

## Analisis Implementasi dan Kualitas Kolom *Soil-Cement Metode Rapid Jet Grouting* untuk Stabilitas Galian Stasiun Bawah Tanah MRT Jakarta

Sony Desta Primandani\*<sup>1</sup>, M.M. Lanny W. Pandjaitan<sup>2</sup>, Lukas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Biosains, Teknologi dan Inovasi, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jalan Jenderal Sudirman 51, Jakarta 12930

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Biosains, Teknologi dan Inovasi, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jalan Jenderal Sudirman 51, Jakarta 12930

<sup>3</sup>Atma Jaya Artificial Intelligence Center (AJAIC), Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jalan Jenderal Sudirman 51, Jakarta 12930

Article Info	Abstract
<i>Article history:</i> Received 23 December 2025  Accepted 5 January 2026 <i>Keywords:</i> Ground Improvement, Alluvial Clay, Jet Grouting, Rapid Jet Method, Unconfined Compression Strength	<i>The construction of the underground stations for the Mass Rapid Transit (MRT) Phase 2 (CP202) Project in Jakarta faces a serious geotechnical constraint: the presence of very soft Alluvial Clay 1 (AC1) layers (<math>c_u</math> as low as 20–35 kPa), which threatens the stability of deep excavations. This study analyzes the implementation and quality verification of Ground Improvement (GI) using the Jet Grouting Rapid (R2) method at the Sawah Besar Station site. The Rapid Jet method was strategically selected to produce large-diameter soil-cement columns (<math>\phi 3,5m</math>) under high operational pressure (30–34 MPa), aiming to increase the Unconfined Compression Strength (UCS) and form a base seal. Quality control was rigorously performed using UCS testing according to the ASTM D2166/D2166M-16 standard on core samples from the Check Hole (CH-01). The data indicate that strict process compliance with the critical injection parameters (30–34 MPa) successfully produced soil-cement columns meeting the design strength criteria. This success effectively increased the excavation's Safety Factor and mitigated the risks of basal heave and water seepage. The main finding emphasizes integrated quality validation, where technical success is guaranteed by absolute adherence to the critical input energy (jet pressure) to ensure the method's effectiveness in challenging AC1 soil conditions.</i>

Info Artikel	Abstrak
<i>Histori Artikel:</i> Diserahkan: 23 Desember 2025  Diterima: 5 Januari 2026 <i>Kata Kunci:</i> Perbaikan Tanah, Alluvial Clay, Jet Grouting, Rapid Jet Method, Kuat Tekan Bebas	Konstruksi stasiun bawah tanah pada Proyek Mass Rapid Transit (MRT) Fase 2 (CP202) Jakarta menghadapi kendala geoteknik serius berupa lapisan <i>Alluvial Clay 1</i> (AC1) yang sangat lunak ( $c_u$ serendah 20–35 kPa), yang mengancam stabilitas galian dalam ( <i>deep excavation</i> ). Penelitian ini menganalisis implementasi dan verifikasi kualitas perbaikan tanah ( <i>Ground Improvement - GI</i> ) menggunakan metode <i>Jet Grouting Rapid</i> (R2) di lokasi Stasiun Sawah Besar. Metode <i>Rapid Jet</i> dipilih secara strategis untuk menghasilkan kolom <i>soil-cement</i> berdiameter besar ( $\phi 3,5 m$ ) di bawah tekanan operasi tinggi (30–34 MPa), bertujuan untuk meningkatkan Kuat Tekan Bebas ( <i>Unconfined Compression Strength - UCS</i> ) dan membentuk <i>base seal</i> . Kontrol kualitas dilakukan secara ketat melalui pengujian UCS sesuai standar ASTM D2166/D2166M-16 pada sampel inti dari <i>Check Hole</i> (CH-01). Data menunjukkan bahwa kepatuhan proses yang ketat terhadap parameter injeksi kritis (30–34 MPa) berhasil menghasilkan kolom <i>soil-cement</i> dengan kuat tekan yang memenuhi kriteria desain. Keberhasilan ini secara efektif meningkatkan Faktor Keamanan ( <i>Safety Factor</i> ) galian menjadi sangat tinggi, memitigasi risiko <i>base heave</i> dan rembesan air. Pembelajaran utama adalah validasi kualitas yang terpadu, di mana keberhasilan teknis ditekankan pada kepatuhan mutlak terhadap energi masukan kritis (tekanan jet) yang menjamin efektivitas metode di lingkungan tanah AC1 yang menantang.

