

SISTEM PONDASI TIANG BOR YANG RAMAH LINGKUNGAN

Suwarno^{1*}, Luthfi Amri Wicaksono^{2**}

¹Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Jawa Timur

*Email: suwarno.surabaya@gmail.com

²Jurusan Teknik Sipil, Universitas Jember, Jember, Jawa Timur

**Email: luthfiamri.teknik@unej.ac.id

Abstrak

Pondasi tiang bor umumnya dilakukan dengan cara pengeboran basah (*wash boring*) sehingga terjadi buangan tanah yang bercampur air dan mengotori lingkungan. Full Displacement Column (FDC) diperkenalkan oleh BAUER, dimana pengeboran tidak mengeluarkan tanah dari lubang bor sehingga tidak ada material tanah galian yang perlu dibuang. Analisis dilakukan berdasarkan data penyelidikan tanah bor dalam, nilai uji standar penetrasi (N-SPT), dan pengujian laboratorium. Perhitungan desain dilakukan dengan memperhitungkan konsep dan mekanisme perkuatan FDC untuk mengurangi kompresibilitas tanah, meningkatkan daya dukung, menaikkan stabilitas lereng, dan menurunkan potensi likuifaksi. Metode FDC sama seperti *deep soil mixing cement* atau *vibro stone/concrete column*, yang memberikan material penguat (*cement grout/ mortar/ beton*) akan menerima beban bersama dan sifat komposit terbentuk melalui distribusi pembebanan antara tanah dan kolom *cement grout/mortar/beton* sekitarnya. Pembagian konsentrasi tegangan tersebut dilakukan dengan pemasangan *Loading Transfer Platform (LTP)* berupa lapisan granular padat dengan ketebalan bervariasi antara 60 cm hingga 100 cm. Dengan adanya LTP, tegangan akibat beban luar, beban perkerasan dan beban kendaraan, akan terdistribusi pada kolom-kolom FDC dan tanah sekitarnya secara proporsional sesuai dengan kekakuannya. Sebagai contoh, perencanaan FDC pada timbunan rel kereta api dengan beban 50 kPa adalah diameter FDC = 0,42 m, spasi = 2,0 m c/c square grid spacing, settlement = 88,67 mm post construction (< 100mm). Sedangkan FDC pada stockyard dengan beban 90 kPa : Opsi 1 (max settlement 100 mm) adalah diameter FDC = 0,42 m, spasi = 1,7 m c/c square grid spacing, settlement = 83,48 mm post construction (< 100 mm). Untuk opsi 2 (max settlement 200 mm) adalah diameter FDC = 0,42m, spasi = 2,7 m c/c square grid spacing, settlement = 187 mm post construction (< 200 mm).

Kata kunci: BAUER, full displacement column, loading transfer platform, pondasi bor, tanah lunak

PENDAHULUAN

Sistem pondasi tiang bor ramah lingkungan yang diperkenalkan disini adalah sistem Full Displacement Column (FDC). Metoda ini diperkenalkan oleh BAUER. Full Displacement Column diartikan "Kolom Perpindahan Penuh" dilakukan dengan membuat lobang bor dengan cara melakukan penetrasi lapisan tanah tanpa mengeluarkan tanah terbor ke permukaan. Setelah mata bornya mencapai kedalaman yang direncanakan, pengisian material penguat berupa *cement grout/mortar/beton* dilakukan melalui ujung alat tersebut. Efek dari kombinasi densifikasi akibat proses pengeboran dan penguatan tanah menggunakan material *grout* akan meningkatkan modulus kekakuan pada tanah lunak. Metode ini sangat ideal diaplikasikan pada berbagai jenis tanah, mulai tanah kerikil berpasir (*sandy gravel*), pasir, lanau, dan lempung hingga pada tanah organik yang lunak (*soft organic soil*) selama tanah tersebut masih dapat dipindahkan/dimampatkan.

