bahu jalan hanya memikul beban lapisan perkerasan maka hasil analisis *displacement* nya dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10 *Displacement* Sebelum dan Sesudah Perkuatan Tiang

Struktur jalan raya tanpa perkuatan tiang mengalami *displacement* paling besar di tengah potongan melintang jalan sebesar 49 mm. Setelah menggunakan perkuatan tiang pancang, *displacement* paling besar terjadi di tengah potongan melintang jalan sebesar 25 mm.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. *Clay shale* adalah jenis tanah yang memiliki kuat geser tanah yang tidak stabil. Ketika *clay shale* dalam kondisi kering dan tidak terganggu di dalam lapisan tanah maka sifatnya seperti batuan yang sangat keras, namun ketika mengalami pembasahan dan pengeringan serta dalam kondisi terbuka maka sifatnya akan mengalami pelapukan dan menjadi sangat lunak. Penurunan kuat geser *clay shale* berkisar 20% – 80% dari kondisi awal. Pada penelitian ini dipilih penurunan kuat geser *clay shale* sebesar 50%.
2. Tiang pancang yang digunakan dalam analisis ini adalah tiang pancang jenis *spun pile* dengan diameter 0,8 meter dan panjang 8 meter. Tiang pancang tidak didesain menembus lapisan *clay shale* karena perlu menggunakan metode *pre-boring* untuk menghindari tiang pancang mengalami patah. Hal ini dapat meningkatkan biaya yang dikeluarkan dan waktu pelaksanaan sehingga dipilih desain tiang pancang bertumpu di atas *clay shale*.
3. Berdasarkan perhitungan daya dukung tiang metode statis jika kuat geser *clay shale* tidak direduksi diperoleh daya dukung total tiang tunggal sebesar 47 ton. Ketika *clay shale* mengalami reduksi kekuatan sebesar 50% diperoleh daya dukung total tiang tunggal sebesar 33 ton.
4. Beban rencana yang digunakan dalam analisis adalah beban lapisan perkerasan, beban roda kendaraan dengan muatan sumbu terberat sebesar 10 ton, dan beban median yang terbuat dari beton. Total beban rencana yang akan dipikul oleh tiang pancang adalah sebesar 158 ton.
5. Jumlah tiang yang digunakan ketika lapisan *clay shale* tidak direduksi adalah 4 buah tiang dengan daya dukung total tiang kelompok sebesar 189 ton. Ketika lapisan *clay shale* direduksi sebesar 50% maka dibutuhkan 5 buah tiang dengan daya dukung total tiang kelompok sebesar 167 ton. Jika tiang pancang didesain menembus lapisan tanah *clay shale* sehingga ujung tiang bertumpu di kedalaman -10,00 m, maka akan menghasilkan desain tiang dengan diameter yang lebih kecil yaitu 60 cm namun dalam pelaksanaannya akan membutuhkan metode *pre-boring* agar tiang dapat menembus *clay shale*.
6. Berdasarkan analisis *displacement* yang dilakukan dengan bantuan program MIDAS GTS NX, struktur jalan yang tidak diperkuat dengan tiang pancang mengalami *displacement* terbesar sebesar 50 mm. Struktur jalan yang sudah diperkuat dengan tiang mengalami *displacement* terbesar sebesar 30 mm.

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Parameter tanah yang digunakan dalam penelitian akan lebih baik jika menggunakan beberapa borlog dan menggunakan hasil pengujian laboratorium agar hasil perhitungan menjadi lebih akurat.
2. Besarnya penurunan kuat geser *clay shale* pada penelitian ini berdasarkan data-data penelitian lain terhadap sampel *clay shale* dan dipilih penurunan yang paling cocok untuk digunakan. Pengujian terhadap sampel tanah *clay shale* dapat dilakukan untuk mengetahui besarnya degradasi kuat geser ketika *clay shale* mengalami pelapukan.
3. Sebaiknya dilakukan analisis daya dukung lateral dan penurunan fondasi tiang pancang pada lapisan tanah *clay shale* serta memperhitungkan beban lateral dan gempa yang dapat terjadi agar didapatkan hasil yang detail.

4. Analisis *displacement* dapat menggunakan beberapa program sebagai pembanding agar diperoleh hasil yang lebih akurat dan hasil perhitungan daya dukung dapat dibandingkan dengan hasil analisis menggunakan program.
5. Jika beban yang direncanakan lebih besar dari beban rencana penelitian ini, maka dapat dipertimbangkan untuk menggunakan tiang bor untuk menembus lapisan tanah *clay shale* ataupun menggunakan alternatif tiang pancang metode *pre-boring* agar tiang pancang dapat menembus tanah *clay shale* dan jumlah tiang yang dibutuhkan tidak terlalu banyak.

DAFTAR PUSTAKA

- Alatas, I. M., Kamaruddin, S. A., Nazir, R., Irsyam, M., & Himawan, A. (2015). Shear Strength Degradation of Semarang Bawen Clay Shale Due to Weathering Process. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 109-118.
- Das, B. M. (2014). *Principles of Foundation Engineering* (8th ed.). Boston: Cengage Learning.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2014). *Principle of Geotechnical Engineering* (8th ed.). Stamford: Global Engineering.
- Gartung, E. (1986). Excavation in hard clays of the Keuper Formation. *Proceedings of Symposium, Geotechnical Engineering Division*.
- Hardiyatmo, H. C. (2008). *Teknik Fondasi 2* (4th ed.).
- Hardiyatmo, H. C. (2011). *Analisis dan Perancangan Fondasi* (2nd ed.). Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Meyerhof, G. G. (1976). Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 102, 197-228.
- Nasional, B. S. (2017). *SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Oktaviani, R., Raharjo, P. P., & Sadisun, I. A. (2018). Kajian Ketahanan Batuan Clay Shale Formasi Jatiluhur di Sentul City. *Promine Journal*, 26-32.
- Rolls, D., & Bland, W. (1998). *Weathering: An Introduction to Scientific Principles* (1st ed.). London: Hodder Arnold.
- Schaefer, V. R., & Birchmier, M. A. (2013). Mechanisms of Strength Loss during Wetting and Drying of Pierre Shale. Paris: Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Soetojo, M. (2009). *Teknik Pondasi pada Lapisan Batuan*. Surabaya: ITS Press.
- Stark, T. D., & Duncan, J. M. (1991). Mechanism of strength loss in stiff clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 1.
- Tantra, H., & Prihatiningsih, A. (2019). Analisis Kuat Geser Tanah Clay Shale yang Terendam dan Tidak Terendam dengan Unconfined Compression Test. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 77-85.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York: John Willey.
- Tomlinson, M., & Woodward, J. (2015). *Pile Design and Construction Practice*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Wakim, J. (2005). Effect of water on the mechanical behaviour of shales. *Post-Mining*.
- Wesley, L. D. (2012). *Mekanika Tanah untuk Tanah Endapan dan Residu* (1st ed.). Yogyakarta: Penerbit ANDI.

