

Forensik Geoteknik Kerusakan Bangunan Gedung di Semarang

Adrian Pramono Rahardjo ^{[1]*}, Anastasia Lestari ^[1]

^{[1]*} *Department of Civil Engineering, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, 40141, Indonesia*

Email: rahardjo.adrian@gmail.com *

*) Corresponding Author

Received: 05 February 2026; Revised: 28 August 2026; Accepted: 10 September 2026

How to cited this article:

Rahardjo, A.P., Lestari, A. (2026). Forensik Geoteknik Kerusakan Bangunan Gedung di Semarang. Jurnal Teknik Sipil, 22(2), 356–371. <https://doi.org/10.28932/jts.v22i2.14791>

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji penyebab kerusakan pada bangunan *workshop* yang baru selesai dikonstruksi di area proyek kampus di Semarang, yang berdekatan dengan pekerjaan pemancangan fondasi gedung baru. Fondasi *workshop* berupa *mini pile* 25 cm × 25 cm sedalam 12 m. Investigasi forensik geoteknik dilakukan melalui pengeboran geoteknik, uji CPTu, serta pemasangan instrumentasi *inclinometer*, *extensometer*, dan *piezometer vibrating wire*. Hasil CPTu berdasarkan parameter B_q dan B_{q^*} menunjukkan lapisan tanah lunak setebal 12–26 m yang masih *under consolidated* ($B_q > 0,68$; OCR = 0,709) dengan derajat konsolidasi 75–82%. *Piezometer* mencatat tekanan air pori eksese sebesar 167 kPa, *extensometer* merekam penurunan vertikal 13 mm dalam tiga bulan, sedangkan *inclinometer* tidak menunjukkan pergerakan lateral yang signifikan. Perhitungan menghasilkan penurunan konsolidasi 0,73 m, dan gesekan selimut negatif (*negative skin friction*) sebesar 0,749 kN. Kerusakan bangunan disimpulkan disebabkan oleh penurunan tanah lunak yang masih berkonsolidasi, sementara ujung fondasi sedalam 12 m menggantung pada lapisan tersebut, dan bukan oleh gaya lateral atau getaran akibat pemancangan.

Kata kunci: CPTu, inclinometer, extensometer, piezometer, NSF, konsolidasi.

ABSTRACT. *Geotechnical Forensic Analysis of Building Damage in Semarang.* This study investigates the cause of damage to a newly completed workshop building within a polytechnic campus project in Semarang, located close to ongoing pile driving for new buildings. The workshop is supported by 25 cm × 25 cm mini piles, 12 m long. A geotechnical forensic investigation was carried out using geotechnical boring, CPTu, and monitoring with an inclinometer, an extensometer, and a vibrating wire piezometer. The CPTu interpretation, based on the B_q and B_{q^*} parameters, identified a 12–26 m deep soft soil zone that is still under consolidated ($B_q > 0.68$; OCR = 0.709), with an average degree of consolidation of 75–82%. The piezometer recorded an excess pore water pressure of 167 kPa, the extensometer recorded 13 mm of vertical settlement over three months, and the inclinometer showed no significant lateral movement. Calculations yielded a consolidation settlement of 0.73 m and a negative skin friction of 0.749 kN. The damage is attributed to settlement of still-consolidating soft soil, with the 12 m pile tips hanging in this layer, rather than to lateral displacement or vibration from pile driving.

Keywords: CPTu, inclinometer, extensometer, piezometer, NSF, consolidation.

1. PENDAHULUAN

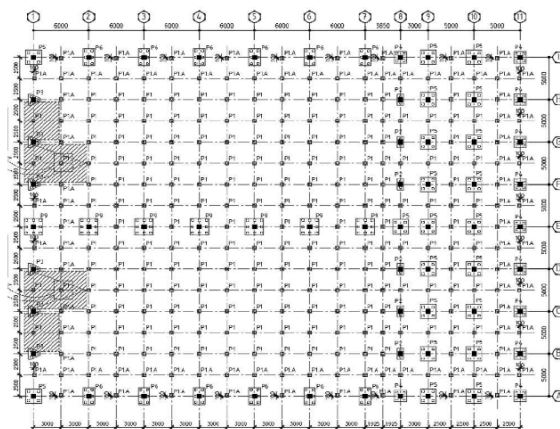
Pembangunan infrastruktur pendidikan tinggi menuntut perhatian khusus terhadap aspek geoteknik, terutama pada kawasan yang berada di atas tanah lunak dan berdekatan dengan bangunan eksisting. Salah satu contohnya terjadi di kawasan sebuah kampus di Semarang, Jawa

Tengah, yang pada saat penelitian ini dilaksanakan sedang membangun fondasi untuk gedung ruang kelas dan laboratorium, gedung Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM), serta auditorium. Lokasi proyek ditunjukkan pada Gambar 1. Di dekat gedung-gedung tersebut terdapat beberapa bangunan *workshop* yang baru didirikan sebelum pekerjaan pemancangan fondasi gedung baru dimulai.



Gambar 1. Posisi bangunan *workshop*, gedung kelas dan laboratorium studi kasus

Selama konstruksi fondasi berlangsung, ditemukan banyak retakan pada bangunan *workshop* di sekitar area kerja, ditunjukkan pada Gambar 2. Fondasi *workshop* berupa tiang pancang *mini pile* berukuran 25 cm × 25 cm dengan panjang 12 m, sedangkan fondasi gedung auditorium menggunakan tiang pancang berdiameter 60 cm dengan panjang 38 m. Perbedaan kedalaman ini penting dicermati karena tiang sedalam 12 m diduga belum mencapai lapisan tanah pendukung (*bearing layer*), sehingga ujung tiang bertumpu pada lapisan tanah lunak yang proses konsolidasinya belum selesai. Kondisi inilah yang melatarbelakangi perlunya investigasi atas kerusakan pada bangunan *workshop*, sekaligus sebagai dasar perumusan rekomendasi penanganan.



Gambar 2. Posisi tiang pancang rencana auditorium

Permasalahan utama yang dikaji adalah apakah kerusakan bangunan *workshop* bersumber dari aktivitas pemancangan fondasi gedung di sekitarnya, atau dari penurunan tanah (*settlement*) di lokasi itu sendiri. Berdasarkan kondisi lapangan dirumuskan tiga hipotesis awal. Hipotesis pertama (H1): terdapat lapisan tanah lunak yang masih berkonsolidasi (*under consolidating soil*). Hipotesis kedua (H2): ujung tiang *workshop* sepanjang 12 m menggantung pada lapisan tanah lunak tersebut sehingga bangunan berpotensi mengalami penurunan. Hipotesis ketiga (H3): pemancangan di sekitar lokasi menimbulkan tekanan air pori eksek (*excess pore water pressure*) yang merambat radial dari titik pemancangan dan, bila mencapai *workshop*, dapat merusak struktur bangunan.

