

Evaluasi Kekuatan Tiang Pancang Jenis *Spun Pile* Diameter 400mm Dibawah Pengaruh Beban Lentur Murni Dan Aksial Dengan Bantuan Program *Finite Element*

Dimas Dwi Putra, Budi Suswanto, I Gusti Putu Raka, dan Candra Irawan.
Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: dimasdwiputrastmt@gmail.com, budi_suswanto@ce.its.ac.id

Abstrak— Produk tiang pancang *spun pile* yang berada di pasaran saat ini di desain secara umum sebagai fondasi dalam dimana kekuatan tekan aksial yang menjadi dominan pada produk ini. Dalam praktek di lapangan, tiang pancang *spun pile* sebagai komponen dalam sebuah struktur dapat menerima beban lateral berupa beban gempa yang menimbulkan gaya dalam berupa momen lentur. Penulangan produk tiang pancang *spun pile* yang berada di pasaran rasio dan dimensinya di bawah persyaratan SNI 2847:2013. Sebagai contoh salah satu produk tiang pancang *spun pile* diameter 400 mm memiliki diameter 7 mm untuk tulangan longitudinal dengan rasio 0,005Ag dan 3,2 mm untuk diameter tulangan spiral dengan rasio volume tulangan sebesar 0,002. SNI 2847:2013 pasal 10.9.1 mensyaratkan nilai rasio untuk tulangan longitudinal tidak kurang dari 0,01Ag dan tulangan spiral rasionya (ρ_s) tidak kurang dari $[0,45.(Ag/Ach-1).(f'c/fyt)]$ atau sama dengan 0,036.

Berdasarkan hasil analisa Metode perhitungan memiliki nilai beban ultimate mendekati hasil eksperimental dengan selisih sebesar 0.529%. Metode dengan program Xtract® menghasilkan nilai beban ultimate dengan selisih sebesar 1.999%. Metode dengan program finite element menghasilkan nilai beban ultimate dengan selisih sebesar 6.148%. Dengan perbedaan nilai yang cukup besar pada metode program finite element perlu adanya kajian mengenai asumsi yang digunakan pada permodelan. Nilai daktilitas lendutan berdasarkan hasil eksperimental didapat sebesar 2,3 dan nilai daktilitas kurvatur berdasarkan perhitungan sebesar 6. Nilai ini berada dibawah batas ketentuan untuk daktilitas lendutan yaitu lebih dari sama dengan 3 [6] dan masuk dalam kategori resiko seismik rendah [5]. Dari hasil analisa tersebut dapat dibuktikan bahwa walaupun penulangan tiang pancang jenis *spun pile* dibawah persyaratan SNI 2847-2013 dan SNI 1726-2012 tiang pancang dapat memberikan respon yang daktail ketika diberi beban lentur murni. Walaupun nilai daktilitas berada dibawah ketentuan bukan berarti tiang tidak layak digunakan. Untuk menentukan tiang layak atau tidak, kajian lanjut mengenai kinerja tiang sebagai kesatuan suatu struktur perlu dilakukan.

Kata Kunci— Tiang pancang, *spun-pile*, daktilitas, lentur, *finite element*.

I. PENDAHULUAN

Produk tiang pancang *spun pile* yang berada di pasaran saat ini di desain secara umum sebagai fondasi dalam dimana kekuatan tekan aksial yang menjadi dominan pada produk ini.

Dalam praktek di lapangan, tiang pancang *spun pile* sebagai komponen dalam sebuah struktur dapat menerima beban lateral berupa beban gempa yang menimbulkan gaya dalam berupa momen lentur. Selama gaya gempa menyerang, tiang pancang *spun pile* akan akan menerima gaya lateral yang besar sebagai tambahan terhadap beban gravitasi dari struktur di atasnya. Gaya gempa yang menimbulkan beban lateral menghasilkan momen yang besar pada badan tiang pancang. Kondisi-kondisi seperti diterangkan di atas dapat menyebabkan kerusakan tiang pancang *spun pile* akibat beban lentur.