Keunggulan metode FDC, diantaranya adalah sebagai berikut :

- 1) Peningkatan friksi selubung kolom dan ketahanan ujung karena adanya pemadatan
- 2) Desain yang ekonomis (kolom yang lebih pendek, diameter dan konsumsi mortar/beton yang digunakan)
- 3) Bebas getaran / vibrasi saat proses instalasi
- 4) Kinerja harian yang tinggi
- 5) Buangan tanah yang minimalis.

Perbaikan tanah dilakukan untuk meningkatkan karakteristik tanah hingga menjadi sesuai dengan spesifikasi yang disyaratkan dalam sebuah pekerjaan, misalnya :

- 1) Peningkatan kepadatan
- 2) Peningkatan kuat geser tanah
- 3) Peningkatan stabilitas tanah
- 4) Pengurangan kompresibilitas tanah

- 5) Pengurangan permeabilitas
- 6) Percepatan konsolidasi
- 7) Peningkatan daya dukung tanah

METODOLOGI

Metoda Full Displacement Column (FDC) mengikuti persyaratan teknis pelaksanaan yang umum digunakan, yaitu :

- (a). Pelaksanaan pengeboran dan penguatan diharapkan dapat dilaksanakan sekaligus dalam 1 tahap bersamaan. Pengisian material penguat harus dilaksanakan pada saat proses pencabutan mata bor auger berlangsung.
- (b). Limbah dan debu yang ditimbulkan dari proses pelaksanaan harus seminimal mungkin
- (c). Gangguan terhadap tanah dasar harus seminimal mungkin
- (d). Tingkat vibrasi dan kebisingan harus seminimal mungkin
- (e). Tidak mengubah sifat dari tanah asal/asli menjadi lebih buruk
- (f). Tidak menimbulkan efek samping yang dapat merusak struktur di sekitarnya

Metode FDC sama seperti deep soil mixing atau soil cement column (kolom tanah bersemen), vibro stone/concrete column. Teknik inklusi tersebut bertujuan membuat tanah dan material tambahan menjadi massa komposit. Massa komposit FDC berupa tanah dan material penguat (cement grout/ mortar/ beton) akan berperilaku sebagai sistem yang menerima beban bersama. Sifat komposit ini terbentuk melalui distribusi pembebanan dengan pembagian konsentrasi tegangan antara tanah dan kolom cement grout/mortar/beton sekitarnya. Pembagian konsentrasi tegangan tersebut dilakukan dengan pemasangan *Loading Transfer Platform (LTP)* berupa lapisan granular padat dengan ketebalan yang bervariasi antara 60 cm hingga 100 cm. Dengan adanya LTP, tegangan akibat beban luar berupa beban perkerasan dan beban kendaraan akan terdistribusi pada kolom-kolom FDC dan tanah sekitarnya secara proporsional sesuai dengan kekakuannya. Konsep FDC ditunjukkan dalam Gambar 1, dan pelaksanaan di lapangan ditunjukkan dalam Gambar 2.

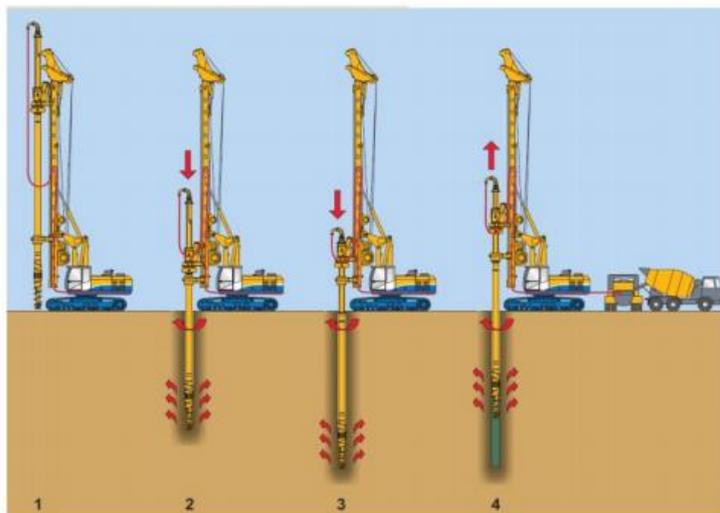


Gambar 1. Konsep FDC (Full Displacement Column)



