

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Hasil pengujian lentur menunjukkan bahwa elemen mampu menggambarkan tahapan perilaku struktur secara jelas, mulai dari kondisi elastis, munculnya retak awal, hingga pasca-leleh tulangan. Pemodelan numerik menggunakan *finite element method* (FEM) pada program ATENA berhasil merepresentasikan perilaku lentur tersebut dengan baik. Hal ini dibuktikan dengan nilai *Normalized Mean Square Error* (NMSE) sebesar $0,0024 < 0,5$, yang menunjukkan tingkat kesalahan relatif kecil. Kapasitas beban lentur hasil pemodelan sebesar 45,74 ton hanya berbeda sekitar 4% dari hasil uji eksperimental sebesar 47,71 ton, sedangkan nilai daktilitasnya juga menunjukkan kecenderungan serupa, yaitu 4,41 (numerik) dan 3,97 (eksperimental).
2. Hasil pengujian geser menunjukkan bahwa model numerik mampu menangkap karakteristik utama perilaku geser pada *spun pile*, mulai dari tahap elastis, retak geser awal, hingga kondisi pasca-retak. Hasil analisis menunjukkan nilai NMSE sebesar $0,0017 < 0,5$, menandakan tingkat kesesuaian yang sangat baik antara hasil pemodelan dan pengujian. Kapasitas geser hasil pemodelan sebesar 83,83 ton memiliki perbedaan hanya 2,1% dibandingkan hasil eksperimental sebesar 82,11 ton, sehingga dapat disimpulkan bahwa model FEM memberikan hasil yang akurat dan representatif terhadap perilaku geser elemen.
3. Berdasarkan hasil analisis, tingkat kesesuaian antara hasil pemodelan numerik dan hasil pengujian eksperimental tergolong sangat baik, dengan nilai NMSE keseluruhan berada pada kisaran $0,0017\text{--}0,0024$, jauh di bawah ambang batas 0,5 yang menandakan model numerik valid. Perbedaan kapasitas antara hasil numerik dan eksperimen yang relatif kecil (sekitar 2–4%) menunjukkan bahwa model *finite element* yang digunakan mampu merepresentasikan perilaku lentur dan

geser *spun pile* secara realistik, akurat, dan dapat diandalkan untuk analisis lanjutan.

4. Pemodelan ETABS hanya mampu merepresentasikan perilaku elastis sehingga hasilnya sesuai dengan eksperimen pada tahap awal saja. Sebaliknya, ATENA dapat menggambarkan perilaku nonlinier termasuk retak, sehingga lebih mendekati respon eksperimental secara keseluruhan. Dengan demikian, ATENA memberikan akurasi yang lebih baik untuk analisis lentur–geser dan kondisi mendekati keruntuhan.

5.2 Saran

Setelah penelitian ini dilakukan, ada beberapa saran yang dapat diberikan untuk keberlangsungan penelitian ini kedepannya, antara lain sebagai berikut:

1. Studi parametrik dapat dilakukan menggunakan program lain berbasis elemen hingga agar didapatkan hasil yang beragam dan dapat dijadikan perbandingan terhadap pengujian numerikal.
2. Pelaksanaan penelitian numerikal berbasis metode elemen hingga dapat dilakukan menggunakan program berlisensi, khususnya pada ATENA 2024 agar diperoleh hasil yang lebih akurat dan tanpa batasan *meshing element*.
3. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan ATENA dengan lisensi penuh agar seluruh fitur visualisasi nonlinier, termasuk kontur warna merah–biru–kuning untuk identifikasi retak dan distribusi tegangan, dapat ditampilkan secara lengkap. Penggunaan lisensi resmi akan meningkatkan ketelitian dalam membaca pola retak, perkembangan kerusakan, serta evaluasi keruntuhan struktur.