\*Corresponding author. Sony Desta Primandani  
Email address: [sonydesta@gmail.com](mailto:sonydesta@gmail.com)

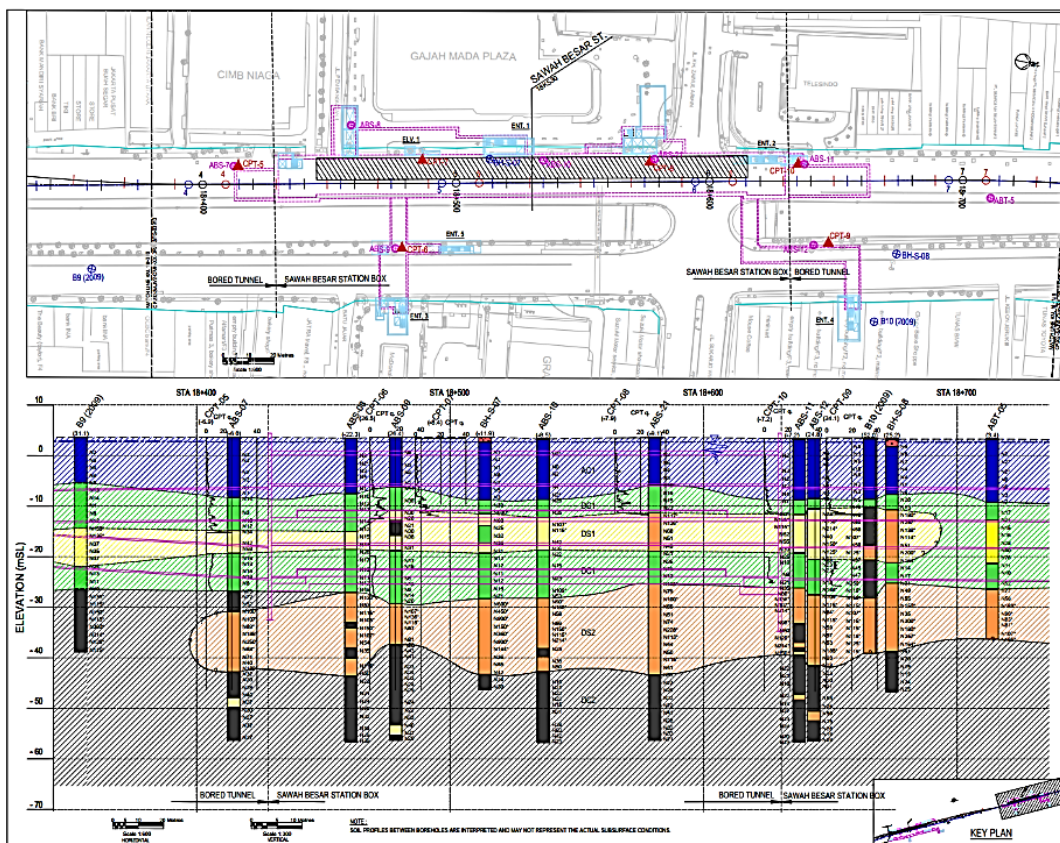
## 1. PENDAHULUAN DAN DASAR TEORI

### 1.1 Pendahuluan

Tantangan konstruksi di atas tanah lunak atau tanah bermasalah semakin meningkat, terutama di daerah padat penduduk atau kawasan industri di Indonesia, yang seringkali memiliki deposit *alluvial* yang rentan terhadap penurunan dan likuefaksi. Perbaikan tanah menjadi solusi vital untuk memastikan stabilitas dan keamanan infrastruktur.

Pembangunan infrastruktur Mass Rapid Transit (MRT) Jakarta Fase 2 (CP202) di bawah kawasan pusat kota menuntut rekayasa geoteknik yang presisi. Konstruksi stasiun bawah tanah, terutama galian dalam (*deep excavation*) yang dibatasi oleh dinding penahan permanen (*Diaphragm-Wall*), memerlukan stabilitas dan pengendalian rembesan air tanah yang tinggi. Kendala utama pada lokasi proyek, berdasarkan *Geotechnical Interpretative Report (GIR)*, adalah keberadaan lapisan *Alluvial Clay 1 (AC1)*. Ciri dari lapisan ini adalah Kuat Geser Tak Terdrainase / *Consolidated Undrained* ( $c_u$ ) yang sangat rendah (20–35 kPa), yang berisiko menyebabkan kegagalan pada dasar galian (*basal heave*).