Tanah lunak umumnya didefinisikan sebagai tanah berbutir halus dengan kompresibilitas tinggi dan kuat geser rendah, yang pada umumnya berupa lempung berumur Holosen (Budhu, 2011; Das & Sobhan, 2014). Butir lempung berukuran kurang dari 0,002 mm, bersifat kohesif dan plastis, dengan mineral dominan berupa *kaolinite*, *illite*, dan *montmorillonite*. Klasifikasi dan karakter indeks tanah berbutir halus ditentukan melalui batas-batas Atterberg, yaitu batas cair, batas plastis, dan batas susut. Selisih batas cair dan batas plastis disebut indeks plastis, yang menggambarkan kandungan relatif partikel lempung (Das, 1995; Das & Sobhan, 2014). Perilaku tanah lunak sangat dipengaruhi oleh riwayat tegangannya, yang dinyatakan melalui *overconsolidation ratio* (OCR). Tanah dengan OCR kurang dari satu berada dalam kondisi *under consolidated*, yaitu proses pemampatan akibat beban yang ada belum selesai dan tekanan air pori eksek belum terdisipasi seluruhnya (Budhu, 2011). Tingkat OCR juga memengaruhi kuat geser dan kekakuan tanah berbutir halus (Akpila & Omunguye, 2014; Wu et al., 2021).

Pada fondasi tiang, kondisi *under consolidated* menimbulkan fenomena gesekan selimut negatif (*Negative Skin Friction/NSF*). Ketika tiang dikonstruksi pada tanah lunak yang masih berkonsolidasi, baik akibat berat sendiri tanah maupun beban timbunan, tanah di sekeliling tiang yang mengalami penurunan menyeret tiang ke bawah. Gesekan selimut yang semula menjadi tahanan berubah menjadi beban tambahan pada tiang, sehingga beban yang harus dipikul bertambah sementara kapasitas efektif tiang berkurang (Irsyam, 2003; Prakash & Sharma, 1990).

Uji penetrasi konus dengan pengukuran tekanan air pori (*Cone Penetration Test with pore pressure measurement/CPTu*) telah banyak digunakan untuk menilai kondisi konsolidasi tanah lunak (Paulus P Rahardjo, 2008; Robertson & Cabal, 2014; Schmertmann, 1978). Penerapannya pada tanah yang sedang berkonsolidasi, baik pada tanah reklamasi, tanah gambut, maupun tanah lunak yang diperbaiki dengan *vacuum preloading* (Lestari, 2024; P P Rahardjo et al., 2016; Paulus P Rahardjo, 1996; Rongsadi, 2017). Namun, pemanfaatan CPTu yang dipadukan dengan instrumentasi (*inclinometer*, *extensometer*, dan *piezometer*) untuk membedakan secara forensik

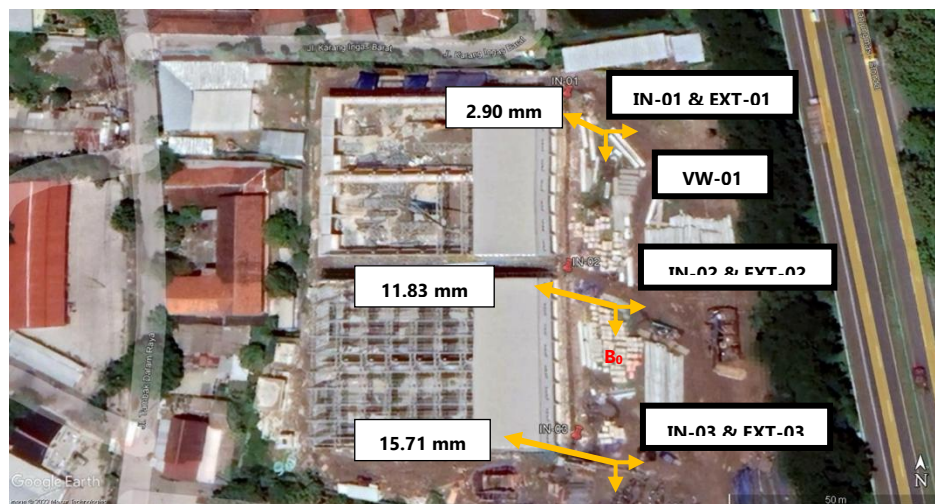
antara kerusakan akibat pemancangan dan kerusakan akibat konsolidasi tanah pada bangunan yang sudah berdiri masih relatif jarang dilaporkan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan menentukan penyebab kerusakan bangunan *workshop* yang telah selesai dikonstruksi, dikaitkan dengan pemancangan tiang auditorium di dekatnya. Lingkup penelitian meliputi: (1) kajian kondisi geologi dan area konstruksi; (2) penyelidikan tanah melalui pengeboran dan CPTu; (3) pemantauan dengan *inclinometer*, *extensometer*, dan *vibrating wire piezometer*; (4) penentuan mekanisme kerusakan bangunan; dan (5) penyusunan rekomendasi geoteknik untuk penanganannya.

2. METODOLOGI

2.1. Kerangka Penelitian dan Lokasi Pengumpulan Data

Penelitian ini merupakan studi kasus forensik geoteknik yang menguji tiga hipotesis (H1–H3) secara berurutan: (a) karakterisasi stratigrafi dan kondisi konsolidasi tanah melalui pengeboran dan CPTu; (b) pemantauan perilaku tanah melalui instrumentasi geoteknik; dan (c) analisis analitis penurunan konsolidasi dan gesekan selimut negatif. Data CPTu diperoleh pada Maret 2022, sedangkan pembacaan instrumentasi dilakukan pada April hingga Juni 2022 (Paulus P Rahardjo, 2021). Posisi titik pengeboran, CPTu, dan instrumentasi terhadap bangunan *workshop* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Lokasi instrumentasi di area penelitian

Instrumentasi dipasang dengan empat tujuan, yaitu memperoleh informasi kedalaman dan arah bidang pergerakan tanah, menyediakan peringatan dini (*early warning system*) bila terjadi pergerakan, mengindikasikan kenaikan atau penurunan tanah, serta mengukur tekanan air tanah. Ringkasan metode, parameter yang diperoleh, dan hipotesis yang diuji disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan metode investigasi dan kaitannya dengan hipotesis

Metode	Parameter yang diperoleh	Hipotesis yang diuji
Pengeboran geoteknik + N-SPT	Stratigrafi, N-SPT, sifat indeks, parameter konsolidasi (C_c , e_0 , C_v)	H1, H2
CPTu	q_c , f_s , u_2 , FR, B_q , OCR	H1, H2
<i>Inclinometer</i>	Perpindahan lateral kumulatif terhadap kedalaman	H3
<i>Extensometer</i>	Perubahan vertikal pada kedalaman 2 m dan 10 m	H1
<i>Vibrating wire piezometer</i>	Tekanan air pori dan tekanan eksese	H1, H3
Analisis NSF dan konsolidasi	Gaya seret NSF, S_c , t_{90}	H1, H2

2.2. Pengeboran Geoteknik dan Pengujian Laboratorium

Pengeboran geoteknik (BH-01 hingga BH-03) dilakukan hingga kedalaman 50 m untuk mengidentifikasi lapisan tanah secara visual, menguji kekuatan tanah melalui N-SPT (*Standard Penetration Test*), dan mengambil contoh tanah tidak terganggu. Contoh tanah diuji di laboratorium untuk memperoleh sifat indeks (termasuk batas-batas Atterberg), parameter konsolidasi berupa indeks kompresi (C_c), angka pori awal (e_0), dan koefisien konsolidasi (C_v), serta kuat geser tak terdrainase melalui uji triaksial sesuai ASTM D2850 (Akpila & Omunguye, 2014; International, 2015).