Gambar 2. Pelaksanaan lapangan FDC (Full Displacement Column) BAUER

Proses instalasi FDC dilakukan dengan cara membuat lobang dengan displacement boring tool yang terdapat pada rotary drilling rig yang diborokan kedalam lapisan tanah kemudian diikuti dengan pengisian material penguat bersamaan dengan proses penarikan displacement boring tool seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Proses Instalasi FDC – BAUER

Tahap 1: Setting dan Positioning Displacement boring tool dipasang pada mesin bor yang dilengkapi dengan sebuah selang pemasok material penguat dan selang-selang hidrolik lainnya yang disambungkan pada extension pipe di posisi ujung atasnya (head section). Setiap mesin bor dilengkapi dengan monitor dan digital recording computer untuk memonitor, mengolah dan menyimpan data-data pada proses instalasi FDC seperti besarnya penetrasi terhadap waktu dan kedalaman. Detail setting out dilaksanakan oleh surveyor, operator mesin bor harus menempatkan posisi displacement boring tool tepat pada koordinat yang telah ditentukan.

Tahap 2: Proses Penetrasi Setelah displacement boring tool tepat pada posisinya, selanjutnya operator akan memulai memutar alat tersebut dan memberikan penetrasi ke bawah hingga mencapai kedalaman rencana atau kriteria yang telah disepakati oleh perencana berdasarkan data penyelidikan tanah. Penetrasi dilakukan dengan mengkombinasikan berat sendiri dari displacement boring tool, putaran torsi, dan penekanan bawah oleh mesin bor. Tanah akan terurai oleh starter auger dan kemudian terdesak ke samping di sekeliling lobang oleh badan displacement boring tool.

Tahap 3 dan 4 : Pengisian Material Penguat dan Pencabutan Displacement Boring Tool Setelah penetrasi mencapai kedalaman yang direncanakan, material penguat yang berupa grout cement/mortar/beton dipompakan kedalam lobang melalui ujung bawah displacement boring tool secara progresif. Saat pencabutan, displacement boring tool diputar kearah yang sama saat pengeboran untuk memastikan tanah yang berada diatasnya terdesak dan tidak tercampur dengan material penguat. Di bagian atas displacement boring tool terdapat counter flight section yang berfungsi sebagai alat untuk memastikan tanah terdesak ke sekeliling lobang bor saat pencabutan dan pengisian material penguat.

Toleransi Pekerjaan perbaikan tanah ini diasumsikan bahwa posisi kolom saat proses instalasi memiliki toleransi maksimal sebesar 100 mm dari posisi rencana. Pekerjaan perbaikan tanah ini diasumsikan bahwa posisi kolom saat proses instalasi memiliki toleransi maksimal sebesar 100 mm dari posisi rencana.

Material LTP dapat dibuat menggunakan pasir berbutir tajam dan keras yang tidak pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca, seperti panas matahari dan hujan. Material pasir yang digunakan harus bersih dan bebas dari clay atau zat-zat organik, dengan kandungan maksimum lempung < 15%. Yang diartikan dengan lempung adalah butir-butir yang dapat melalui saringan 0,063 mm. Sebagai alternatif, material Sirtu juga dapat digunakan sebagai bahan LTP.

Konsep Desain Full Displacement Column

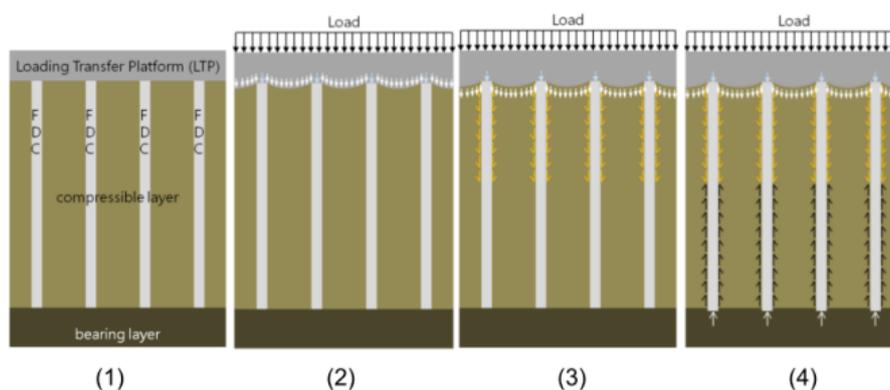
Konsep transfer tegangan dapat dijelaskan secara rinci melalui tinjauan perilaku kolom tunggal FDC saat menerima beban.