Permasalahan stabilitas galian pada tanah lunak untuk konstruksi stasiun bawah tanah juga ditemukan pada berbagai proyek *subway* di Asia. Penerapan *jet grouting* pada tanah dengan kompresibilitas tinggi terbukti mampu meningkatkan kestabilan galian melalui peningkatan kekuatan tanah dan pengurangan deformasi lateral (Liu et al., 2020). Selain itu, studi numerik menunjukkan bahwa konfigurasi kolom *jet grouting* yang tepat dapat meningkatkan stabilitas dasar galian (*basal stability*) dan menurunkan deformasi akibat *unloading* pada *deep excavation* tanah lempung lunak (Li et al., 2020)



**Gambar 1.**  
Profil Geologi Stasiun Sawah Besar

Konsep perbaikan tanah yang diimplementasikan adalah pembentukan blok *soil-cement* di bawah dasar galian yang direncanakan. Blok ini memiliki dua fungsi kritikal:

1. Peningkatan Kekuatan: Transformasi tanah AC1 yang plastis menjadi material komposit yang kaku dan kuat, yang secara signifikan meningkatkan  $c_u$  dan modulus elastisitas ( $E_{50}$ ), sehingga meningkatkan SF.
2. Penyegelan Hidrolik (*Base Seal*): Blok *soil-cement* berfungsi sebagai lapisan penyekat berpermeabilitas rendah, mengendalikan aliran air tanah dari bawah ke dalam galian.

Metode *Jet Grouting* dipilih karena karakteristiknya yang minim getaran (cocok untuk lingkungan perkotaan) dan kemampuannya menghasilkan massa tanah yang homogen dan kuat. Dalam proyek ini, *Rapid Jet Method* (R2) digunakan untuk mengoptimalkan efisiensi.

Oleh karena itu, penelitian ini ditujukan untuk.

1. Menjelaskan secara detail prosedur dan parameter implementasi *Rapid Jet Grouting* yang dirancang untuk mengatasi tanah AC1 yang lunak.
2. Menganalisis proses *Quality Control* (QC) melalui pengujian UCS (*Unconfined Compressive Strength*) dan meninjau penanganan insiden kegagalan awal sebagai pelajaran penting dalam validasi proyek.

Menyajikan kontribusi dan pembelajaran kunci yang diperoleh dari proyek ini, khususnya mengenai keandalan metode R2 di bawah tekanan operasional tinggi (30–34 MPa) di lingkungan geoteknik Jakarta.

## 1.2 Dasar Teori

### 1.2.1 Mekanika Tanah Lunak dan Stabilitas Galian

**Karakteristik Tanah Aluvial:** Tanah aluvial, seperti lapisan *Alluvial Clay* (AC) yang umum di Jakarta, dicirikan oleh konsistensi lunak hingga sangat lunak, plastisitas tinggi, dan nilai Kuat Geser Tak Terdrainase ( $c_u$ ) yang sangat rendah (Darwis, 2017). Kuat geser ini menjadi parameter kunci untuk menganalisis stabilitas tanah kohesif.

**Mekanisme Kegagalan (*Basal Heave*):** Dalam rekayasa galian dalam (*deep excavation*), rendahnya  $c_u$  meningkatkan risiko *Basal Heave* (kegagalan dasar galian) karena tanah di bawah galian tidak mampu menahan tekanan pelepas beban. Kegagalan ini terjadi ketika Faktor Keamanan (SF) geser turun di bawah batas aman ( $SF < 1,5$ ).

**Tujuan Perbaikan Tanah (GI):** Untuk mengatasi risiko tersebut, GI harus dilakukan untuk secara fundamental meningkatkan  $c_u$  dan modulus kekakuan ( $E_{50}$ ) serta berfungsi sebagai penyekat hidrolik (*base seal*) untuk mengendalikan rembesan air (Bezuijen et al., 2007).

### 1.2.2 Jet Grouting

*Jet Grouting* adalah salah satu metode perbaikan tanah yang pertama kali dikembangkan di Jepang dan Inggris, dan kini digunakan secara luas dan global. Metode R2 (*Double-Tube*) adalah konfigurasi *jet grouting* yang paling efisien, di mana monitor injeksi mengeluarkan *grout* bertekanan tinggi yang diselimuti oleh udara bertekanan tinggi.

**Peningkatan Energi:** Udara berfungsi memperkuat energi pemotongan jet. Hal ini krusial untuk mengatasi kohesi tinggi pada tanah lempung.

**Pencapaian:** Energi yang diperkuat ini memungkinkan pembentukan kolom dengan diameter yang jauh lebih besar (umumnya  $> 2,0$  m) dan homogenitas optimal.

Tekanan Kritis: Keberhasilan pencampuran pada tanah lempung plastis memerlukan tekanan injeksi yang sangat tinggi, umumnya 30 MPa hingga 40 MPa (atau 300–400 bar), untuk menjamin penetrasi dan *mixing* yang efektif.

