

ANALISIS PERBANDINGAN HASIL UJI KUAT TEKAN SAMPEL TANAH-SEMEN MENGGUNAKAN MOLD UCS SNI DENGAN MOLD UCS FHWA UNTUK PROYEK CEMENT DEEP MIXING (CDM)**Ricko Kurniawan¹, Sugeng Purwanto²**^{1,2}Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Tangerang
Jl. Perintis Kemerdekaan I No. 33, Cikokol, Kec. Tangerang, Kota Tangerang, Provinsi Banten*Co Responden Email: kurniawanrk1000@gmail.com**Abstrak**

Proyek Cement Deep Mixing (CDM) di PIK Jakarta Utara memerlukan evaluasi kuat tekan campuran tanah-semen yang akurat untuk memastikan kualitas perbaikan tanah, dimana perbedaan standar pengujian antara mold UCS SNI (3,8 cm × 7,6 cm) dan mold UCS FHWA (5,0 cm × 10,0 cm) dapat menghasilkan interpretasi parameter desain yang berbeda. Penelitian ini menganalisis karakteristik tanah asli PIK, membandingkan hasil uji kuat tekan kedua mold, mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi perbedaan hasil, dan mengevaluasi implikasinya terhadap desain CDM melalui pengujian karakterisasi tanah asli, pembuatan sampel campuran tanah-semen dengan variasi mold, dan pengujian kuat tekan sesuai standar masing-masing. Hasil penelitian menunjukkan perbedaan signifikan berdasarkan lokasi sampling, dimana area selatan menghasilkan kuat tekan mold SNI 807-1550 kPa dan mold FHWA 575-3704 kPa dengan nilai maksimum 2,4 kali lebih tinggi, sementara area utara menunjukkan mold SNI lebih konsisten (535-677 kPa) sedangkan mold FHWA menghasilkan rentang 955-2447 kPa. Perbedaan ini disebabkan efek skala, distribusi tegangan, heterogenitas campuran, dan karakteristik tanah lokal, dimana volume sampel lebih besar pada mold FHWA menangkap heterogenitas dengan lebih baik namun menghasilkan variabilitas tinggi sehingga memerlukan pendekatan interpretasi khusus dalam penentuan parameter desain dan quality control proyek CDM.

Kata kunci: Cement Deep Mixing, Kuat Tekan, Mold UCS

Abstract

The Cement Deep Mixing (CDM) project in PIK North Jakarta requires accurate compressive strength evaluation of soil-cement mixtures to ensure soil improvement quality, where differences in testing standards between SNI UCS molds (3.8 cm × 7.6 cm) and FHWA UCS molds (5.0 cm × 10.0 cm) can result in different design parameter interpretations. This research analyzes the characteristics of original PIK soil, compares compressive strength test results between both molds, identifies factors influencing result differences, and evaluates their implications for CDM design through original soil characterization testing, soil-cement mixture sample preparation with mold variations, and compressive strength testing according to respective standards. Research results show significant differences based on sampling location, where the southern area produces SNI mold compressive strength of 807-1550 kPa and FHWA mold of 575-3704 kPa with maximum values 2.4 times higher, while the northern area shows more consistent SNI mold results (535-677 kPa) whereas FHWA mold produces a range of 955- 2447 kPa. These differences are caused by scale effects, stress distribution, mixture heterogeneity, and local soil characteristics, where the larger sample volume in FHWA molds better captures mixture heterogeneity but produces higher variability, requiring special interpretation approaches in determining design parameters and quality control for CDM projects.

Keywords: Cement Deep Mixing, Compressive Strength, UCS Mold

I. PENDAHULUAN

Cement Deep Mixing (CDM) merupakan metode perbaikan tanah yang efektif untuk meningkatkan daya dukung dan kestabilan tanah lunak melalui pencampuran in-situ tanah asli dengan bahan pengikat semen (Kitazume &

Terashi, 2013). Metode ini banyak diterapkan pada proyek infrastruktur di Indonesia, khususnya pada kawasan reklamasi seperti Pantai Indah Kapuk (PIK) Jakarta Utara yang memiliki karakteristik tanah lunak dengan kandungan organik tinggi (Porbaha et al., 2000).

Keberhasilan implementasi CDM sangat bergantung pada kualitas campuran tanah-semen, dimana parameter kuat tekan melalui uji Unconfined Compressive Strength (UCS) menjadi indikator utama evaluasi kinerja perlakuan (FHWA, 2013).

Pengujian UCS campuran tanah-semen di Indonesia saat ini menggunakan dua standar berbeda: SNI 03-2812-1992 dengan mold diameter 38 mm dan tinggi 76 mm, serta FHWA-RD-99-138 dengan mold diameter 50 mm dan tinggi 100 mm (FHWA, 2000; BSN, 1992). Mold FHWA memiliki volume 1,73 kali lebih besar dibandingkan mold SNI, meskipun keduanya mempertahankan rasio H/D sebesar 2:1.