Proses pembebanan tersebut dapat dijelaskan melalui beberapa tahap, yaitu:

- 1) Pemasangan FDC dan LTP
- 2) Pembebanan dan distribusi tegangan oleh LTP ke FDC dan tanah sekitarnya
- 3) Proses konsolidasi. Pada saat penurunan tanah > penurunan FDC, terjadi transfer tegangan dari tanah ke FDC akibat negative skin friction pada bagian atas FDC
- 4) Pada saat tercapai kondisi penurunan tanah > penurunan FDC di kedalaman tertentu, maka terjadi transfer tegangan kembali dari FDC ke tanah sekitarnya.

Hal ini memobilisir positive skin friction dan tahanan ujung bawah FDC. Pada kondisi kesetimbangan, tegangan-tegangan yang terjadi pada kolom FDC dapat dibagi dalam 4 komponen sebagaimana terlihat pada Gambar 4, yaitu :

- (1) Tegangan vertikal Q pada kepala kolom
- (2) Negative skin friction pada bagian atas kolom di atas bidang netral
- (3) Positive skin friction pada bagian bawah kolom
- (4) Tahanan ujung kolom.



Gambar 4. Mekanisme Transfer Beban FDC – BAUER

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis perbaikan tanah dengan metode FDC dilakukan menggunakan metode elemen hingga untuk mengetahui sifat penurunan tanah, daya dukung tanah. Tahap analisis dilakukan dengan tahap sebagai berikut :

- 1) Analisa menggunakan model lokal axis simetri untuk menentukan besarnya tegangan maksimum yang akan ditahan oleh kolom FDC, sekaligus memprediksikan besarnya penurunan vertical maksimum yang mungkin terjadi. Penurunan maksimum harus lebih kecil dibandingkan persyaratan yang ditentukan dalam kriteria desain, dan tegangan pada kolom FDC harus lebih kecil dari 7 MPa (mengacu pada ASIRI clause 3.1.1.2 mengenai ULS design compressive strength sebesar maximum 7 MPa).
- 2) Dari pemodelan lokal axis simetri, dapat ditentukan besarnya spasi dan diameter FDC yang dibutuhkan. Desain ini harus memenuhi persyaratan berupa penurunan ijin, dan tegangan maksimum yang diijinkan oleh material FDC.
- 3) Model regangan bidang (plane strain), FDC dimodelkan sebagai model Embedded Pile Row (EPR). Model plane strain digunakan untuk mendapatkan angka penurunan vertikal, tegangan pada kolom FDC, dan stabilitas global timbunan. Hasil desain FDC berupa grid jarak antar FDC, kedalaman FDC yang dibutuhkan, dan mutu FDC.