2.3. Uji CPTu

Uji CPTu dilakukan pada tiga titik (CPTu-01 hingga CPTu-03) dengan konus yang membaca tahanan ujung (q_c), gesekan selimut (f_s), dan tekanan air pori pada bahu konus (u_2) secara kontinu. Sinyal dari sensor di dalam konus diteruskan ke unit akuisisi data sehingga profil tanah dapat diinterpretasikan dari tiga besaran terukur tersebut (Paulus P Rahardjo, 2008; Schmertmann, 1978). Tahanan ujung dikoreksi terhadap tekanan air pori sehingga diperoleh tahanan ujung terkoreksi (q_t) pada Persamaan 1, dengan a adalah rasio luas netto konus. Klasifikasi perilaku tanah (*soil behaviour type*) dan rasio gesekan (FR) (Robertson & Cabal, 2014).

$$q_t = q_c + (1 - a) u_2 \quad (1)$$

Kondisi konsolidasi tanah dinilai menggunakan rasio tekanan air pori B_q pada Persamaan 2, dengan $\Delta u = u_2 - u_0$ adalah tekanan air pori eksese, u_0 adalah tekanan air pori hidrostatik, dan σ_{v0} adalah tegangan vertikal *in situ*. Pendekatan B_q dan B_q^* untuk tanah yang sedang berkonsolidasi (P P Rahardjo et al., 2016). Nilai $B_q > 0,68$ menunjukkan tanah masih dalam kondisi *under consolidated*, sedangkan $B_q < 0,68$ menunjukkan konsolidasi telah selesai.

$$B_q = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (2)$$

Nilai OCR diestimasi dari B_q melalui korelasi empiris pada Persamaan 3 (Chen & Mayne, 1994; Karlsrud et al., 1996; Mayne & Kemper, 1988).

$$OCR = \frac{1}{1,2 B_q + 0,1} \quad (3)$$

2.4. Instrumentasi Geoteknik

Inclinometer (IN-01 hingga IN-03, kedalaman 50 m) dipasang dengan menanam pipa beralur (*tubing*) pada lubang bor. Pipa terdeformasi mengikuti gerakan tanah sehingga pengukuran deformasi pipa menggambarkan perpindahan lateral tanah, yang dibaca menggunakan alat pembaca (*read out unit*) pada 15 Mei, 19 Mei, dan 7 Juni 2022. *Extensometer* (PU-01) dengan dua *spider magnet* pada kedalaman 2 m dan 10 m digunakan untuk memantau penurunan atau pengangkatan (*heaving*) tanah akibat perubahan beban, dengan pembacaan 17 April hingga 27 Juni 2022. *Vibrating wire piezometer* (VW-01) mengukur tekanan air melalui perubahan frekuensi getar kawat tertegang akibat perubahan tekanan air pada batu pori, dengan pembacaan 19 April hingga 19 Mei 2022. Tekanan hidrostatik teoretis dihitung dari muka air tanah pada kedalaman 2 m dan dikurangkan dari tekanan terbaca untuk memperoleh tekanan air pori eksres.

2.5. Analisis Gesekan Selimut Negatif dan Penurunan Konsolidasi

Gaya seret akibat gesekan selimut negatif dihitung dengan Persamaan 4 (Prakash & Sharma, 1990) .

$$F = \pi D (K \sigma'_c \tan \phi'_c) L_e \quad (4)$$

Pada persamaan ini, D adalah diameter tiang, $K = 1 - \sin \phi'_c$ adalah koefisien tekanan tanah lateral, σ'_c adalah tegangan vertikal efektif, ϕ'_c adalah sudut geser efektif, dan $L_e = 0,75 L_c$ adalah panjang efektif tiang yang mengalami NSF, dengan L_c tebal lapisan yang berkonsolidasi. Penurunan konsolidasi primer lapisan lempung dihitung dengan Persamaan 5 (Budhu, 2011; Das & Sobhan, 2014), dengan C_c indeks kompresi, H tebal lapisan, e_0 angka pori awal, P'_0 tegangan efektif awal, dan ΔP pertambahan tegangan akibat beban.

$$S_c = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \frac{P'_0 + \Delta P}{P'_0} \quad (5)$$

Waktu penurunan untuk derajat konsolidasi 90% dihitung dengan Persamaan 6, dengan $T_v = 0,848$, H_{dr} panjang lintasan drainase, dan C_v koefisien konsolidasi dari uji laboratorium (Das & Sobhan, 2014).

$$t_{90} = \frac{T_v H_{dr}^2}{C_v} \quad (6)$$

2.6. Kriteria Evaluasi Hipotesis

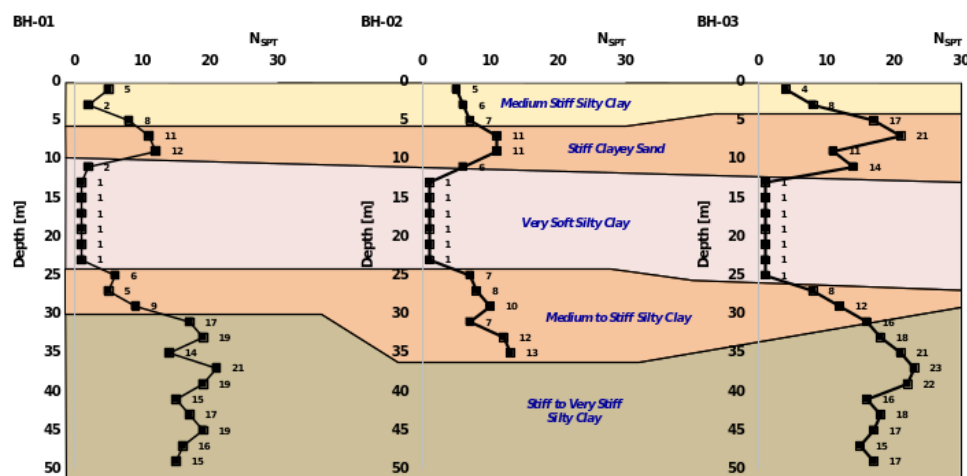
H1 dinyatakan didukung bila $B_q > 0,68$ atau $OCR < 1$ pada lapisan lunak, disertai penurunan vertikal terukur dan tekanan air pori eksres yang bertahan. H2 didukung bila ujung tiang 12 m berada pada atau di atas lapisan lunak yang tebal. H3 didukung hanya bila terdapat perpindahan lateral yang signifikan pada *inclinometer* atau lonjakan tekanan air pori yang berkorelasi dengan

aktivitas pemancangan. Seluruh bukti kemudian dibandingkan melalui matriks hipotesis pada bagian Diskusi.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Stratigrafi Hasil Pengeboran