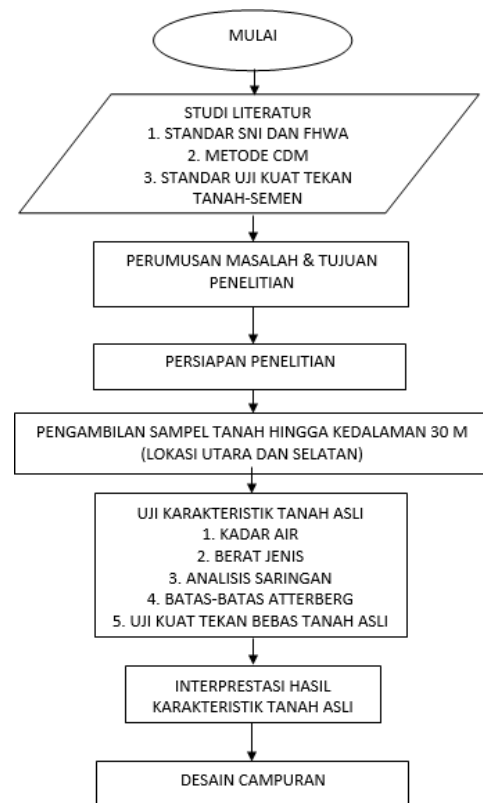
Perbedaan geometri dan volume mold berpotensi mempengaruhi hasil pengujian kuat tekan. Penelitian Consoli et al. (2010) menunjukkan bahwa efek skala pada sampel semen-tanah dapat menyebabkan perbedaan nilai kuat tekan hingga 15-20%, dimana sampel berukuran lebih besar cenderung memberikan nilai kuat tekan yang lebih rendah. Faktor lain yang berpengaruh adalah homogenitas campuran, efektivitas pemadatan, dan proses hidrasi semen yang dapat bervariasi tergantung volume dan geometri sampel (Horpibulsuk et al., 2004; Miura et al., 2001).

Inkonsistensi penggunaan standar pengujian dalam industri konstruksi Indonesia telah menimbulkan permasalahan praktis dimana hasil pengujian dari laboratorium berbeda tidak dapat dibandingkan secara langsung. Dalam pengendalian kualitas proyek CDM berskala besar, seringkali terjadi situasi dimana multiple contractor menggunakan standar pengujian berbeda, sehingga diperlukan faktor konversi yang akurat untuk memastikan konsistensi penilaian kualitas. Ketidakpastian mengenai korelasi hasil pengujian dapat berdampak signifikan pada keputusan desain dan berpotensi menyebabkan pemborosan material atau risiko kegagalan struktur (Larsson et al., 2005).

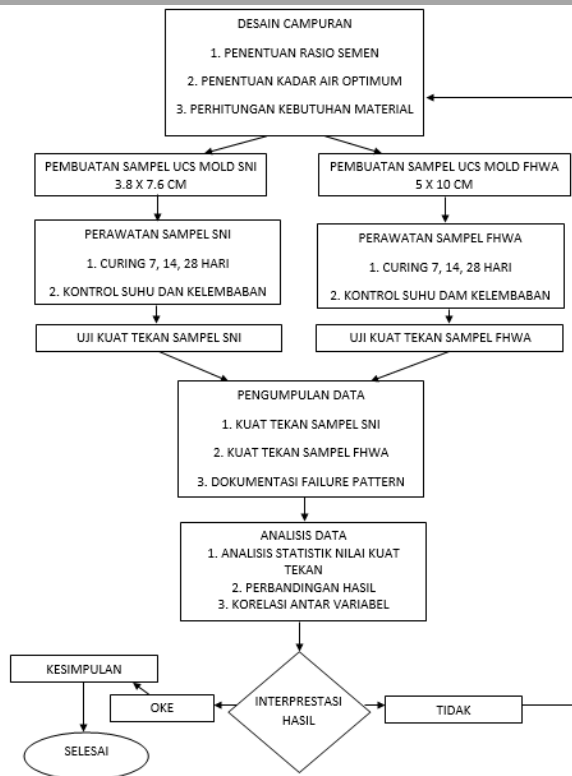
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan hasil uji kuat tekan campuran tanah-semen menggunakan mold UCS SNI dan FHWA dengan tanah dari kawasan PIK Jakarta Utara. Fokus utama adalah

mengkuantifikasi perbedaan nilai kuat tekan yang dihasilkan kedua jenis mold dan mengembangkan faktor koreksi atau persamaan korelasi untuk mengkonversi hasil pengujian antara kedua standar. Hasil penelitian diharapkan dapat meningkatkan konsistensi penilaian kualitas campuran tanah-semen dan berkontribusi pada pengembangan standar pengujian yang lebih komprehensif untuk kondisi tanah Indonesia.

II. METODOLOGI



Gambar 1 Kerangka Penelitian



Gambar 2 Lanjutan Kerangka Penelitian
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan kuantitatif untuk membandingkan hasil uji kuat tekan sampel mixing tanah-semen menggunakan dua jenis mold yang berbeda. Desain penelitian dirancang untuk mengisolasi pengaruh dimensi mold terhadap nilai kuat tekan dengan mengontrol variabel-variabel lain yang dapat mempengaruhi hasil pengujian.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis

3.1.1 Analisis Karakteristik Tanah (Uji Index Properties Tanah)

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium yang telah dilakukan pada sampel tanah dari lokasi proyek PIK Jakarta, diperoleh karakteristik tanah dasar dari empat sampel yang diambil dari dua titik boring yaitu BL-6B dan BL-16A pada kedalaman 3,50-4,00 m dan 7,50-8,00 m. Analisis karakteristik tanah dasar ini menjadi dasar fundamental untuk perencanaan mixing tanah-semen dalam implementasi metode Cement Deep Mixing (CDM).