Selain masalah tentang momen lentur, penulangan produk tiang pancang *spun pile* yang berada di pasaran rasio dan dimensinya di bawah persyaratan SNI 2847:2013. Sebagai contoh salah satu produk tiang pancang *spun pile* diameter 400 mm memiliki diameter 7 mm untuk tulangan longitudinal dengan rasio 0,005Ag dan 3,2 mm untuk diameter tulangan spiral dengan rasio volume tulangan sebesar 0,002. SNI 2847-2013 pasal 10.9.1 mensyaratkan nilai rasio untuk tulangan longitudinal tidak kurang dari 0,01Ag dan tulangan spiral rasionya (ρ_s) tidak kurang dari $[0,45.(Ag/Ach-1).(f'c/fyt)]$ atau sama dengan 0,036 [1]. Adapun nilai rasio berdasarkan SNI 1726-2013 [2] seperti ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1.
Nilai rasio tulangan spiral terhadap persyaratan

Rasio	SNI 1726-2012 KSD*-C	SNI 1726-2012 KSD*-D, E, F	SNI 2847-2013
ρ_{aktual}	0,002	0,002	0,002
P_{Min}	0,007	0,012	0,012
P_{Max}	0,021	0,022	-
$P_{Required}$	0,012	0,021	0,04

(sumber: perhitungan)

*Kategori Seismik Desain.

Kekuatan sebuah komponen struktur dalam perencanaannya didesain sesuai gaya yang diterima. Dalam perencanaan tiang pancang beton bertulang, diagram aksial-lentur (P-M) sangat diperlukan [3]. Dari diagram tersebut dapat diperoleh kapasitas penampang terhadap beban aksial dan momen berdasarkan hasil analisa penampang berdasarkan distribusi regangan akibat beban aksial dan momen. Idealnya fondasi dapat didesain untuk tetap elastis di bawah pengaruh beban gempa karena perbaikan

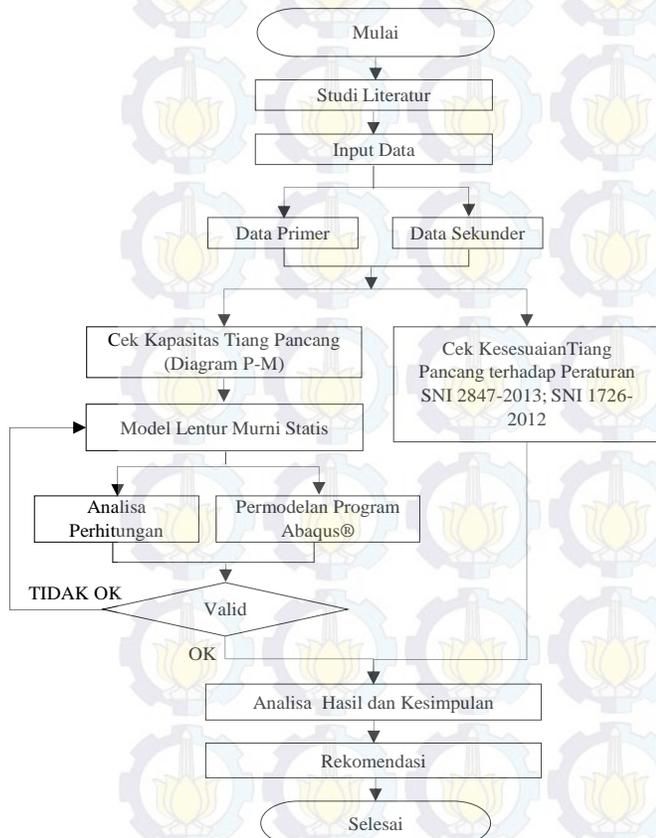
kerusakan tiang pancang setelah gempa sulit dilakukan namun, hal ini tidak biasa dilakukan untuk mendesain tiang-kolom. Kemampuan material berdeformasi inelastik tanpa mengalami kerusakan atau daktilitas dari komponen struktur menjadi bahan pertimbangan dalam desain [4].

Daktilitas adalah kemampuan struktur atau komponennya untuk melakukan deformasi inelastis bolak-balik berulang di luar batas titik leleh pertama, sambil mempertahankan sejumlah besar kemampuan daya dukung bebannya. Pada tugas akhir ini daktilitas yang akan dicapai adalah daktilitas lendutan. Daktilitas lendutan biasanya digunakan pada evaluasi struktur yang diberikan gaya gempa. Untuk kategori seismik rendah tidak disyaratkan daktilitas, pada daerah resiko gempa sedang dan tinggi berturut-turut untuk nilai daktilitasnya adalah lebih dari 4 dan lebih dari 8 [5]. Pada penelitian tiang pada penelitian sebelum yang telah dilakukan secara keseluruhan tiang pada dasarnya dapat memenuhi ketentuan daktilitas lendutan $\mu\Delta > 3$ [6].