Hasil pengeboran pada Gambar 4 menunjukkan stratigrafi yang konsisten pada ketiga titik bor. Lapisan permukaan setebal sekitar 5 m berupa lempung lanau konsistensi sedang dengan N-SPT 2–8 pukulan/30 cm yang merupakan timbunan. Di bawahnya terdapat lapisan pasir lempungan kaku sampai kedalaman sekitar 12 m dengan N-SPT sekitar 6–21. Pada kedalaman sekitar 12–25 m dijumpai lempung lanau sangat lunak dengan N-SPT = 1 secara konsisten pada seluruh titik bor. Lapisan di bawahnya (sekitar 25–35 m) adalah lempung lanau konsistensi sedang sampai kaku, dan pada kedalaman lebih dari sekitar 35 m berupa lempung lanau kaku sampai sangat kaku dengan N-SPT sekitar 14–23. Ringkasan disajikan pada Tabel 2.



Gambar 4. Hasil deskripsi tanah dan N-SPT pada BH-01, BH-02, dan BH-03

Tabel 2. Ringkasan stratigrafi berdasarkan pengeboran dan CPTu

Kedalaman (m)	Deskripsi tanah	N-SPT	Keterangan
0–5	Lempung lanau konsistensi sedang	2–8	Timbunan (FR tinggi, 6–8%)
5–12	Pasir lempungan kaku	6–21	Ujung <i>mini pile</i> (12 m) berada di dasar lapisan ini
12–25	Lempung lanau sangat lunak	1	<i>Under consolidated</i> ($B_q > 0,68$)
25–35	Lempung lanau sedang–kaku	5–19	Konsolidasi relatif selesai
> 35	Lempung lanau kaku–sangat kaku	14–23	Lapisan pendukung tiang auditorium (38 m)

Posisi ujung tiang *workshop* pada kedalaman 12 m tepat berada pada batas bawah lapisan pasir lempungan dan batas atas lapisan lempung lanau sangat lunak. Dengan demikian, di bawah

ujung tiang terdapat lapisan lunak setebal sekitar 13 m yang praktis tidak memberikan tahanan, sedangkan tiang auditorium sepanjang 38 m menembus seluruh lapisan lunak dan bertumpu pada lapisan kaku.

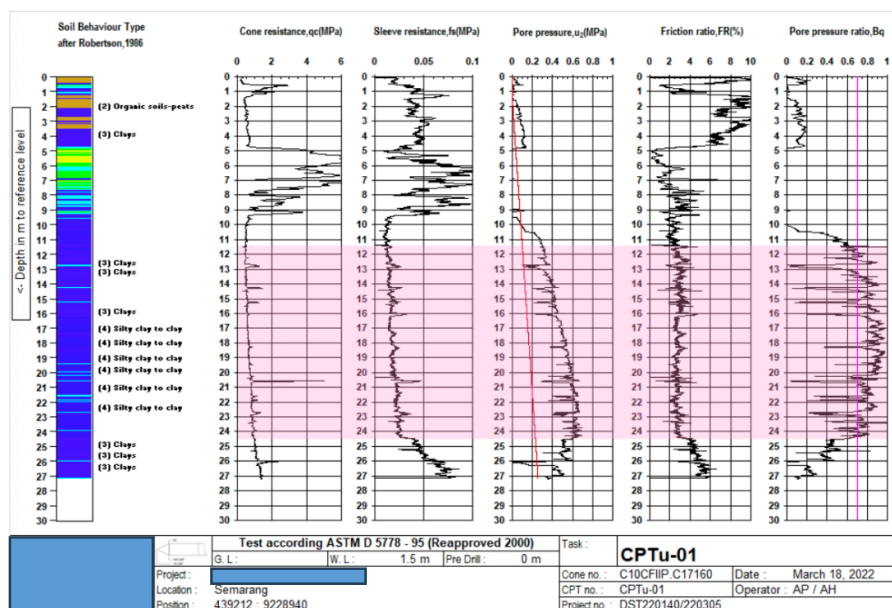
3.2. Hasil Uji CPTu dan Kondisi Konsolidasi

Hasil CPTu pada Gambar 5 hingga Gambar 7 konsisten dengan hasil pengeboran. Lima meter teratas merupakan tanah timbunan yang telah dikerjakan dalam kurun waktu tertentu, ditandai dengan nilai FR tinggi yang mencapai 6–8%. Di bawah timbunan terdapat lapisan tanah lunak dengan ketebalan yang bervariasi antarkelompok titik, yang pada CPTu-01 diarsir merah muda pada kedalaman sekitar 12–25 m. Pada lapisan ini tahanan ujung q_c sangat kecil, tekanan air pori u_2 jauh di atas garis hidrostatik, dan B_q melampaui garis batas 0,68. Kombinasi ketiga indikator tersebut menunjukkan bahwa lapisan lunak masih menyimpan tekanan air pori eksese dan belum selesai berkonsolidasi (P P Rahardjo et al., 2016; Robertson & Cabal, 2014).

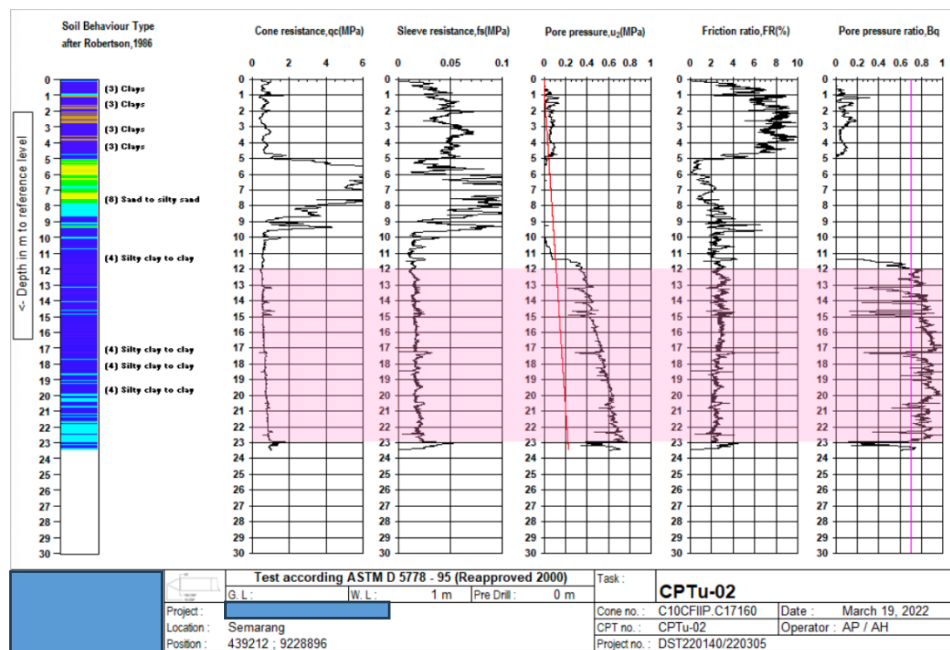
Nilai B_q pada zona lunak berkisar sekitar 0,8, jauh lebih besar dari 0,68, dan derajat konsolidasi rata-rata lapisan tersebut sebesar 75–82%. Hitungan pada salah satu titik representatif menggunakan Persamaan (1) dan (2) memberikan $q_t = 0,8 + (1 - 0,5)(0,7) = 1,15$ MPa dan