3.1.1.1 Analisis Karakteristik Tanah BL-6B (Utara)

Dari analisis sampel untuk lokasi BL-6B yang sudah dilakukan di laboratorium mekanika tanah PT. Pratama Widya Engineering didapatkan hasil sebagai berikut:

1) Sampel 1 (BL-6B, 3,50-4,00 m):

Gradasi: Silt 70,00%, Sand 22,00%, Clay 8,00%
Atterberg: LL = 60,00%, PL = 29,24%, PI = 30,76%
Klasifikasi: MH (Inorganic Silt with High Plasticity)
Water Content: 56,03%, Void Ratio: 1,470,
Porosity: 0,595

2) Sampel 2 (BL-6B, 7,50-8,00 m):

Gradasi: Gravel 1,00%, Silt 82,00%, Sand 5,00%,
Clay 12,00%
Atterberg: LL = 65,00%, PL = 23,10%, PI = 41,90%
Klasifikasi: CH (Inorganic Clay with High Plasticity)
Water Content: 89,18%, Void Ratio: 2,333,
Porosity: 0,700

Boring BL-6B menunjukkan peningkatan plastisitas yang signifikan dengan bertambahnya kedalaman. Sampel 2 memiliki karakteristik yang lebih challenging dengan PI tertinggi (41,90%) dan water content tertinggi (89,18%), mengindikasikan kondisi tanah sangat lunak. Peningkatan kandungan clay dari 8,00% menjadi 12,00% dan penurunan sand dari 22,00% menjadi 5,00% menunjukkan transisi ke lapisan yang lebih cohesive.

3.1.1.2 Analisis Karakteristik Boring BL-16A

Dari analisis sampel untuk lokasi BL-16A yang sudah dilakukan di laboratorium mekanika tanah PT. Pratama Widya Engineering didapatkan hasil sebagai berikut:

1) Sampel 3 (BL-16A, 3,50-4,00 m):

Gradasi: Silt 70,00%, Sand 22,00%, Clay 8,00%
Atterberg: LL = 57,00%, PL = 28,28%, PI = 28,72%
Klasifikasi: MH (Inorganic Silt with High Plasticity)
Water Content: 51,24%, Void Ratio: 1,462,
Porosity: 0,594

2) Sampel 4 (BL-16A, 7,50-8,00 m):

Gradasi: Silt 87,00%, Sand 1,00%, Clay 12,00%
Atterberg: LL = 59,00%, PL = 23,29%, PI = 35,71%
Klasifikasi: CH (Inorganic Clay with High Plasticity)
Water Content: 82,57%, Void Ratio: 2,363,
Porosity: 0,703

Boring BL-16A menunjukkan kondisi yang relatif lebih baik dibandingkan BL-6B, terutama pada kedalaman dangkal. Sampel 3 memiliki

water content terendah (51,24%) dan PI terendah (28,72%) diantara semua sampel. Namun, sampel 4 menunjukkan void ratio tertinggi (2,363), mengindikasikan struktur tanah yang sangat porous dan compressible.

3.1.1.3 Analisis Perbandingan Antar Titik Boring

Perbandingan karakteristik antara kedua titik boring menunjukkan variasi lateral yang signifikan:

1. Kedalaman 3,50-4,00 m: BL-16A (Sampel 3) menunjukkan kondisi lebih baik dengan water content dan PI yang lebih rendah dibandingkan BL-6B (Sampel 1)
2. Kedalaman 7,50-8,00 m: BL-6B (Sampel 2) memiliki water content tertinggi, sedangkan BL-16A (Sampel 4) memiliki void ratio tertinggi
3. Konsistensi Gradasi: Kedalaman dangkal memiliki gradasi identik, menunjukkan kontinuitas lateral lapisan
4. Variasi Plastisitas: Range PI dari 28,72% hingga 41,90% mengindikasikan heterogenitas sifat plastisitas

3.1.1.4 Analisis Sifat Fisik dan Kondisi Natural

Parameter fisik menunjukkan karakteristik yang konsisten namun dengan variasi signifikan:

1. Specific Gravity: Konsisten 2,600-2,631, mengindikasikan komposisi mineral homogen
2. Dry Density: Tertinggi pada Sampel 1 (1,065 t/m³), terendah pada Sampel 4 (0,779 t/m³)
3. Degree of Saturation: Hampir jenuh pada semua sampel (91,11-100,00%)

Kondisi natural state menunjukkan tantangan konstruksi yang signifikan, dengan water content tinggi, void ratio besar, dan degree of saturation hampir penuh. Sampel 2 dan 4 pada kedalaman lebih dalam menunjukkan kondisi yang lebih ekstrem.

3.1.1.5 Implikasi terhadap Design CDM

Berdasarkan analisis per titik boring, strategi CDM harus disesuaikan dengan kondisi spesifik lokasi:

1. Area BL-6B: Memerlukan cement factor lebih tinggi pada kedalaman 7,50-8,00 m akibat PI dan water content tertinggi
2. Area BL-16A: Kondisi relatif lebih favorable pada kedalaman dangkal, namun

memerlukan perhatian khusus pada void ratio tinggi di kedalaman 7,50-8,00 m

3. Variasi Lateral: Perbedaan karakteristik antar titik mengindikasikan perlunya sampling density yang lebih tinggi untuk design yang optimal

Heterogenitas karakteristik tanah antar titik boring menunjukkan pentingnya site-specific design dalam implementasi CDM, dimana setiap area memiliki requirement cement factor dan prosedur mixing yang berbeda untuk mencapai target kuat tekan yang diinginkan.