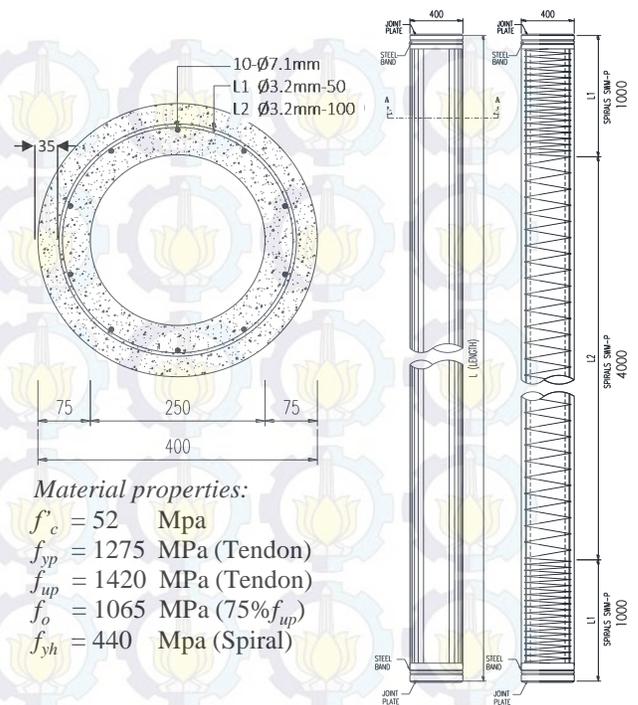
Berdasarkan permasalahan yang diterangkan sebelumnya, tiang pancang *spun pile* yang akan diteliti kekuatannya sesuai dengan peraturan SNI 2847:2013 dengan tujuan mengetahui kinerja tiang pancang *spun pile*.

II. METODOLOGI

Bagan alir dalam pelaksanaan tugas akhir ini dapat dilihat pada gambar 1. Data yang pada tugas akhir ini berupa data teknis tiang pancang, pengujian material tiang pancang, dan data hasil pengujian langsung tiang pancang. Tiang pancang



Gambar. 1. Diagram alir metodologi pengerjaan tugas akhir.

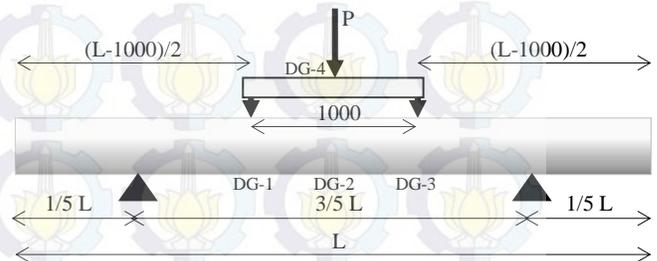


Gambar. 2. Dimensi tiang pancang.

yang diteliti dapat dilihat pada gambar 2. Data hasil pengujian material pada tugas akhir ini berupa pengujian tarik tulangan prategang diameter 7,1mm dan spiral diameter 3,2mm.

III. PERMODELAN LENTUR MURNI STATIS

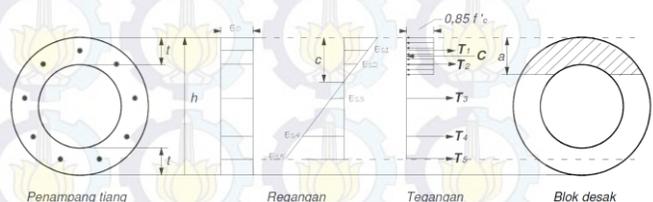
Tiang pancang *spun pile* dimodelkan dengan pembebanan yang ditunjukkan pada gambar 3 berdasarkan peraturan JIS 5335-1987 tentang pengujian lentur [7]. Pembebanan 2 titik pada tengah bentang akan mengghilangkan gaya geser pada tengah bentang sehingga beban yang terjadi pada tengah bentang adalah beban lentur murni.