Data Tanah

Tabel 1. Parameter Tanah Zona 1

No	Jenis Tanah	Elevasi (m)		N-SPT desain (blows/ft)	k (mm/hari)	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ' (°)	E ₅₀ (kPa)	EOED (kPa)	E _{ur} (kPa)
		Atas	Bawah								
1	Ballast-gravel	2,90	2,60		10	22	1	40	50.000	40.000	250.000
2	Sub ballast-pasir	2,60	2,20		1,00x10 ⁻¹	18	1	35	30.000	24.000	150.000
3	Timbunan	2,20	0,60		8,64x10 ⁻⁵	17	1	25	8.000	6.400	24.000
4	LTP (Sand)	0,60	0,00		8,64x10 ⁻²	17	1	35	25.000	20.000	75.000
5	Silty sand	0,00	-5,00	3	8,64x10 ⁻⁴	17	1	30	4.500	3.600	13.500
6	Silty sand	-5,00	-8,00	5	8,64x10 ⁻⁴	17	1	30	7.500	6.000	22.500
7	Silty sand	-8,00	-13,00	8	8,64x10 ⁻⁴	17	1	31	12.000	9.600	36.000
8	Silty sand	-13,00	-17,50	15	8,64x10 ⁻⁴	17	1	34	22.500	18.000	67.500
9	Silt Stone	-17,50	-30,00	35	8,64x10 ⁻⁴	17	1	37	52.500	42.000	157.500

Tabel 2. Parameter Tanah Zona 1 dengan Data Terbaik

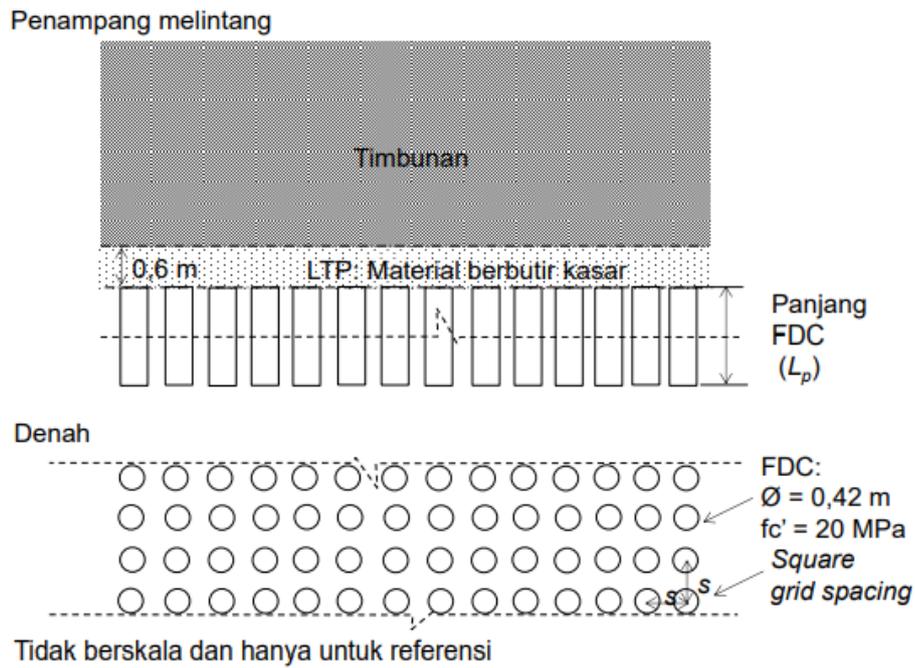
No	Jenis Tanah	Elevasi (m)		N-SPT desain (blows/ft)	k (mm/hari)	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ' (°)	E ₅₀ (kPa)	EOED (kPa)	E _{ur} (kPa)
		Atas	Bawah								
1	Ballast-gravel	2,90	2,60		10	22	1	40	50.000	40.000	250.000
2	Sub ballast-pasir	2,60	2,20		1,00x10 ⁻¹	18	1	35	30.000	24.000	150.000
3	Timbunan	2,20	0,60		8,64x10 ⁻⁵	17	1	25	8.000	6.400	24.000
4	LTP (Sand)	0,60	0,00		8,64x10 ⁻²	17	1	35	25.000	20.000	75.000
5	Silty sand	0,00	-5,00	4	8,64x10 ⁻⁴	17	1	30	5.000	4.000	15.000
6	Silty sand	-5,00	-7,50	7	8,64x10 ⁻⁴	17	1	30	8.750	7.000	22.500
7	Silty sand	-7,50	-11,50	12	8,64x10 ⁻⁴	17	1	31	15.000	12.000	45.000
8	Silty sand	-11,50	-20,00	15	8,64x10 ⁻⁴	18	1	37	62.500	50.000	187.500

Skema perbaikan Tanah FDC.