$$B_q = \frac{0,553}{1,15 - (0,94 - 0,278)} = 1,092$$

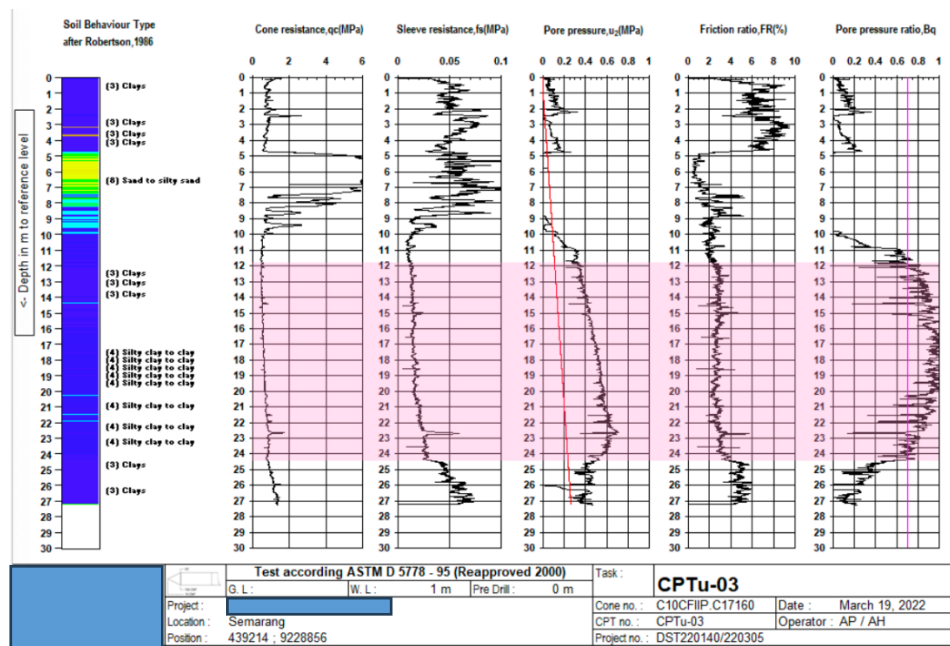
Substitusi $B_q = 1,092$ ke Persamaan (3) menghasilkan $OCR = 1/(1,2 \times 1,092 + 0,1) = 0,709$. Nilai OCR yang kurang dari satu menegaskan bahwa lapisan lunak berada dalam kondisi *under consolidated*, yaitu tegangan efektif aktual masih lebih kecil daripada tegangan efektif ekuilibrium.



Gambar 5. Hasil uji CPTu-01



Gambar 6. Hasil uji CPTu-02

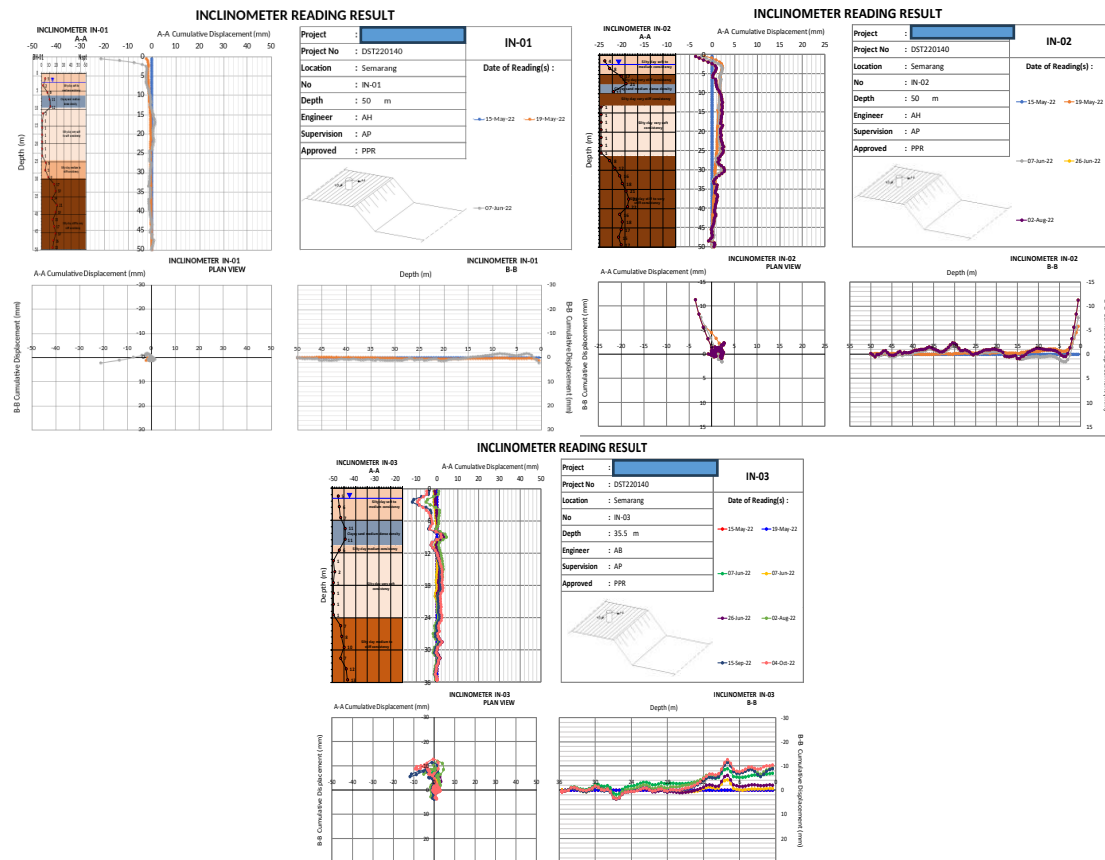


Gambar 7. Hasil uji CPTu-03

3.3. Hasil Pembacaan *Inclinometer*

Inclinometer IN-01 hingga IN-03 menunjukkan perpindahan lateral kumulatif yang sangat kecil di sepanjang kedalaman 50 m, ditunjukkan pada Gambar 8. Deviasi hanya tampak pada bagian atas grafik, yang berkaitan dengan getaran dan beban kendaraan berat yang melintas di depan bangunan *workshop*. Tidak terlihat bidang gelincir maupun pergeseran lateral pada

kedalaman lapisan lunak, sehingga tidak ada indikasi pergerakan lateral akibat galian maupun pemancangan.