Gambar. 3. Permodelan tiang pancang spun pile dengan pembebanan lentur murni

A. Distribusi Regangan Spun Pile.

Distribusi regangan untuk beton pratekan berbeda dengan beton bertulang biasa. Pada beton prategang terdapat regangan awal



Gambar. 4. Disrtibusi regangan dan tegangan penampang silinder berongga (Tavio dan Kusuma, 2010)

akibat gaya pratekan yang diterapkan pada penampang sebesar ε_0 [3]. Pada distribusi tegangan dan regangan yang ditunjukkan pada gambar 2.3, gaya tendon prategang pada bagian tarik (T_T) dan tekan (T_C) dari pusat plastis akan dikurang gaya yang hilang karena gaya prategang.

B. Kehilangan Prategang.

Pada saat gaya prategang dialihkan ke beton, komponen struktur akan memendek dan baja prategang turut memendek bersamanya. Hal ini menyebabkan kehilangan gaya prategang pada tulangan pratekan. Besarnya kehilangan gaya prategang akibat perpendakan elastis beton dirumuskan sebagai berikut [8]:

$$\Delta f_s = \frac{n \cdot F_i}{A_c + (n-1) \cdot A_s} \quad (1)$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{E_s}{w^{1.5} \cdot 0,043 \sqrt{f'_c}} \quad (2)$$

Dimana,

Δf_s : Kehilangan prategang, Mpa

F_i : Gaya prategang mula-mula, N

f_c : Tegangan beton, MPa

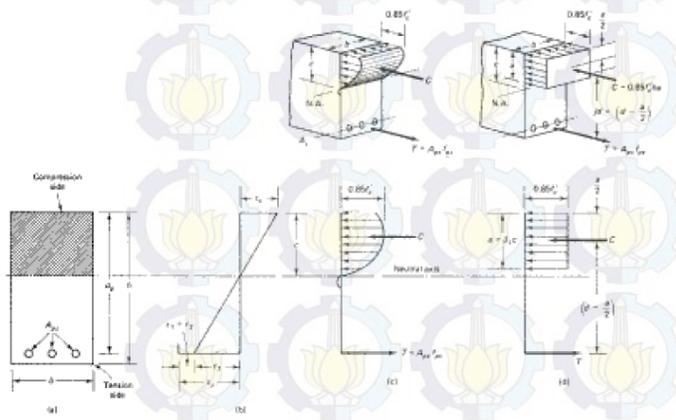
f'_c : Kuat tekan beton, Mpa

w : Berat jenis beton, kg/m³

A_{cn}, A_s : Luas penampang beton netto dan tulangan, mm²

C. Perhitungan Momen Lentur.

Perhitungan momen lentur penampang di dasarkan pada teori balok beton bertulang seperti ditunjukkan gambar 3 dengan menggunakan distribusi regangan beton prategang yang dijelaskan sebelumnya. Dengan mencari kesetimbangan gaya C sama dengan gaya T, kuat lentur penampang beton didapat dengan cara mengkalikan gaya C atau T dengan jarak lengan momen penampang [9].



Gambar. 5. Distribusi tegangan dan regangan pada balok: (a) Penampang balok; (b) Tegangan balok; (c) Stress blok aktual; (d) Asumsi stress block ekuivalen. (Nawy, 2009)

Analisa perhitungan lentur didasarkan pada tiga kondisi yaitu saat *crack*, saat leleh, dan saat *ultimate*. Momen crack dimana

serat bawah tiang *spun pile* mengalami tegangan tarik sama dengan besarnya kemampu tegangan tarik beton *spun pile*. Besarnya kapasitas tarik beton menurut SNI 2847-2013 pasal adalah,

$$f_r = 0,62 \lambda \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

Besarnya momen crack menurut SNI 2847 pasal adalah,

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_g}{y} \quad (4)$$

Tetapi untuk *spun pile* dimana terdapat tegangan *initial* akibat gaya prategang perumusan menjadi seperti berikut,

