

BAB V

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pemodelan numerik dan analisis terhadap sistem perkuatan tanah lempung lunak menggunakan metode *stone column* pada kasus tangki berkapasitas 10.000 m³, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa *stone column* efektif menurunkan *settlement*, dengan faktor perbaikan meningkat seiring pertambahan panjang kolom, terutama ketika kolom menembus penuh lapisan lempung lunak sehingga mekanisme *load sharing* termobilisasi optimal. Pada konfigurasi optimum penelitian ini ($L = 17$ m, $As = 35\%$, $Ec = 70$ MPa), *settlement* tercatat 0.139 m (13.9 cm), berada di bawah ambang 0.15 m, dengan settlement improvement factor (SIF) = 3.230 ($\approx 69\%$ reduksi dibanding tanah tanpa perbaikan). Temuan ini menegaskan bahwa performa tidak hanya ditentukan oleh kekakuan material kolom, tetapi sangat dipengaruhi oleh rasio panjang kolom terhadap tebal lapisan lunak.

Analisis *punching ratio* dan *compression ratio* memperlihatkan peralihan mekanisme deformasi, untuk $L < 17$ m didominasi *punching* (transfer beban lebih vertikal menuju ujung kolom), $L = 17$ m menunjukkan kombinasi *punching – bulging*, sedangkan $L > 17$ m didominasi *bulging* dengan distribusi deformasi lebih merata sepanjang kolom. Kenaikan As dari 25% ke 35% menurunkan *compression ratio*, yang menandakan konfinemen lateral lebih baik dan menekang ekspansi horizontal kolom.

Perbandingan dengan pendekatan teoritis Priebe (1995) dan temuan Killeen (2012) mengindikasikan bahwa pada lapisan lempung lunak yang tebal, diperlukan koreksi desain agar proyeksi penurunan tidak *over estimated*. Secara keseluruhan, konfigurasi yang memadukan penetrasi kolom yang

- memadai dengan As tinggi dan kekakuan kolom yang cukup memberikan kinerja terbaik serta memenuhi kriteria layanan yang ditetapkan.
2. Hasil analisis distribusi tegangan vertikal efektif menunjukkan bahwa *stone column* berperan sebagai elemen kaku yang memikul beban dominan dibanding tanah di sekitarnya. Fenomena ini ditunjukkan oleh nilai *stress concentration ratio* yang secara konsisten lebih tinggi pada lokasi kolom. Mekanisme transfer beban terbentuk dari perbedaan kekakuan antara kolom dan tanah, sehingga beban vertikal dari struktur dialirkan lebih dahulu melalui kolom, kemudian sebagian diteruskan ke tanah sekitar melalui interaksi lateral (*load sharing*). Pada kondisi panjang kolom lebih pendek dari ketebalan tanah lempung lunak ($L < 17\text{m}$), distribusi tegangan vertikal menunjukkan konsentrasi hampir merata sepanjang kedalaman kolom, dengan nilai *stress concentration ratio* yang meningkat seiring pertambahan panjang. Analisis regangan vertikal pada analisis karakteristik perilaku *stone column* mengonfirmasi dominasi deformasi di ujung kolom (*punching*), di mana transfer beban berlangsung secara dominan ke bawah menuju lapisan tanah di bawah kolom. Ketika panjang kolom setara atau melebihi ketebalan lapisan tanah lempung lunak ($L \geq 17\text{ m}$), pola distribusi tegangan mulai berubah. Tegangan di bagian bawah kolom berkurang relatif, sementara tegangan di bagian atas kolom dan tanah sekitar meningkat. Regangan horizontal yang signifikan di zona atas kolom mengindikasikan peralihan mekanisme ke *bulging*, yang menandakan beban mulai disalurkan secara horizontal ke tanah sekitarnya. Serta, peningkatan *area replacement ratio* dari 25% ke 35% terbukti meningkatkan kekangan lateral terhadap kolom, mengurangi *compression ratio*, dan memperbesar proporsi beban yang dapat disalurkan secara efektif pada pola deformasi *bulging*.
 3. Tiga parameter utama yang memengaruhi kinerja sistem stone column adalah panjang kolom, *area replacement ratio*, dan kekakuan material kolom (modulus elastisitas, E_c). Pengaruh ketiga parameter ini sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah. Pada kondisi di mana panjang kolom belum

sepenuhnya menembus lapisan tanah lempung lunak ($L < 17$ m), faktor yang paling dominan adalah panjang kolom, karena peningkatan panjang secara langsung meningkatkan kapasitas transfer beban vertikal ke lapisan tanah di bawahnya. Sebaliknya, ketika panjang kolom telah menembus seluruh lapisan tanah lempung lunak ($L > 17$ m), pengaruh panjang kolom mulai berkurang dan *area replacement ratio* menjadi faktor yang lebih signifikan dalam menentukan kinerja sistem, diikuti oleh kekakuan material kolom yang berperan dalam mendistribusi tegangan dan deformasi pada tanah di sekitarnya.

5.2 Rekomendasi

1. Untuk kondisi tanah lempung lunak dengan ketebalan besar (>17 m), disarankan menggunakan panjang stone column minimal menyamai kedalaman lapisan lunak agar memperoleh efisiensi maksimum dalam pengurangan penurunan.
2. Penggunaan modulus elastisitas tinggi (≥ 70 MPa) dan area replacement ratio $\geq 35\%$ direkomendasikan untuk meningkatkan kapasitas dukung lateral dan mendistribusikan beban secara lebih merata, terutama pada proyek dengan beban berat seperti tangki.
3. Metode empiris seperti Priebe (1995) perlu dikoreksi atau dilengkapi dengan faktor reduksi untuk tanah lempung lunak tebal agar hasil perhitungan tidak *overestimate*.
4. Studi lebih lanjut disarankan menggunakan pendekatan model 3D skala penuh dengan perangkat komputasi lebih tinggi agar variasi konfigurasi kolom (grup, jarak antar kolom, dll.) bisa dikaji lebih komprehensif.
5. Penelitian juga dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan analisis dinamik (beban gempa) untuk mengevaluasi performa *stone column* terhadap deformasi lateral dan likuifaksi pada tanah pasir atau lempung yang mengalami *cyclic softening*.

6. Studi lanjutan disarankan untuk melakukan uji lapangan skala penuh (full scale test) guna memvalidasi hasil analisis numerik.