Gambar 8. Hasil pembacaan *inclinometer*

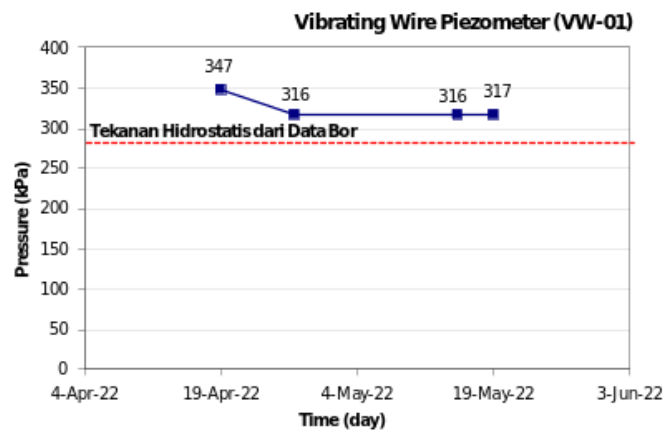
3.4. Hasil Pembacaan *Vibrating Wire Piezometer*

Piezometer VW-01 terbaca antara 347,4 kPa pada pembacaan pertama dan 316–317 kPa pada pembacaan berikutnya ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 9. Tekanan hidrostatik teoretis dengan muka air tanah pada kedalaman 2 m adalah 180 kPa, sehingga tekanan air pori eksres pada pembacaan pertama sebesar $347,4 - 180 = 167$ kPa. Pada pembacaan terakhir (hari ke-30), tekanan eksres menjadi $317,3 - 180 = 137$ kPa, atau terdisipasi sekitar 18% dalam satu bulan. Setelah hari ke-8, tekanan relatif stabil di sekitar 317 kPa.

Tabel 3. Data pembacaan *vibrating wire piezometer* dan tekanan eksres

No.	Tanggal	Hari ke-	Digit	Suhu (°C)	P (kPa)	Δu eksres (kPa)
1	19/04/2022	1	5015,3	28,6	347,4	167,4
2	27/04/2022	8	5124,2	28,5	316,5	136,5
3	15/05/2022	26	5125,0	28,9	316,2	136,2
4	19/05/2022	30	5121,2	30,0	317,3	137,3

Δu eksres = $P - 180$ kPa (tekanan hidrostatik teoretis, muka air tanah pada kedalaman 2 m).



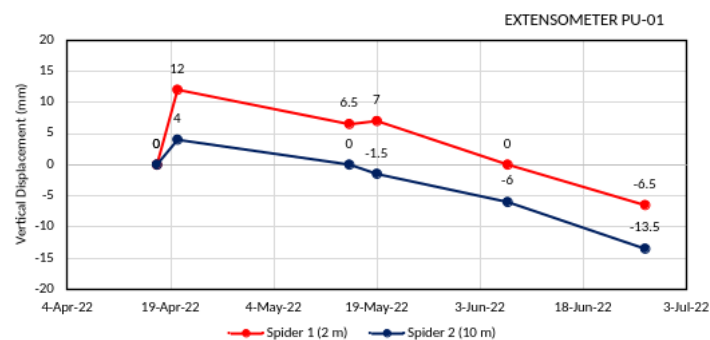
Gambar 9. Hasil grafik piezometer vibrating wire VW-01

3.5. Hasil Pembacaan *Extensometer*

Extensometer PU-01 merekam perubahan vertikal pada dua kedalaman ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 10. *Spider 2* (10 m) menunjukkan tren penurunan yang konsisten, dari 0 mm menjadi -13,5 mm pada 27 Juni 2022, atau sekitar 13 mm dalam 71 hari (rata-rata 0,19 mm/hari atau sekitar 5,7 mm/bulan). *Spider 1* (2 m) mula-mula menunjukkan kenaikan sebesar 12 mm pada pembacaan kedua, yang kemudian berbalik menjadi -6,5 mm. Fluktuasi awal tersebut diduga terkait penyesuaian pemasangan alat dan perubahan kadar air di lapisan timbunan dekat permukaan. Pergerakan vertikal bersih yang terukur, meskipun kecil secara absolut, mengonfirmasi adanya pergerakan vertikal pada area yang telah dikonstruksi.

Tabel 4. Data perubahan vertikal *extensometer* PU-01

No.	Tanggal	Hari ke-	<i>Spider 1</i> (2 m), perubahan (mm)	<i>Spider 2</i> (10 m), perubahan (mm)
1	17/04/2022	0	0	0
2	20/04/2022	3	12	4
3	15/05/2022	28	6,5	0
4	19/05/2022	32	7	-1,5
5	07/06/2022	51	0	-6
6	27/06/2022	71	-6,5	-13,5



Gambar 10. Hasil grafik *extensometer* PU-01

3.6. Gesekan Selimut Negatif

Perhitungan NSF dengan Persamaan 4 menggunakan $\phi'_c = 10,2^\circ$, sehingga $K = 1 - \sin 10,2^\circ \approx 0,82$, tegangan efektif $\sigma'_c = 0,3$, dan $L_e = 0,75 \times 12 \text{ m} = 9 \text{ m}$:

$$F = 3,14 \times 0,6 [(1 - \sin 10,2^\circ) 0,3 \tan 10,2^\circ] 9 = 0,749 \text{ kN}$$

3.7. Penurunan Konsolidasi dan Waktu Penurunan

Tegangan efektif awal pada lapisan ditinjau dihitung dari berat isi terendam: $P'_0 = 5 \times (18 - 10) + 6 \times (17 - 10) = 82 \text{ kN/m}^2$. Pertambahan tegangan akibat timbunan 5 m ($\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$) dan beban tambahan 4 kN/m² adalah $\Delta P = 5 \times 18 + 4 = 94 \text{ kN/m}^2$. Dengan $C_c = 0,49$, $e_0 = 1,67$, dan $H = 12 \text{ m}$, Persamaan 5 menghasilkan:

$$S_c = 0,49 \frac{12}{1+1,67} \log \frac{82+94}{82} = 0,73 \text{ m}$$

Waktu untuk mencapai derajat konsolidasi 90% dari Persamaan (6) dengan $C_v = 1,8 \times 10^{-4}$ dilaporkan sebesar $t_{90} = 12.725.107$ detik, atau sekitar 5 bulan sejak pengujian. Ringkasan seluruh hasil perhitungan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Ringkasan hasil analisis dan perhitungan