$$M_{cr} = \frac{\left(f_r + \frac{P}{A} \right) \cdot I_g}{y} \quad (5)$$

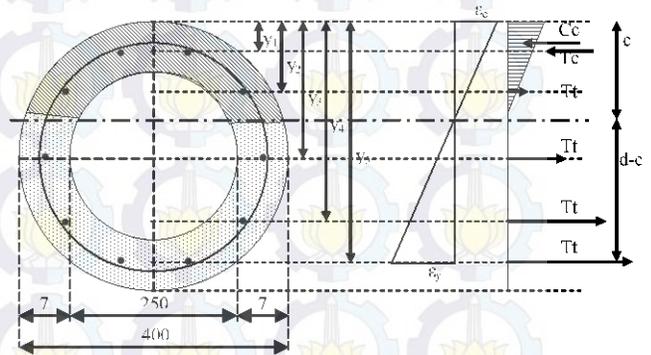
Dengan perumusan momen inersia untuk penampang *spun pile* sebagai berikut,

$$I_g = \frac{1}{64} \cdot \pi \cdot (h_1^4 - h_2^4) + \sum (n-1) \cdot A_s \cdot y_i^2 \quad (6)$$

Pada saat *ultimate* tinggi blok desak penampang lingkaran (c) dihitung dengan cara coba-coba agar jumlah gaya tekan sama (C) dengan jumlah gaya tarik (T). Dari beberapa iterasi didapat nilai c sebesar 81,409 mm. Luas penampang tekan dengan tinggi desak tersebut dihitung sebagai berikut,

$$A_c = \frac{1}{4} h^2 (\theta - \sin \theta \cos \theta) \quad (7)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{0,5h - a}{0,5h} \right) \text{ rad} \quad (8)$$



Gambar. 6. Diagram tegangan-regangan spun pile diameter 400 mm.

$$\bar{y} = \frac{h^3}{A_c} \left(\frac{\sin^3 \theta}{12} \right) \quad (9)$$

Perhitungan momen kondisi ultimate dengan menjumlahkan statis momen tiap komponen. Untuk statis momen komponen beton dan tulangan dihitung dengan perumusan berikut,

$$M_n = C_c \cdot (0,5h - \bar{y}_c) \quad (10)$$

$$M_n = T_T \cdot (y_i - 0,5h) \quad (11)$$

D. Perhiungan Lentutan.

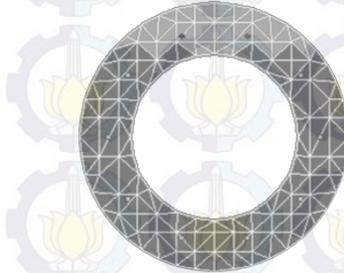
Perumusan umum untuk menentukan defleksi elastis sebuah balok adalah [10] ,

$$\frac{d^2 \delta}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (12)$$

Dimana M adalah momen pada arah beban kerja dan I adalah momen inersia penampang arah beban kerja.

E. Permodelan Xtract®

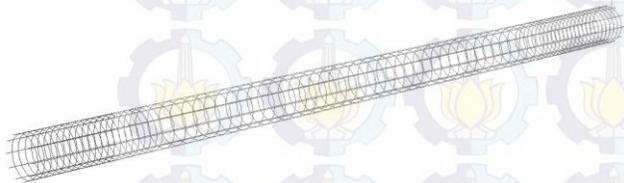
Permodelan Xtract menghasilkan nilai momen leleh sebesar 69,70 KN.m Momen nominal sebesar 82,97 KN.m. Bentuk keruntuhan penampang dapat dilihat pada gambar 8



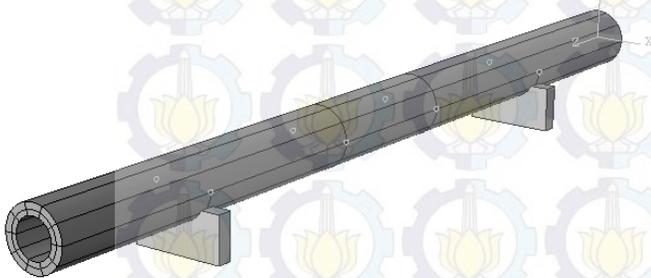
Gambar. 7. Model keruntuhan penampang.

F. Permodelan Program Finite Element.

Permodelan finite element untuk geometri *spun pile* terdiri dari *standard eight-node linear hexahedral 3D continuum elements with full integration*. *Spun pile* di mesh dengan perkiraan ukuran sebesar 50mm dengan partisi pada bagian tulangan. Tulangan spiral dan prategang terdiri dari standard two-node 3D truss elements. Tulangan prategang, tulangan spiral, dimasukkan kedalam *pile assembly* sebagai *embedded element*. Representasi dari permodelan ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar. 8. Layout reinforcement.