Optimasi parameter *jet grouting*, terutama tekanan injeksi, *lift rate*, dan *flow rate grout*, memiliki pengaruh langsung terhadap diameter efektif kolom serta peningkatan stabilitas stasiun bawah tanah pada kondisi stratifikasi tanah yang kompleks (Wu *et al.*, 2024). Selain itu, evaluasi kualitas *jet grouting* tidak hanya ditentukan oleh hasil akhir kuat tekan, tetapi juga harus mempertimbangkan konsistensi parameter konstruksi dan heterogenitas tanah asli selama proses pelaksanaan (Wang *et al.*, 2021)

### 1.2.3 Soil-Cement

Material *soil-cement* yang dihasilkan harus memiliki kekuatan dan kekakuan yang memadai untuk berfungsi sebagai elemen struktural (Berg & Samol, 1986).

Metode *jet grouting* tekanan tinggi mampu meningkatkan karakteristik deformasi dan kekuatan tanah lempung secara signifikan melalui pembentukan struktur *soil-cement* yang lebih homogen dan padat (Zhou *et al.*, 2020). Evaluasi kekuatan material *soil-cement* berbasis pengujian UCS juga dapat digunakan untuk memastikan konsistensi kualitas kolom *jet grouting* di lapangan (Li *et al.*, 2023).

Kuat Tekan Bebas (*Unconfined Compression Strength* - UCS) adalah uji laboratorium standar yang digunakan untuk mengukur kekuatan material *soil-cement* dalam kondisi tidak terdrainase. Nilai  $\sigma_c$  yang tercapai mencerminkan peningkatan  $c_u$  efektif tanah. Hasil UCS harus diverifikasi terhadap kriteria kekuatan desain yang ditetapkan oleh perencana geoteknik, yang akan menjamin peningkatan SF sesuai target. Prosedur pengambilan sampel inti dan pengujian wajib mengikuti standar internasional seperti ASTM D2166/D2166M-16 (*Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*). Kepatuhan terhadap standar ini memastikan validitas data *Quality Control*. Kualitas produk (UCS) harus divalidasi bersama dengan kepatuhan proses (rekaman data tekanan dan laju alir). Konsistensi dalam parameter kritis (30–34 MPa) membuktikan bahwa energi yang tepat telah disalurkan untuk menghasilkan material yang homogen.

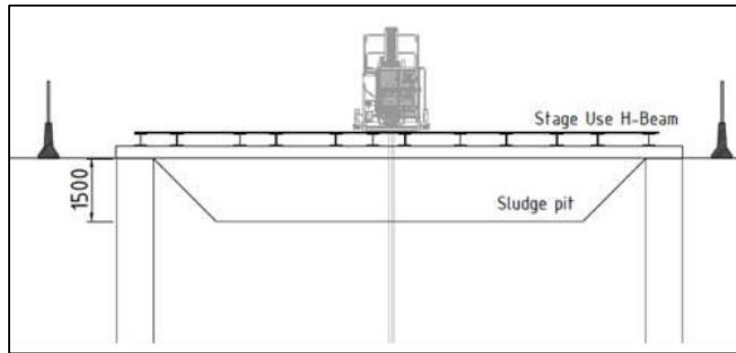
## 2. METODE PELAKSANAAN

Tahapan implementasi pekerjaan perbaikan tanah (*Soil Improvement*) dengan metode *Jet Grouting* dibagi menjadi tiga fase utama: Mobilisasi dan Persiapan, Pekerjaan Utama, dan *Quality Control* (Shimizu – Adhi Karya Joint Venture, 2023).

### 2.1 Mobilisasi dan Persiapan

Fase ini mencakup pengangkutan dan pemasangan peralatan utama.

- *Mobilization & Setting Plant*: Peralatan berat, seperti *trailers*, *trucks*, *jet grouting machine*, *crane*, *silo*, *mixer*, *grout pump*, *water tank*, dan *generators*, diangkut ke lokasi proyek dan dipasang pada material *mixing plant area* sesuai dengan tata letak yang direncanakan.
- *Temporary Stage & Sludge Pit*: Pemasangan *temporary stage* dilakukan untuk memastikan stabilitas posisi mesin selama operasi dan mencegah gangguan akibat luapan *sludge*. Dibuat *sludge pit* sebagai penampungan sementara.
- *Calibration*: Dilakukan kalibrasi terhadap instrumen pengukuran kritis, yaitu *flow meter* dan *grout pump*, untuk memverifikasi keakuratan dan konsistensi sebelum memulai pekerjaan utama.