Parameter	Nilai	Interpretasi
B_q (profil CPTu)	$\approx 0,8 (> 0,68)$	Lapisan lunak <i>under consolidated</i>
Derajat konsolidasi	75–82%	Konsolidasi belum selesai
B_q (titik representatif)	1,092	Tekanan ekses tinggi
OCR	0,709	OCR < 1: <i>under consolidated</i>
Tekanan ekses (piezometer)	167 kPa $\rightarrow$ 137 kPa	Disipasi lambat ($\pm 18\%$ /bulan)
Penurunan <i>extensometer</i>	13,5 mm / 71 hari	Penurunan masih berlangsung
NSF, F	0,749 kN	Hasil perhitungan awal (lihat Diskusi)
S_c	0,73 m	Penurunan total diperkirakan besar
t_{90}	≈ 5 bulan (dilaporkan)	Perlu verifikasi

3.8. Evaluasi Hipotesis

Hubungan antara bukti lapangan dan ketiga hipotesis dirangkum pada Tabel 6. H1 didukung oleh empat sumber data yang saling independen: $B_q > 0,68$ dan OCR < 1 dari CPTu, tekanan ekses pada *piezometer*, penurunan vertikal pada *extensometer*, dan N-SPT = 1 pada lapisan 12–25 m. Konsistensi antara indikator *in situ* dan data pengeboran memperkuat interpretasi bahwa lapisan lunak tebal ini belum selesai berkonsolidasi.

Tabel 6. Matriks bukti terhadap hipotesis penyebab kerusakan

Hipotesis	Bukti pendukung	Bukti yang bertentangan	Status
H1: tanah <i>under consolidating</i>	$B_q > 0,68$; OCR = 0,709; tekanan ekses 137–167 kPa; penurunan 13,5 mm; $S_c = 0,73$ m	–	Didukung
H2: ujung tiang 12 m menggantung di tanah lunak	Lapisan lunak N-SPT = 1 pada 12–25 m tepat di bawah ujung tiang	–	Didukung
H3: kerusakan akibat pemancangan	Tekanan ekses ada (tetapi dijelaskan oleh H1)	<i>Inclinometer</i> tidak menunjukkan perpindahan lateral; tekanan <i>piezometer</i> menurun, tanpa lonjakan	Tidak didukung

3.9. Mekanisme Kerusakan Bangunan

Hasil stratigrafi menunjukkan bahwa ujung *mini pile* 12 m berada tepat di atas lapisan lempung lanau sangat lunak setebal sekitar 13 m. Lapisan ini sedang mengalami pemampatan akibat beban timbunan setebal 5 m dan karena itu tidak mampu memberikan tahanan ujung yang memadai (Budhu, 2011; Das & Sobhan, 2014). Kombinasi tiga proses diperkirakan bekerja bersamaan. Pertama, tanah timbunan dan lapisan lunak di sekitar tiang turun lebih besar daripada tiang, sehingga timbul NSF dan *drag-down* pada tiang (Irsyam, 2003; Prakash & Sharma, 1990). Kedua, karena tanah di sekeliling bangunan turun relatif terhadap struktur yang ditopang tiang, timbul penurunan diferensial antara kolom, dinding, dan pelat lantai yang bertumpu di atas tanah, dan inilah pola retak yang teramati pada bangunan *workshop*. Ketiga, tekanan air pori ekses yang tinggi menciptakan gradien hidraulik ke atas yang berpotensi menimbulkan gaya *uplift* pada lantai dan kolom.

Dalam konteks ini, kerusakan juga tidak sejalan dengan pola yang diharapkan dari pemancangan. Pemancangan tiang di tanah lempung lunak umumnya menimbulkan perpindahan lateral serta pengangkatan tanah di sekitar tiang yang akan terekam oleh *inclinometer*, dan tekanan air pori ekses yang ditimbulkannya terdisipasi secara radial seiring jarak dan waktu. Pada penelitian ini, *inclinometer* tidak menunjukkan perpindahan lateral yang berarti dan tekanan air pori terbaca menurun secara monoton. Selain itu, jenis tiang auditorium (60 cm, 38 m) menembus lapisan lunak hingga lapisan kaku sehingga tidak ikut terseret oleh penurunan lapisan lunak. Semua temuan ini menunjukkan bahwa penurunan tanah lunak yang masih berkonsolidasi merupakan penyebab yang lebih konsisten dengan data dibandingkan dengan pemancangan.

Perlu dicatat bahwa tanah dengan OCR rendah memiliki kuat geser dan kekakuan yang relatif kecil, sehingga lapisan lunak ini juga lebih sensitif terhadap tambahan beban (Akpila & Omunguye, 2014; Wu et al., 2021). Kondisi tersebut menjelaskan mengapa penambahan beban timbunan relatif kecil sudah cukup menimbulkan penurunan yang signifikan terhadap fondasi dangkal maupun tiang yang tidak mencapai lapisan keras.

3.10. Konsistensi dan Keterbatasan Data

Beberapa aspek memerlukan kehati-hatian dalam interpretasi. Pertama, penurunan konsolidasi akhir yang dihitung (0,73 m) jauh lebih besar daripada penurunan terukur *extensometer* (13,5 mm), dan laju terukur sekitar 5,7 mm/bulan tidak sejalan dengan t_{90} sekitar 5 bulan. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh: (a) *extensometer* hanya mengukur pemampatan pada kedalaman 2 m dan 10 m, bukan seluruh lapisan lunak sampai kedalaman 25 m; (b) nilai C_v laboratorium pada benda uji kecil umumnya lebih besar daripada nilai lapangan (Mitchell & Gardner, 1975), sehingga waktu konsolidasi lapangan lebih lama; dan (c) masa pemantauan yang hanya sekitar 2,5 bulan. Karena itu, nilai t_{90} lebih tepat diperlakukan sebagai batas bawah, bukan prediksi waktu penyelesaian penurunan.

Kedua, tekanan eksres terukur (137–167 kPa) lebih besar dari pertambahan tegangan akibat timbunan ($\Delta P = 94$ kPa). Secara teori, pada pembebanan tak terdrainase tekanan eksres tidak lebih besar dari tambahan tegangan total. Perbedaan ini dapat berasal dari ketidakpastian garis dasar hidrostatik (lihat catatan pada bagian Hasil), dari akumulasi beban sebelumnya, atau dari sumber lain di luar timbunan. Namun, tidak adanya perpindahan lateral pada *inclinometer* dan tren tekanan yang menurun menjadikan kontribusi pemancangan sebagai penyebab utama kecil kemungkinannya. Ketiga, nilai NSF yang dihitung (0,749 kN) sangat kecil bila dibandingkan dengan kapasitas tiang pancang sejenis, sehingga NSF pada perhitungan ini tidak dapat menjelaskan sendiri kerusakan yang teramati, dan perhitungan perlu diulang dengan diameter ekuivalen tiang *workshop* serta tegangan efektif yang sesuai. Dengan keterbatasan tersebut, kesimpulan penelitian ini bertumpu terutama pada indikator CPTu, stratigrafi, dan perilaku pergerakan, bukan pada nilai NSF absolut.