3.1.2 Analisis Uji Kuat Tekan Tanah Asli dengan Mold SNI

Dari pengujian kuat tekan bebas yang sudah dilakukan di laboratorium mekanika tanah PT

Lokasi Utara (BL-6B):

1. Kedalaman 3,50-4,00 m: undisturbed 0,047 kg/cm², remolded 0,041 kg/cm²
2. Kedalaman 7,50-8,00 m: undisturbed 0,036 kg/cm², remolded 0,019 kg/cm²

Lokasi Selatan (BL-16A):

1. Kedalaman 3,50-4,00 m: undisturbed 0,069 kg/cm², remolded 0,034 kg/cm²
2. Kedalaman 7,50-8,00 m: undisturbed 0,032 kg/cm², remolded 0,071 kg/cm²

Hasil menunjukkan bahwa kondisi sampel (undisturbed vs remolded), lokasi, dan kedalaman secara signifikan mempengaruhi nilai kuat tekan tanah, dengan pola yang tidak konsisten antara kedua lokasi. Hal ini mengindikasikan heterogenitas kondisi tanah di area proyek PIK Jakarta Utara.

3.1.3 Analisis Komposisi Mix Design Tanah-Semen

Mix design campuran tanah-semen dirancang berdasarkan karakteristik tanah PIK Jakarta pada kedalaman 6.45-9.00 m (SPT 0-2) yang berupa high plasticity clay/silt dengan water content tinggi, dengan target kuat tekan minimum 5 kg/cm² sesuai spesifikasi CDM.

Berdasarkan teori Porbaha (2000) dan Kitazume & Terashi (2013), rasio optimal semen dihitung menggunakan formula:

$$\alpha w = (W/100\%) \times (LL/PL)$$

Untuk tanah PIK Jakarta:

$$\alpha w = (70/100\%) \times (60/26) = 1.62$$

Equivalent cement factor yang diperlukan:

$$\text{Cement factor} = 1.5 \times \alpha w \times 100$$

$$= 1.5 \times 1.62 \times 100$$

$$= 243 \text{ kg/m}^3$$

Penelitian ini menggunakan tiga variasi kadar semen yaitu 200 kg/m³ (binder minimal), 250 kg/m³ (mendekati rasio optimal), dan 300 kg/m³ (binder maksimal) dengan faktor air-semen konstan 1.0 untuk mengoptimalkan workability sambil mempertahankan kuat tekan yang memadai dan efisiensi biaya.

Tabel 1 Binder Weight Cement

Area	Type of soil	Binder	Volume Mix (m ³)	Binder weight (kg/m ³)	w/c
a	b	c	d	e	f
Utara BL-6B	Clay (SPT 0) Depth 2.45-9 m	Cement	1	200	1
			1	250	1
			1	300	1
Selatan BL-16A	Clay (SPT 0) Depth 2.45-9 m	Cement	1	200	1
			1	250	1
			1	300	1

3.1.4 Analisis Volume Sampling

Dari hasil Mix design didapat binder weight yang digunakan yaitu 200, 250, dan 300 kg/m³, dengan hasil tersebut kita dapat memperhitungkan jumlah volume ratio yang dibutuhkan pada tiap mold.

Berdasarkan perhitungan Tabel 2 dan 3, binder yang digunakan adalah 200, 250, dan 300 kg/m³, dengan water/cement 1:1 dengan volume ratio 1 m³ yaitu 26,95% untuk campuran dosis 200 kg/m³, 32,94% untuk campuran dosis 250 kg/m³, dan 39,52% untuk campuran dosis 300 kg/m³.

Tabel 2 Mix Proportion Mold SNI

Area	Type of soil	Binder weight (kg/m ³)	Mix Proportion			W cement slurry (kg)
			Wsoil (kg)	Wb (kg)	Ww (kg)	
Utara BL-6B	Clay (depth 6.45-9 m)	200	0.871	0.115	0.115	0.151
		250	0.828	0.136	0.136	0.179
		300	0.789	0.156	0.156	0.205
Selatan BL-16A	Clay (depth 6.45-9 m)	200	0.871	0.115	0.115	0.151
		250	0.828	0.136	0.136	0.179
		300	0.789	0.156	0.156	0.205
Total			4.975	0.813	0.813	1.071

Mix proportion yang digunakan berdasarkan Tabel 4, jumlah total sampel per dosis untuk setiap lokasi yaitu 27 sampel, dengan 2 sampel untuk masing-masing umur curing (7, 14, dan 28 hari) dan 1 sampel spare. Dimana volume mix untuk 1 campuran dosis adalah 0,00072 m³

Tabel 3 Mix Proportion Mold FHWA

Area	Type of soil	Binder weight (kg/m ³)	Mix Proportion			W cement slurry (kg)
			Wsoil (kg)	Wb (kg)	Ww (kg)	
Utara BL-6B	Clay (depth 6.45-9 m)	200	1.984	0.287	0.287	0.378
		250	1.886	0.341	0.341	0.450
		300	1.797	0.390	0.390	0.514
Selatan BL-16A	Clay (depth 6.45-9 m)	200	1.984	0.287	0.287	0.378
		250	1.886	0.341	0.341	0.450
		300	1.797	0.390	0.390	0.514
Total			11.337	2.037	2.037	2.636

Berdasarkan Tabel 5 dan 6, hasil perhitungan mold FHWA memiliki hasil perhitungan yang sama dengan mold SNI seperti binder yang digunakan adalah 200, 250, dan 300 kg/m³, dengan water/cement 1:1, serta volume mix 1 m³ untuk menghitung volume ratio lalu didapatkan, 26,95% untuk campuran dosis 200 kg/m³, 32,94% untuk campuran dosis 250 kg/m³, dan 39,52% untuk campuran dosis 300 kg/m³.