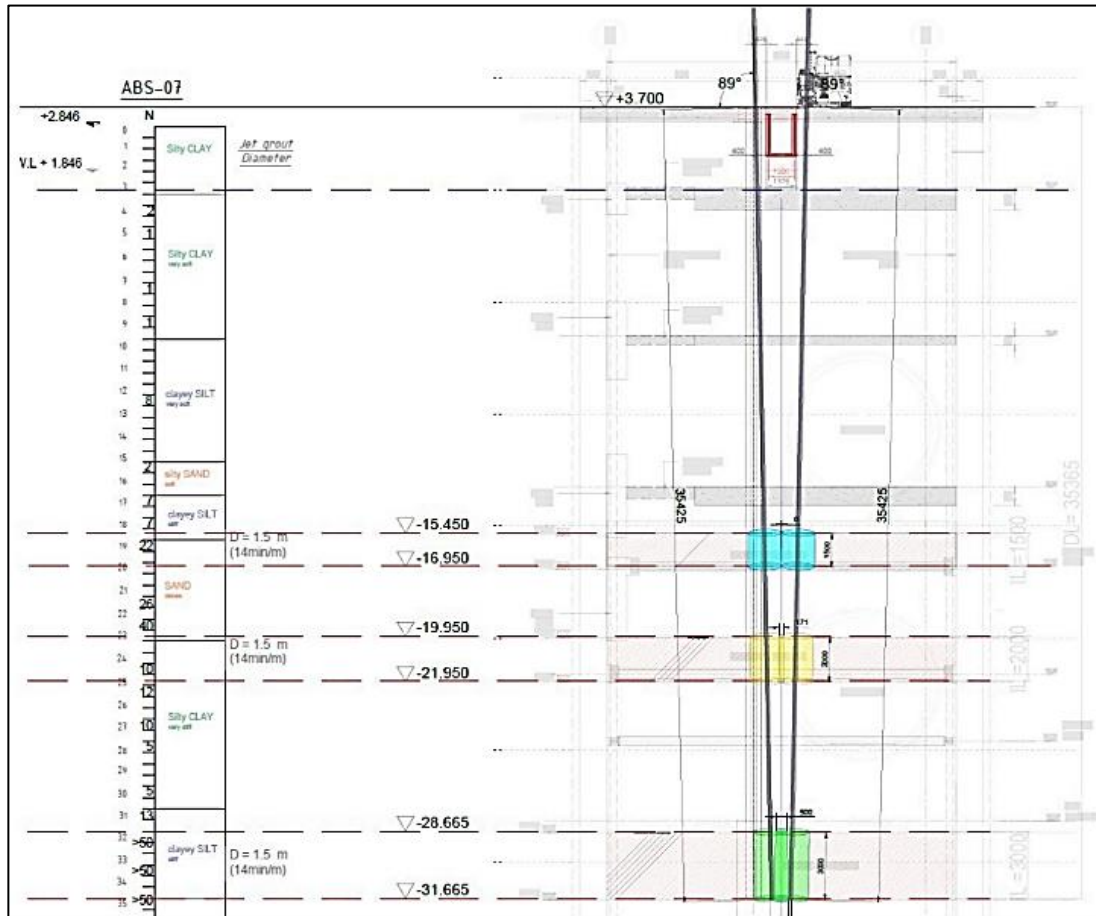
**Gambar 2.**  
*Temporary Stage*

## 2.2 Pekerjaan Utama

Pekerjaan utama dimulai setelah setup dan kalibrasi selesai, mengikuti prosedur langkah demi langkah:

Jenis data yang digunakan meliputi:

- *Setting Machine: Drilling machine* diposisikan secara presisi pada posisi yang ditentukan sebelum pengeboran dimulai.
- *Drilling:* Proses *initial drilling* dilakukan menggunakan pipa 135 mm *rod* hingga mencapai target kedalaman yang telah ditentukan. Pada area dengan utilitas bawah tanah (misalnya: di Sawah Besar Station), dilakukan *inclined drilling* dengan *drilling angle*  $89^\circ$  untuk menghindari kerusakan pada utilitas.
- *Material Mixing:* Bubur semen (*grout slurry*) diproduksi secara paralel di *mixing plant* dengan komposisi *Mix Design Jet Grouting JG1* yang ketat (misalnya, per  $m^3$ : 760 kg *Ordinary Portland Cement*, 8 kg *Admixture*, 760 kg *Water*).
- *Jet Grouting:* Bubur semen diinjeksikan melalui *grouting pipe*. Parameter injeksi, seperti *grout pressure* (30 – 34 MPa) dan *lift rate* (8 – 16 min/m), diatur berdasarkan *soil types* dan kedalaman perbaikan (*depth of improvement*).
- *Completion and Relocation:* Setelah proses *jetting work* selesai di satu titik, semua *rods* dicabut, dan mesin dipindahkan ke titik berikutnya.



**Gambar 3.**

*Drilling Jet Grouting*

### 2.3 Quality Control

*Quality Control* (QC) dilakukan secara sistematis untuk memastikan hasil pekerjaan memenuhi kriteria desain.