Gambar. 9. Pile assembly.

Material beton dimodelkan berdasarkan pendekatan permodelan kurva tegangan-regangan. Nilai dari persamaan yang digunakan diplot kedalam grafik yang membentuk kurva

tegangan-regangan beton. Persamaan yang digunakan adalah berikut [11],

$$\varepsilon_c' = \frac{f_c'}{E_c} \cdot \frac{n}{n-1} \quad (13)$$

$$n = 0,8 + \frac{f_c'}{17} \text{ dalam satuan Mpa} \quad (14)$$

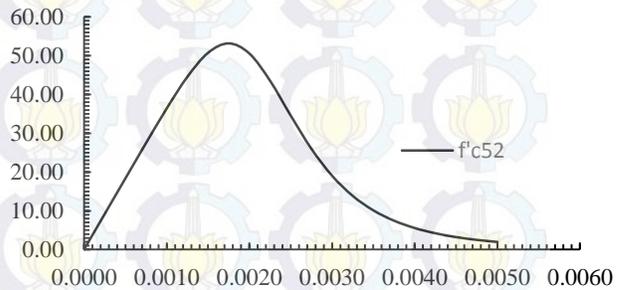
Dimana f_c' , E_c berturut-turut adalah kuat tekan beton dan modulus elastisitas beton yang nilainya dapat mengacu pada SNI 2847-2013 pasal 8.5.1 [1]. setelah mengetahui nilai selanjutnya mencari nilai tegangan beton pada tiap regangan beton dengan persamaan berikut,

$$\frac{f_c'}{f_c} = \frac{\varepsilon_c'}{\varepsilon_c} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{\varepsilon_c'}{\varepsilon_c}\right)^{nk}} \quad (15)$$

Dimana,

$$k = 0,67 + \frac{f_c'}{62} \text{ dalam satuan Mpa} \quad (16)$$

Kurva tegangan-regangan tekan beton ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar. 10. Kurva tegangan-regangan tekan beton.

Boundary conditions yang diterapkan pada model ini adalah perletakan sendi pada tumpuan. Beban pada model menggunakan *boundary conditions* displacement pada tengah bentang yang telah dipartisi.

Pada step initial beban yang diberikan adalah gaya prategang pada setiap tulangan PC Bar sebesar 1065 Mpa. Pemberian gaya prategang tidak dapat dilakukan langsung pada tampilan program, melainkan melalui input file dengan perintah “*Initial Conditions, Type=Stress” yang ditulis pada program saat job akan dijalankan. Beban *displacement* pada model bekerja mulai dari *Step-2* permodelan sampai step terakhir seperti ditunjukkan.

Tabel 2

Nilai rasio tulangan spiral terhadap persyaratan

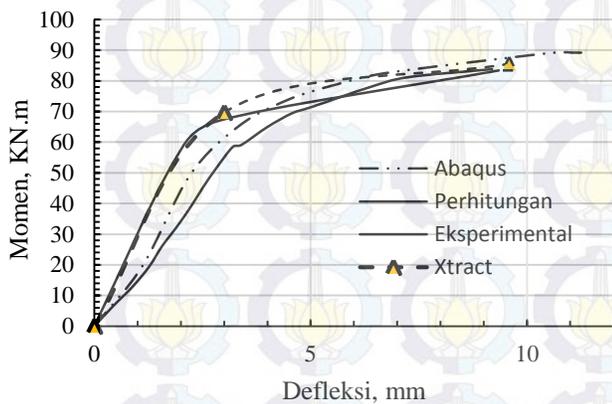
Step	Displacement	Step	Displacement
2	1	7	6
3	2	8	7
4	3	9	8
5	4	10	9
6	5	11	10

G. Eksperimental

Dalam tugas akhir ini eksperimen tidak dilakukan langsung melainkan menggunakan data eksperimen yang dilakukan Laboratorium Struktur Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Metode pengujian yang dilakukan mengacu kepada peraturan JIS A-5335 seperti pada tugas akhir ini. Konfigurasi pembebanan dan peletakan *dial gauge* pada pengujian ditunjukkan pada gambar 3.