Tabel 3. Skema perbaikan tanah FDC

Zona	Timbunan	Area (m ²)	Diameter (m)	Square Grid Spacing (m)	Panjang Lp (m)	fc' (Mpa)	Tebal LP (cm)	Estimasi penurunan (mm)
Zona 1	Rel kereta	36.072	0,42	2	19	20	60	89

Stockyard	48.177	0,42	2,7	19	20	60	187
-----------	--------	------	-----	----	----	----	-----



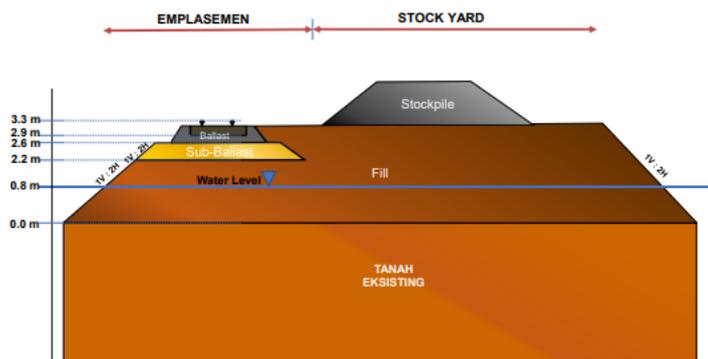
Gambar 5. Ilustrasi Konfigurasi Perbaikan Tanah FDC

Hasil analisa Plaxix untuk zona 1.



Gambar 5. Area perbaikan tanah

Area perbaikan tanah dapat dilihat pada Gambar 5. Potongan melintang pada lokasi proyek mengacu pada sketsa pada Gambar 6. Area perbaikan tanah terdiri dari 2 lokasi, yaitu: 1. Emplasemen Kereta (garis warna merah) 2. Stockyard (arsiran warna abu-abu)



Gambar 6. Potongan melintang timbunan

Pada pemodelan ini, perbaikan tanah dilakukan dengan menggunakan FDC dengan diameter 0,42 m, panjang 19 m, dan square grid spacing. Analisis ini dilakukan dengan kondisi consolidation-undrained menggunakan tahapan konstruksi sebagai berikut:

- a) Instalasi Load Transfer Platform (LTP) – 14 hari
- b) Instalasi FDC (waktu 30 hari)
- c) Penimbunan fill + sub ballast (waktu 30 hari)
- d) Beban hidup (selama 10 tahun)

Model dan hasil analisis lokal axis simetri adalah sebagai berikut :

- (a). penurunan pada periode operasional 10 tahun adalah 85,18 mm < 100 mm dengan tegangan maksimum pada FDC adalah 1.592 kPa < 7.000 kPa.
- (b). Dengan demikian, FDC sesuai untuk menahan beban vertikal yang diberikan.

Tabel 4. Hasil Analisis Penurunan dan Tegangan Kolom – FDC Zona 1

Diameter (m)	Square Grid Spacing (m)	Emplasemen		Stockyard		Tegangan pada Kolom FDC (kPa)	
		Total (mm)	Post-con (mm)	Total (mm)	Post-con (mm)	Beban 50 kPa	Beban 90 kPa
0,42	1,5	85,18	48,62	113,6	77,08	1,592	3,030
0,42	1,6	90,78	51,44	123,7	84,41	2,287	3,528
0,42	1,7	94,18	53,12	124,5	83,48	2,158	3,097
0,42	1,9	128,00	74,77	174,5	121,3	2,305	3,287
0,42	2,0	145,80	88,67	198,2	141,00	2,503	3,574
0,42	2,5	-	-	245,7	169,8	-	4,962
0,42	2,7	-	-	272,1	187,2	-	5,312

Catatan : Beban 50 kPa itu pada area Emplasemen; dan beban 90 kPa itu pada area Stockyard

Berdasarkan hasil analisis di atas, didapatkan kesimpulan sebagai berikut: FDC pada timbunan rel kereta api dengan beban 50 kPa : Diameter FDC = 0,42 m, Spasi = 2,0 m c/c square grid spacing, Settlement = 88,67 mm post construction (< 100mm) FDC pada stockyard dengan beban 90 kPa : Opsi 1 (max settlement 100 mm) : Diameter FDC = 0,42 m, Spasi = 1,7 m c/c square grid spacing, Settlement = 83,48 mm post construction (< 100 mm). Opsi 2 (max settlement 200 mm) : Diameter FDC = 0,42m - Spasi = 2,7 m c/c square grid spacing - Settlement = 187 mm post construction (< 200 mm).