- *Construction Control*: Kontrol selama konstruksi mencakup pengecekan parameter operasional di lapangan, seperti *positioning* ( $\pm 10$  cm), *drill angle* ( $\pm 0,5^\circ$ ), dan kualitas *grout slurry* (misalnya: *pressure*  $> 30$  MPa, *specific gravity*  $\pm 0,05$ ).
- *Depth and Volume Control*: *Depth control* dijamin melalui pengukuran panjang *inserted rod* dan elevasi *stage*. *Volume control* dilakukan dengan pencatatan *injected cement slurry* pada *flowmeter* dan menyesuaikannya dengan total produksi bubuk semen.
- *Post-Grouting Verification (Check Hole)*: Setelah pekerjaan selesai di suatu area, dilakukan *core sampling* pada titik *Check Hole(s)* untuk memverifikasi *in-situ soil profile post-grouting*. Frekuensi pengujian kekuatan tekan (*grouting compressive strength*) didasarkan pada jumlah titik. Kriteria penerimaan mensyaratkan kekuatan rata-rata di atas standar (*Sandy Soil*: 3 MPa, *Cohesive Soil*: 1 MPa).

SOIL IMPROVEMENT: JET GROUT CHECKLIST				
Date:	:			
Machinery No.	:			
Location and JG No.	:			
Check Item	Tolerance	Check and/or Record	Method	
<b>Starting of Jet Grouting</b>				
Position of Rod	within ±10cm	<input type="checkbox"/>	cm	Measuring Tape
Rod Length (A)	24.700 m	<input type="checkbox"/>	m	Measuring Tape
Starting Length (B)	Deeper than or equal to design level ((≥21.690 m)	<input type="checkbox"/>	m	
Remaining Rod Length (C)	A-B = C (±10cm)	<input type="checkbox"/>	m	Survey Staff
Pull up Speed	14min/M (21sec/25mm)	<input type="checkbox"/>	sec	Stop Watch and Scale
Rod Rotation	≤6rpm	<input type="checkbox"/>	rpm	Stop Watch
Grouting Volume	360 L/min	<input type="checkbox"/>	L/min	Flow Meter for Grout and Chart Record
Grouting Pressure	≥ 30 Mpa	<input type="checkbox"/>	Mpa	High Pressure Pump Gauge
Air Pressure	≥ 0,7 Mpa	<input type="checkbox"/>	Mpa	Meter of Air Compressor
<b>Completion of Jet Grouting</b>				
Remaining Rod Length at Beginning (C)	A-B = C (±10cm)	<input type="checkbox"/>	m	
Jet Grouting Length (D)		<input type="checkbox"/>	m	
Cut Rod (E)		<input type="checkbox"/>	m	Measuring Tape
Remaining Rod Length at Completion (F)	C+D-E =F (±10cm)	<input type="checkbox"/>	m	Survey Staff