Pada Tabel 7 yaitu Mix proportion yang digunakan, jumlah total sampel per dosis untuk setiap lokasi yaitu 7 sampel, dengan 2 sampel untuk masing-masing umur curing (7, 14, dan 28 hari) dan 1 sampel spare. Jumlah yang sama seperti total sampel mold SNI, namun berbeda di bagian perhitungan volume mix untuk 1 campuran dosis berbeda dengan Mold SNI dengan mold FHWA yaitu 0,00165 m³ dan untuk mix proportion yang digunakan menambahkan spare 1.1 untuk tumpahan sampel.

3.1.5 Hasil Pengujian Kuat Tekan Bebas Sampel Area Selatan dan Utara

Tabel 8 Hasil Uji Kuat Tekan Area Selatan

Soil Sample	Cement Mix (kg/m ³)	Mold UCS			Mold FHWA		
		Kuat tekan (kPa)			Kuat tekan (kPa)		
		7 hari	14 hari	28 hari	7 hari	14 hari	28 hari
SELATAN (N value 2)	Original Soil	3.14	3.14	3.14	6.77	6.77	6.77
	200	509.95	787.47	930.65	375.59	280.47	574.67
	250	1067.94	1071.87	940.46	442.28	469.74	943.40
	300	431.49	698.23	1233.68	1056.18	704.12	1217.99
	350	757.07	1102.27	1364.11	1634.77	1858.36	1397.45
	400	476.60	706.08	1509.24	2629.16	2631.12	1982.90
450	679.60	1071.87	1550.43	3277.38	4565.00	3703.97	

Tabel 9 Hasil Uji Kuat Tekan Area Utara

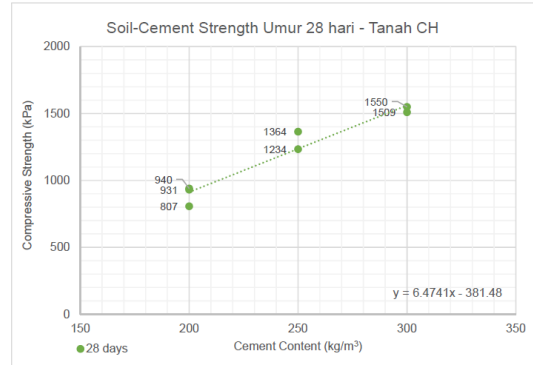
Soil Sample	Cement Mix (kg/m ³)	Mold UCS			Mold FHWA		
		Kuat tekan (kPa)			Kuat tekan (kPa)		
		7 hari	14 hari	28 hari	7 hari	14 hari	28 hari
UTARA (N value 2)	Original Soil	3.53	3.53	3.53	4.61	4.61	4.61
	200	390.30	411.88	527.60	399.13	509.95	177.50
	250	417.76	546.23	535.44	936.54	887.50	955.17
	300	558.98	460.91	559.96	2942.00	1033.62	1603.39
	350	413.84	801.20	1381.76	1217.01	1264.08	1030.68
	400	428.55	476.60	543.29	1920.14	1401.37	2446.76
450	177.50	424.63	676.66	2142.75	3736.33	1280.75	

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan pada sampel Sisi Selatan dan Utara, terdapat perbedaan hasil antara sampel yang menggunakan mold UCS dan mold FHWA, hal ini disebabkan karena perbedaan sifat sampel tanah.

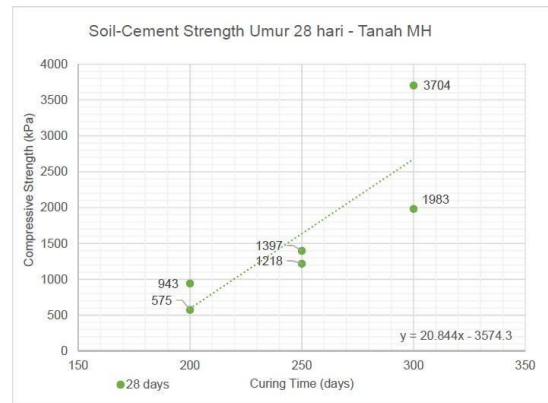
- Untuk sampel mold SNI menggunakan sampel dari kedalaman 7 - 9 m adalah tanah Silty Clay (CH)
- Untuk sampel mold FHWA menggunakan sampel dari kedalaman 3 - 6 m adalah tanah Sandy Silt (MH)

Meskipun memiliki nilai SPT yang sama (SPT 2), namun perbedaan jenis tanah dapat bereaksi terhadap semen secara berbeda.

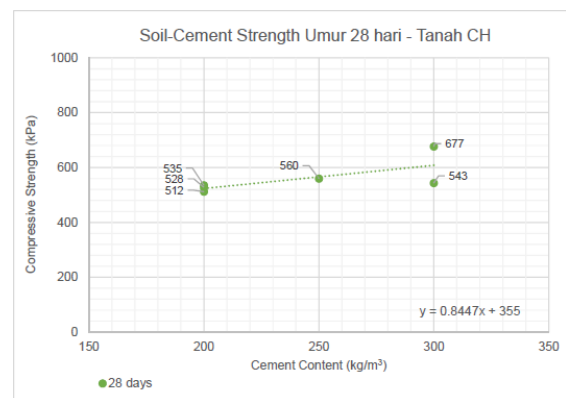
Sebagai pertimbangan desain CDM dilapangan, banyaknya kadar semen yang dipakai dapat ditentukan dengan korelasi grafis terhadap kuat tekan tanah-semen pada umur 28 hari. Grafik berikut merujuk pada tanah SPT 2 dengan jenis CH dan MH.