Tabel 5 menampilkan hasil analisis penurunan menggunakan kondisi tanah terbaik. Nilai penurunan dari Tabel 4 dan Tabel 5 dapat digunakan untuk memprediksi differential settlement yang mungkin terjadi, khususnya pada lokasi emplasemen, berdasarkan data penyelidikan tanah yang ada. Analisis menggunakan design line konservatif menghasilkan penurunan 88,67 mm sedangkan analisis menggunakan data terbaik menghasilkan penurunan 76,22 mm. Differential settlement yang mungkin dapat terjadi pada rentang jarak 356 m adalah 12,5 mm atau sekitar 0,003% (1:28500).

Tabel 5. Hasil Analisis Penurunan dan Tegangan Kolom – FDC Zona 1 (Data Terbaik)

Diameter	Square	Emplasemen	Stockyard	Tegangan pada Kolom
----------	--------	------------	-----------	---------------------

(m)	Grid Spacing (m)	FDC (kPa)					
		Total (mm)	Post- con (mm)	Total (mm)	Post- con (mm)	Beban 50 kPa	Beban 90 kPa
0,42	1,5	82,67	47,16	109,90	74,38	1,495	2,122
0,42	1,6	88,06	50,69	117,60	80,22	1,665	2,380
0,42	1,7	91,23	51,58	121,40	81,77	1,847	2,650
0,42	1,9	122,60	71,77	165,80	115,10	2,187	3,120
0,42	2,0	129,90	76,22	175,60	121,90	2,354	3,328
0,42	2,5	-	-	226,90	154,70	-	4,139
0,42	2,7	-	-	246,10	167,10	-	4,467

KESIMPULAN

- 1) FDC sebagai metode perbaikan tanah sehingga emplasemen dan stockyard dapat memenuhi spesifikasi teknis yang disyaratkan.
- 2) FDC yang diajukan berupa kolom fc' 20 MPa dengan diameter 0,42 m yang dengan variasi spasi antara 1,4 m hingga 2,7 m dan kedalaman sekitar 19 m – 20 m.
- 3) Analisis menggunakan design line konservatif menghasilkan penurunan 88,67 mm sedangkan analisis menggunakan data terbaik menghasilkan penurunan 76,22 mm.
- 4) Differential settlement yang mungkin dapat terjadi pada rentang jarak 356 m adalah 12,5 mm atau sekitar 0,003% (1:28500).

DAFTAR PUSTAKA

- Baez, J. I., dan Martin, G. R., 1993, Advances in the design of Vibro-systems for improvement of liquefaction resistance. *Proceedings of the Symposium on Ground Improvement*, Canadian, Geotechnical Society, Vancouver.
- Irsyam, M., Widiyantoro, S., Natawidjaja, D. H., Meilano, I., Rudyanto, A., Hidayati, S., Triyoso, W., Hanifa, N. R., Djarwadi, D., Faizal, L., (editor), dan Sunarjito, National Team for updating of Indonesia Earthquake Hazard Map, 2017, Earthquake Source and Hazard Map of Indonesia 2017. Indonesia National center for earthquake Studies, Research and Development Agency of Ministry of Public Work and Housing, Indonesia.
- Makrup, L. L., Irsyam, M., Sengara., I. W., dan Hendriyawan, 2010, Hazard Deaggregation for Indonesia, *Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 17 No. 3 Desember 2010
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, Jr., L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, III, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., and Stokoe, II, K. H. 2001. Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 127 (10), 817–833.