**Gambar 4.**  
*Quality Control Checklist*

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

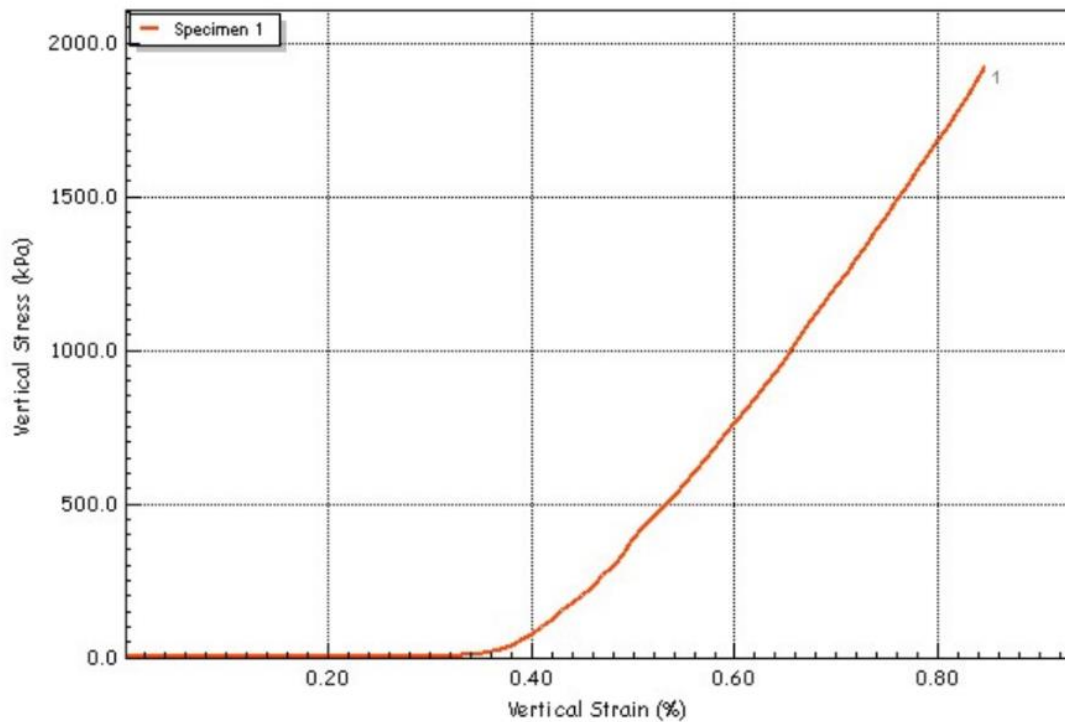
Pekerjaan perbaikan tanah ini berlokasi di Stasiun Sawah Besar, Zona B Proyek CP202, dengan fokus pada stabilisasi lapisan *Alluvial Clay 1* (AC1) yang memiliki  $c_u$  rendah. Proses *Quality Control* merupakan kunci yang dilakukan pada Juli 2024. Untuk mengatasi tantangan  $c_u$  yang rendah dan tuntutan SF galian yang sangat tinggi, tim geoteknik merancang solusi *Ground Improvement* dengan penekanan pada kendali proses yang ketat. Dipilih *Rapid Jet Method* dengan tekanan 30–34 MPa, yang merupakan parameter tertinggi yang dapat dicapai secara ekonomis, untuk memastikan energi jet yang cukup mengatasi konsistensi plastis lapisan AC1 dan mencapai diameter  $\phi$  3,5 m. Kolom *soil-cement* dirancang tumpang tindih secara masif untuk membentuk blok yang tidak hanya meningkatkan kuat geser tetapi juga menciptakan *base seal* yang efektif untuk memitigasi rembesan air tanah. Pemilihan parameter dan konfigurasi ini adalah kontribusi pemikiran teknik yang bertujuan untuk menciptakan jaminan keamanan dan kinerja konstruksi yang maksimal di lingkungan geoteknik Jakarta yang menantang.

Kunci keberhasilan *Jet Grouting* adalah kepatuhan penuh terhadap parameter injeksi yang dirancang. Berdasarkan *Daily Record* pelaksanaan lapangan, tercatat bahwa tim operasional secara konsisten mempertahankan Tekanan Injeksi *Grout* pada rentang 30–34 MPa dan Laju Alir *Grout* 320–360 L/menit. Kepatuhan yang ketat ini menjamin bahwa setiap kolom menerima energi *mixing* dan proporsi semen yang memadai untuk menghasilkan material komposit yang kuat.

Pengujian Kuat Tekan Bebas (UCS) pada sampel inti yang diambil dari lubang uji CH-01 (Sawah Besar Zona B) memvalidasi efektivitas pelaksanaan. Hasil sampel yang diterima, seperti UCT CH-01A ATAS, menunjukkan nilai UCS yang memenuhi atau melampaui kriteria kekuatan minimum yang disyaratkan oleh spesifikasi proyek (*Cohesive Soil*:  $>1$  MPa). Pencapaian nilai UCS yang tinggi ini secara kuantitatif menunjukkan bahwa material *soil-cement* yang dihasilkan telah berhasil mentransformasi lapisan AC1 dari kondisi lunak menjadi material yang kaku dan kuat. Pencapaian kuat tekan yang disyaratkan ini memiliki implikasi langsung pada analisis stabilitas galian. Transformasi AC1 menjadi *soil-cement* dengan kekuatan yang jauh lebih tinggi akan meningkatkan Kuat Geser Tak Terdrainase ( $c_u$ ) efektif secara eksponensial, sehingga Faktor Keamanan (SF) galian terhadap *basal heave* meningkat secara drastis, menuju nilai yang sangat aman yang ditargetkan dalam desain. Dengan demikian, data UCS yang positif menjadi bukti empiris keberhasilan mitigasi risiko geoteknik di lokasi stasiun.