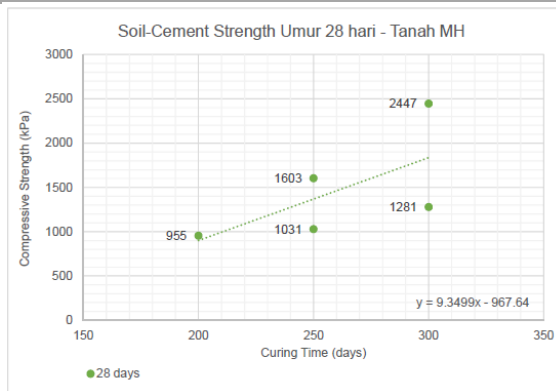
Gambar 3 Grafik UCS Mold SNI vs kadar semen umur 28 hari Area Selatan – Tanah CH



Gambar 4 Grafik UCS Mold FHWA vs kadar semen umur 28 Hari Area Selatan – Tanah MH



Gambar 5 Grafik UCS Mold SNI vs kadar semen umur 28 hari Area Utara – Tanah CH



Gambar 6 Grafik UCS Mold FHWA vs kadar semen umur 28 Hari Area Utara – Tanah MH

Dari kedua area tersebut menunjukkan adanya hubungan linear positif yang kuat antara kadar semen dan kekuatan tekan tanah. Semakin tinggi kadar semen yang ditambahkan, semakin tinggi pula kekuatan tekan yang dihasilkan.

3.1.6 Pengaruh Dimensi Mold dan Jenis Tanah Terhadap Kuat Tekan

Perbedaan dimensi antara mold UCS SNI (3,8 cm × 7,6 cm) dan mold UCS FHWA (5,0 cm × 10,0 cm) menghasilkan rasio tinggi terhadap diameter yang berbeda. Mold SNI memiliki rasio H/D = 2,0, sedangkan mold FHWA juga memiliki rasio H/D = 2,0. Meskipun rasio ini sama, perbedaan volume dan diameter memberikan pengaruh signifikan terhadap distribusi tegangan dalam sampel selama pengujian kuat tekan.

Pengujian dilakukan pada dua area berbeda dalam proyek CDM di PIK Jakarta Utara:

1. Area Selatan: Mewakili zona dengan karakteristik tanah yang relatif lebih stabil
2. Area Utara: Mewakili zona dengan kondisi tanah yang berbeda, kemungkinan dipengaruhi oleh variasi stratigrafi lokal

Pada rasio H/D yang sama (2,0) untuk kedua mold, perbedaan utama terletak pada volume dan diameter sampel. Mold yang lebih kecil (SNI) menghasilkan efek confinement yang lebih besar pada sampel karena pengaruh gesekan dinding yang lebih dominan relatif terhadap volume sampel. Sebaliknya, mold yang lebih besar (FHWA) memberikan representasi yang lebih baik terhadap heterogenitas material karena volume yang lebih besar dapat menampung lebih banyak variasi dalam struktur tanah-semen.

Dengan menggunakan tanah CH sebagai representasi mold SNI dan tanah MH sebagai representasi mold FHWA, dapat diamati perbedaan respons yang signifikan antara area selatan dan utara:

Mold SNI (Tanah CH - 3,8 cm × 7,6 cm):

1. Area Selatan: Range kuat tekan 807-1550 kPa
2. Area Utara: Range kuat tekan 535-677 kPa.

Dari kuat tekan tersebut cenderung memberikan hasil yang lebih stabil dengan variabilitas lebih rendah dan memiliki perbedaan sensitivitas antar area mencapai 7,7 kali

Mold FHWA (Tanah MH - 5,0 cm × 10,0 cm):

1. Area Selatan: Range kuat tekan 575-3704 kPa
2. Area Utara: Range kuat tekan 955-2447 kPa,

Menunjukkan variabilitas yang lebih tinggi dengan range nilai yang lebih lebar dan perbedaan sensitivitas antar area mencapai 2,2 kali.

1. Sampel Tanah CH (High Plasticity Clay) - Mold SNI

Pada sampel tanah CH yang diuji menggunakan mold SNI (3,8 cm × 7,6 cm), analisis data menunjukkan perbedaan karakteristik yang signifikan antara kedua area:

Area Selatan:

- a. Kuat tekan berkisar 807-1550 kPa dengan tren linier $y = 6.4741x - 361.48$
- b. Menunjukkan sensitivitas yang baik terhadap peningkatan kadar semen
- c. Karakteristik tanah CH di area ini memberikan respons yang konsisten terhadap penambahan semen
- d. Gradient yang positif mengindikasikan efektivitas mixing yang baik

Area Utara:

- a. Kuat tekan berkisar 535-677 kPa dengan tren linier $y = 0.8447x + 355$
- b. Menunjukkan sensitivitas yang jauh lebih rendah dibandingkan area selatan
- c. Intercept yang tinggi (355) mengindikasikan kekuatan dasar tanah yang relatif baik
- d. Gradient yang rendah menunjukkan efisiensi semen yang terbatas di area ini

2. Sampel Tanah MH (High Plasticity Silt) - Mold FHWA

Sampel tanah MH yang diuji menggunakan mold FHWA (5,0 cm × 10,0 cm) menunjukkan karakteristik yang berbeda dengan pola variasi yang lebih ekstrem antar area:

Area Selatan:

- Kuat tekan berkisar 575-3704 kPa dengan tren linier $y = 20.944x - 3574.3$
- Menunjukkan sensitivitas yang sangat tinggi terhadap kadar semen (slope tertinggi dari semua kondisi)
- Intercept negatif yang besar (-3574.3) mengindikasikan kebutuhan kadar semen minimum yang tinggi
- Karakteristik tanah MH di area ini sangat responsif terhadap treatment semen
- Range kuat tekan yang sangat lebar menunjukkan potensi tinggi namun dengan variabilitas besar

Area Utara:

- Kuat tekan berkisar 955-2447 kPa dengan tren linier $y = 9.3499x - 967.64$
- Sensitivitas sedang dengan nilai intercept negatif yang signifikan (-967.64)
- Menunjukkan konsistensi yang lebih baik dibandingkan area selatan
- Kekuatan minimum yang lebih tinggi (955 kPa) mengindikasikan kondisi dasar tanah yang lebih baik

Karakteristik tanah MH dengan mold FHWA yang lebih besar memberikan respons yang lebih sensitif terhadap perubahan kadar semen, dengan variabilitas yang tinggi antar lokasi, mencerminkan heterogenitas alami tanah silt plastisitas tinggi.

3.2 Pembahasan

3.2.1 Perbandingan Nilai Kuat Tekan Beton

Perbandingan nilai kuat tekan antara mold SNI (3,8 cm × 7,6 cm) dengan sampel tanah CH dan mold FHWA (5,0 cm × 10,0 cm) dengan sampel tanah MH menunjukkan perbedaan yang signifikan. Hasil pengujian mengindikasikan bahwa perbedaan dimensi mold memberikan pengaruh yang kompleks terhadap kuat tekan campuran tanah-semen.

- Area Selatan:** Mold SNI (tanah CH) menghasilkan kuat tekan dalam rentang 807-1550 kPa, sementara mold FHWA (tanah MH) menghasilkan rentang yang lebih lebar yaitu 575-3704 kPa. Meskipun nilai minimum mold FHWA lebih rendah, nilai maksimumnya mencapai 2,4 kali lebih tinggi dibandingkan mold SNI. Hal ini mengindikasikan bahwa volume sampel yang lebih besar pada mold FHWA mampu menangkap heterogenitas campuran dengan lebih baik, termasuk zona dengan kekuatan tinggi yang mungkin tidak tertangkap dalam sampel bervolume kecil.
- Area Utara:** Kontras dengan area selatan, area utara menunjukkan pola yang berbeda. Mold SNI memberikan hasil yang lebih konsisten dalam rentang 535-677 kPa, sedangkan mold FHWA menghasilkan rentang 955-2447 kPa dengan nilai minimum yang lebih tinggi dari maksimum mold SNI. Perbedaan ini menunjukkan bahwa karakteristik tanah lokal sangat mempengaruhi performa relatif antara kedua jenis mold.

Dari perspektif mekanika material, perbedaan hasil ini dapat dijelaskan melalui teori efek skala (scale effect) dan stress distribution. Mold dengan volume lebih besar (FHWA) memiliki kemungkinan lebih tinggi untuk mengandung defek atau zona lemah, namun dalam kasus soil-cement, heterogenitas campuran dapat menghasilkan zona dengan

kekuatan tinggi yang mengkompensasi kelemahan tersebut.

3.2.2 Implikasi terhadap Design dan Konstruksi CDM

Dalam konteks kontrol kualitas lapangan, penggunaan mold yang tepat di setiap tahap konstruksi sangat penting untuk keberhasilan stabilisasi tanah. Pada tahap pra-konstruksi, disarankan menggunakan mold FHWA untuk verifikasi *mix design* yang lebih representatif terhadap kondisi lapangan. Selama pelaksanaan konstruksi, sebaiknya menggunakan kombinasi mold SNI untuk monitoring harian yang cepat dan mold FHWA untuk kontrol kualitas yang mendalam. Setelah konstruksi selesai, diperlukan evaluasi melalui korelasi hasil laboratorium dengan uji beban lapangan.

Dari sisi produktivitas, mold SNI unggul dalam kecepatan dan kemudahan pengujian untuk monitoring real-time, sedangkan mold FHWA menawarkan hasil yang lebih akurat dan representatif untuk quality assurance dan pengambilan keputusan teknis.

3.2.3 Rekomendasi Penggunaan

Tabel 10 Rekomendasi Penggunaan Mold

Kondisi / Kebutuhan	Gunakan Mold SNI	Gunakan Mold FHWA
Hasil pengujian cepat dan konsisten	√	
Kondisi tanah relatif homogen	√	
Budget terbatas dan volume sampel besar	√	
Monitoring tren kekuatan untuk sistem peringatan dini (early warning)	√	
Investigasi awal dan screening berbagai mix design	√	
Representativitas tinggi terhadap kondisi lapangan		√
Proyek di area dengan heterogenitas tanah tinggi		√
Verifikasi final mix design sebelum konstruksi berskala penuh		√
Quality assurance untuk proyek berkriteria kekuatan tinggi		√
Korelasi dengan performa kolom CDM di lapangan		√

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan terhadap perbandingan hasil uji kuat tekan sampel mixing tanah-semen menggunakan mold UCS SNI dengan mold UCS FHWA untuk proyek Cement Deep Mixing (CDM) di PIK Jakarta Utara, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakteristik Tanah Asli PIK Jakarta Utara:

Komposisi: Didominasi silt (70-87%) dengan kandungan sand (1-22%) dan clay (8-12%).

Sifat Plastisitas: Liquid Limit 57-65%, Plastic Limit 23,10-29,24%, Plasticity Index 28,72-41,90%. Klasifikasi tanah MH-CH (silt hingga clay dengan plastisitas tinggi).