3.11. Implikasi dan Rekomendasi Geoteknik

Untuk bangunan *workshop* yang sudah berdiri, disarankan: (a) melanjutkan pemantauan *extensometer* dan *piezometer* secara berkala; hasil pembacaan dapat dipakai untuk memprediksi penurunan akhir dengan metode observasional Asaoka (Asaoka, 1978) setelah data cukup banyak; (b) memisahkan struktur lantai dari tanah di bawahnya atau menggunakan pelat lantai yang ditopang tiang serta sambungan utilitas yang fleksibel agar penurunan diferensial dapat diakomodasi; dan (c) menyediakan drainase di bawah lantai untuk mengurangi potensi *uplift*. Untuk pembangunan di area sekitarnya, tiang sebaiknya menembus seluruh lapisan lunak sampai lapisan kaku sebagaimana tiang auditorium, dan perhitungan NSF perlu dimasukkan dalam desain (Irsyam, 2003). Percepatan konsolidasi dapat dilakukan melalui *preloading* dengan drainase vertikal sesuai teori konsolidasi radial Barron (1948) atau *vacuum preloading* (Chu & Yan, 2005; Han, 2015), yang efektivitasnya dapat dievaluasi dengan CPTu ulang (Rongsadi, 2017).

4. SIMPULAN

Penyelidikan forensik geoteknik menunjukkan bahwa kerusakan bangunan *workshop* disebabkan oleh penurunan tanah lunak yang masih berkonsolidasi, bukan oleh pemancangan fondasi gedung di sekitarnya. Pengeboran dan CPTu mengidentifikasi timbunan setebal sekitar 5 m (FR 6–8%) di atas lapisan lempung lanau sangat lunak ($N-SPT = 1$) pada kedalaman sekitar 12–26 m. Lapisan tersebut berada dalam kondisi *under consolidated*, ditunjukkan oleh $B_q > 0,68$, $OCR = 0,709$, dan derajat konsolidasi 75–82%. Ujung *mini pile* sedalam 12 m menggantung pada lapisan lunak ini, sedangkan tiang auditorium sedalam 38 m menembus hingga lapisan kaku.

Pemantauan instrumentasi mendukung kesimpulan tersebut. *Piezometer* mencatat tekanan air pori eksek 167 kPa yang menurun menjadi 137 kPa dalam satu bulan, *extensometer* merekam penurunan vertikal 13 mm dalam tiga bulan, dan *inclinometer* tidak menunjukkan perpindahan lateral yang signifikan sehingga pengaruh gaya lateral akibat galian dan pemancangan dapat diabaikan. Perhitungan menghasilkan penurunan konsolidasi 0,73 m. Kerusakan bangunan diperkirakan dipicu oleh penurunan diferensial akibat konsolidasi tanah lunak serta gaya *uplift* akibat penjaralan tekanan air pori eksek ke atas pada lantai dan kolom.

Penelitian lanjutan disarankan untuk memverifikasi parameter perhitungan NSF dan waktu konsolidasi, memperpanjang masa pemantauan, serta mengevaluasi efektivitas perbaikan tanah dan penanganan struktural pada bangunan terdampak.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Akpila, S. B., & Omunguye, I. W. (2014). Soil Modulus and Undrained Cohesion of Clayey Soils from Stress-Strain Models. *Canadian Journal of Pure and Applied Sciences*.
- Asaoka, A. (1978). Observational Procedure of Settlement Prediction. *Soils and Foundations*, 18(4), 87–101. https://doi.org/10.3208/sandf1972.18.4_87
- Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations, 3rd Edition*. John Wiley & Sons.
- Chen, B. S., & Mayne, P. W. (1994). *Profiling the Overconsolidation Ratio of Clays by Piezocone Tests*. National Science Foundation; Georgia Institute of Technology.
- Chu, J., & Yan, S. W. (2005). Application of the Vacuum Preloading Method in Soil Improvement Projects. In B. Indraratna & J. Chu (Eds.), *Ground Improvement Case Histories: Embankments with Special Reference to Consolidation and Other Physical Methods (Elsevier Geo-Engineering Book Series, Vol. 3)* (pp. 91–117). Elsevier.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis), Jilid 1*. Erlangga.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2014). *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning (Global Engineering).
- Han, J. (2015). *Principles and Practices of Ground Improvement*. John Wiley & Sons.
- International, A. (2015). *ASTM D2850-15 Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2850-15>
- Irsyam, M. (2003). Beberapa Hal yang Perlu Dipertimbangkan dalam Desain Tiang Pancang di Tanah Lunak. In *Seminar Geoteknik*.
- Karlsrud, K., Lunne, T., & Brattlien, K. (1996). Improved CPTU Correlations Based on Block

- Samples. In *Nordisk Geoteknikermøte (NGM-96)*.
- Lestari, A. (2024). *Perilaku Gambut dan Lapisan Tanah Lanau Berlempung Konsistensi Sangat Lunak Riau-Sumatra Berdasarkan Uji CPTu dan Dilatometer*.
- Mayne, P. W., & Kemper, J. B. (1988). Profiling OCR in Stiff Clays by CPT and SPT. *Geotechnical Testing Journal*, 11(2), 139–147. <https://doi.org/10.1520/GTJ10960J>
- Mitchell, J. K., & Gardner, W. S. (1975). In Situ Measurement of Volume Change Characteristics. In *Proceedings of the Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties*. ASCE.
- Prakash, S., & Sharma, H. D. (1990). *Pile Foundations in Engineering Practice*. John Wiley & Sons.
- Rahardjo, P P, Anggoro, B. W., & Wirawan, A. (2016). CPTu in consolidating soils. *Geotechnical and Geophysical Site Characterisation*, 5, 363–368.
- Rahardjo, Paulus P. (1996). *Review of Soil Investigation for Jakarta Reclamation Project*.
- Rahardjo, Paulus P. (2008). *Penyelidikan Geoteknik dengan Uji In-situ*. Universitas Katolik Parahyangan.
- Rahardjo, Paulus P. (2021). *Laporan Final Monitoring Kampus Semarang*.
- Robertson, P. K., & Cabal, K. L. (2014). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, 6th Edition*. Gregg Drilling & Testing, Inc.
- Rongsadi, K. (2017). *Perilaku Tanah Lunak Setelah Vacuum Preloading dengan Menggunakan CPTu*.
- Schmertmann, J. H. (1978). *Guidelines for Cone Penetration Test: Performance and Design*. U.S. Federal Highway Administration.
- Wu, P., Li, Y., Wang, L., Liu, W., & Song, Y. (2021). Triaxial tests on the overconsolidated methane hydrate-bearing clayey-silty sediments. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 206, 109035. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109035>