Total Stress Triaxial Compression				
Unconfined Compression				Summary Report
<b>Sample Details</b>  sketch showing specimen location in original sample		<b>Depth</b> Description Type Initial Sample Length H <sub>i</sub> (mm) 116.0 Initial Sample Diameter D <sub>i</sub> (mm) 67.0 Initial Sample Weight W <sub>i</sub> (gr) 736.2 Bulk Density ρ <sub>i</sub> (Mg/m <sup>3</sup> ) 1.80 Particle Density ρ <sub>s</sub> (Mg/m <sup>3</sup> )		
<b>Initial Conditions</b>				
Shearing Rate (/min)	τ %	(%)		0.60
Height To Diameter Ratio		-		1.73
Initial Moisture	ω <sub>i</sub> %	(%)		
Initial Dry Density	ρ <sub>di</sub>	(Mg/m <sup>3</sup> )		
Initial Voids Ratio	e <sub>i</sub>	-		
Initial Degree of Saturation	S <sub>i</sub>	(%)		
<b>Final Conditions</b>				
Unconfined Strength	q <sub>u</sub>	(kPa)		1994.3
Undrained Shear Strength	s <sub>u</sub>	(kPa)		997.1
Maximum Vertical Stress	σ <sub>v,max</sub>	(kPa)		1994.3
Strain At Max Stress	ε <sub>f</sub> %	(%)		0.00
Final Moisture	ω <sub>f</sub> %	(%)		
Final Dry Density	ρ <sub>df</sub>	(Mg/m <sup>3</sup> )		
Final Voids Ratio	e <sub>f</sub>	-		
Final Degree of Saturation	S <sub>f</sub>	(%)		
<b>Notes</b>		 Failure Sketch (surface inclination)		

**Gambar 5.**  
Hasil Tes UCS CH-01A ATAS



**Gambar 6.**  
Grafik Hasil Tes UCS CH-01A ATAS

Hasil dari pelaksanaan metode ini didapatkan sebagai berikut.

1. Validasi Metode R2: Metode *Rapid Jet Grouting (Double-Tube R2)* dengan parameter tekanan tinggi (30–34 MPa) terbukti efektif dalam mentransformasi lapisan *Alluvial Clay 1 (AC1)* yang lunak. Kolom *soil-cement* yang dihasilkan divalidasi oleh hasil akhir UCS Test (ASTM D2166/D2166M-16) pada CH-01, Stasiun Sawah Besar, menunjukkan pencapaian kekuatan di atas nilai minimum desain.
2. Keberhasilan Mitigasi Risiko: Kolom *soil-cement* yang terbentuk sukses berfungsi sebagai elemen pengaku dan penyekat hidrolik (*base seal*), secara efektif meningkatkan faktor keamanan galian menjadi sangat tinggi.

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. *Jet Grouting R2* sebagai Solusi Optimal: *Rapid Jet Grouting* dengan kendali proses yang ketat adalah solusi perbaikan tanah yang optimal dan terbukti andal untuk proyek stasiun bawah tanah di lingkungan tanah aluvial lunak.
2. Pembelajaran Utama - Validasi Kualitas Terpadu: Keberhasilan proyek ini menekankan pentingnya validasi kualitas yang terpadu, di mana pencapaian Kuat Tekan Bebas pada sampel inti harus selalu didukung oleh kepatuhan mutlak terhadap parameter pelaksanaan kritis (Tekanan Jet 30–34 MPa). Ini adalah metode terbaik yang disarankan untuk manajemen risiko geoteknik urban.
3. Kontribusi Keilmuan: Proyek ini memberikan kontribusi keilmuan praktis dengan mendemonstrasikan bahwa, melalui desain parameter yang agresif dan implementasi yang disiplin, risiko kegagalan galian dalam yang disebabkan oleh lapisan lempung lunak dapat secara efektif diminimalkan, menjamin keamanan struktur infrastruktur MRT.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

1. ASTM International. (2022). *ASTM D2166/D2166M-22: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. ASTM International.
2. Darwis, H. (2017). *Dasar-dasar Teknik Perbaikan Tanah*. Pustaka AQ, 1.1, 2-4.
3. Liu, J., Ding, H., & Zhou, Y. (2020). Performance of ground improvement using jet grouting for subway station excavation in highly compressible soil. *Soils and Foundations*, 60(2), 481-495.
4. Li, Y., Wang, M., & Yang, B. (2020). Numerical study on the efficiency of jet grouting columns for deep excavation in soft clay. *Computers and Geotechnics*, 124, 103631.
5. Li, Y., Wang, Z., & Chen, J. (2023). A new criterion for jet grouting column strength evaluation based on unconfined compressive strength tests. *Geotechnical Testing Journal*, 46(2), 20210411.
6. Shimizu – Adhi Karya Joint Venture (2023). Method Statement for Soil Improvement at Station, *Geological Profile Sawah Besar Station*, 6-10, 18
7. Wang, B., Liu, H., & Zhou, J. (2021). A quality evaluation method for jet grouted columns considering construction parameters and soil heterogeneity. *Acta Geotechnica*, 16(3), 859-875.
8. Wu, P., Liu, Y., & Wei, X. (2024). Optimization of Jet Grouting parameters for improving the stability of subway stations in complex strata. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 148, 105809.
9. Zhou, X., Yu, J., & Zhang, C. (2020). Strength and deformation characteristics of cement-treated clay by high-pressure jet grouting method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 133, 106126.