Kondisi Natural: Kadar air sangat tinggi (51,24-89,18%), degree of saturation mendekati jenuh (91,11-100%), wet density 1,422-1,662 ton/m³, dry density rendah (0,779-1,065 ton/m³), void ratio tinggi (1,462-2,363).

Tanah di PIK Jakarta Utara menunjukkan karakteristik khas wilayah pantai utara Jakarta berupa tanah lunak dengan kadar air tinggi, plastisitas signifikan, dan daya dukung rendah, sehingga memerlukan perbaikan tanah untuk mendukung konstruksi.

2. Dari hasil uji kuat tekan menunjukkan bahwa Area Selatan Mold FHWA menghasilkan rentang yang lebih lebar (575-3704 kPa) dibandingkan mold SNI (807-1550 kPa). Nilai maksimum mold FHWA mencapai 2,4 kali lebih tinggi dari mold SNI, namun nilai minimumnya lebih rendah.

Area Utara memiliki Pola berbeda dimana mold SNI memberikan hasil lebih konsisten (535-677 kPa), sementara mold FHWA menghasilkan rentang 955-2447 kPa dengan nilai minimum yang lebih tinggi dari maksimum mold SNI.

Dari kedua jenis mold tersebut terlihat perbedaan hasil yang cukup signifikan walau dengan alat uji kuat tekan yang berbeda, perbedaan volume sampel lebih berpengaruh pada hasil Uji kuat tekan.

Volume sampel yang lebih besar pada mold FHWA mampu menangkap heterogenitas campuran dengan lebih baik, menghasilkan zona dengan kekuatan tinggi yang mengkompensasi zona lemah, namun juga meningkatkan variabilitas hasil secara signifikan dibanding mold SNI.

3. Analisis mendalam terhadap variabilitas hasil menunjukkan perbedaan yang mencolok dalam konsistensi pengujian antara kedua jenis mold:

Variabilitas Hasil Berdasarkan Mold dan Area:
Mold SNI (Tanah CH): Area Selatan memiliki koefisien variasi sedang dengan range 743 kPa, sedangkan Area Utara menunjukkan variabilitas rendah dengan range hanya 142 kPa

Mold FHWA (Tanah MH): Area Selatan memiliki variabilitas sangat tinggi dengan range 3129 kPa, dan Area Utara menunjukkan variabilitas sedang dengan range 1492 kPa.

4. Perbedaan hasil uji kuat tekan antara mold SNI dan FHWA memberikan implikasi signifikan terhadap desain dan pelaksanaan proyek CDM di PIK Jakarta **Utara**. Pada aspek desain, mold SNI dengan konsistensi tinggi memungkinkan penggunaan nilai rata-rata sebagai parameter desain dengan faktor keamanan $SF = 1,2-1,3$, sedangkan mold FHWA dengan variabilitas tinggi memerlukan analisis probabilistik dengan $SF = 1,5-1,8$. Perbedaan pola kuat tekan antara area utara dan selatan mengharuskan zonasi desain, dimana area selatan memerlukan pendekatan konservatif dengan margin keamanan tinggi, sementara area utara memungkinkan desain yang lebih efisien.

V. DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, J.E. (2020). *Foundation Analysis and Design*. 6th Edition. McGraw-Hill Education, New York.
- Craig, R.F. (2019). *Craig's Soil Mechanics*. 9th Edition. Taylor & Francis Group, London.
- Das, B.M. (2021). *Principles of Foundation Engineering*. 9th Edition. Cengage Learning, Boston.
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., & Sheahan, T.C. (2018). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. 2nd Edition. Pearson Education, New Jersey.
- Pratama, A. (2022). "Analisis Kuat Tekan Campuran Tanah Lempung-Semen untuk Stabilisasi Tanah di Proyek Jalan Tol Jakarta-Cikampek." Skripsi. Jurusan Teknik Sipil, Universitas Indonesia, Depok.
- Kitazume, M., & Terashi, M. (2013). "The Deep Mixing Method." *CRC Press, Taylor & Francis Group. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(10), 1713-1725.
- Larsson, S., Stille, H., & Olsson, L. (2005). "On horizontal variability in lime cement FHWA. (2013). *Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support*. FHWA-HRT-13-046. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Available at: <https://highways.dot.gov/research/publications/infrastructure/FHWAHRT-13-046> [Accessed: 15 Oktober 2024]
- BSN. (2008). *SNI 1964-2008: Cara Uji Kuat Tekan Bebas Tanah Kohesif*. Badan Standardisasi Nasional Indonesia, Jakarta.
- BSN. (2008). *SNI 1965-2008: Cara Uji Penentuan Kadar Air untuk Tanah dan Batuan di Laboratorium*. Badan Standardisasi Nasional Indonesia, Jakarta.
- BSN. (2008). *SNI 1966-2008: Cara Uji Penentuan Berat Jenis Tanah*. Badan Standardisasi Nasional Indonesia, Jakarta.
- BSN. (2008). *SNI 1967-2008: Cara Uji Penentuan Batas Cair Tanah*. Badan Standardisasi Nasional Indonesia, Jakarta.
- BSN. (2008). *SNI 1968-2008: Cara Uji Penentuan Batas Plastis dan Indeks Plastisitas Tanah*. Badan Standardisasi Nasional Indonesia, Jakarta.
- BSN. (2008). *SNI 3423-2008: Cara Uji Analisis Ukuran Butiran Tanah*. Badan Standardisasi Nasional Indonesia, Jakarta