H. Hasil Analisa

Hasil analisa dengan beberapa metode diplot kedalam grafik momen terhadap terhadap defleksi yang ditunjukkan pada Gambar 4 untuk mendapatkan nilai daktilitas lendutan dari permodelan. Daktilitas didapat dari rasio defleksi titik terjauh terhadap defleksi saat leleh.

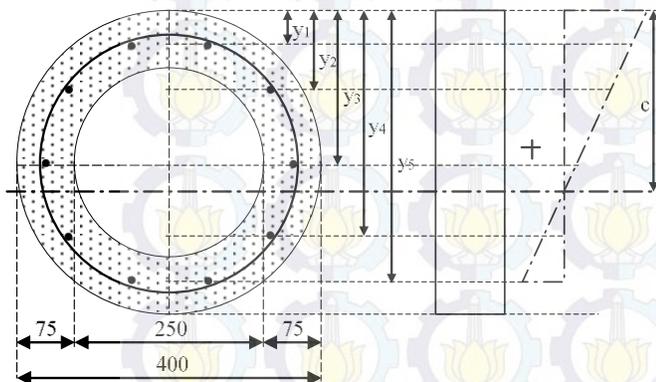


Gambar. 11. Kurva tegangan-regangan tekan beton.

IV. DIAGRAM INTERAKSI

A. Perhitungan Koordinat Diagram Interaksi

Diagram interaksi *spun pile* di hitung dengan asumsi sejumlah distribusi tegangan seperti gambar 12 untuk mencari nilai titik-titik koordinat pada diagram interaksi. Perhitungan dimulai dengan menghitung kuat nominal dan kuat tekan maksimum penampang *spun pile* seperti berikut,



Gambar. 12. Diagram tegangan regangan saat beban eksentris.

$$P_n = C_c - T_t \quad (17)$$

$$C_c = 0,85 f'_c \cdot A_{cn} \quad (18)$$

$$T_t = E_s \cdot \epsilon_s \cdot A_{st} \quad (19)$$

P_n adalah kuat tekan nominal penampang beton. Nilai P_n harus dikurangi oleh gaya tarik tulangan, T_t , yang disebabkan oleh gaya prategang yang diberikan pada *spun pile*. Nilai T_t adalah gaya tarik tulangan prategang pada saat beton mencapai kondisi regangan ultimate. Perhitungan gaya tiap baris tulangan dengan menggunakan jarak garis netral (c) dengan cara coba-coba dikarenakan bentuk penampang adalah lingkaran.

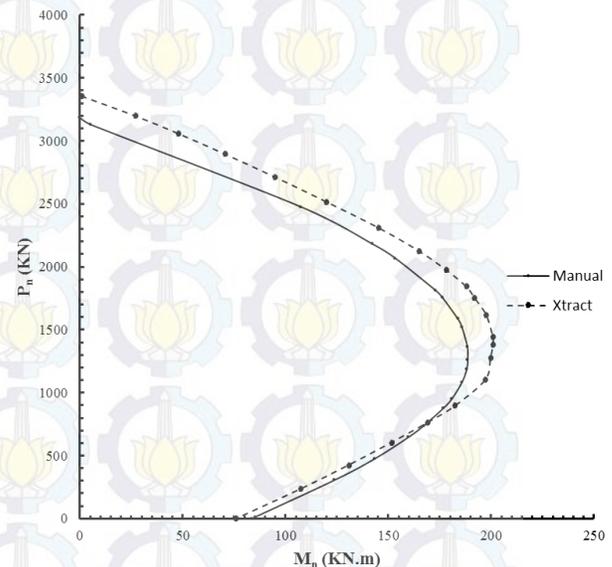
Nilai koordinat P dapat dihitung menggunakan rumus 3 sedangkan koordinat M dihitung dengan perumusan sebagai berikut,

$$M_n = C_c \cdot y_c + \sum_{i=1}^n T_i \cdot (y_i - 0,5h) \quad (20)$$

y_c adalah jarak titik berat penampang *spun pile* ke titik berat penampang terdesak. y_i adalah jarak serat atas penampang ke titik berat tulangan. Perhitungan dilakukan berulang dengan nilai c yang berbeda untuk mendapatkan koordinat diagram interaksi.

B. Permodelan Xtract®

Permodelan *spun pile* dengan program Xtract® untuk menghasilkan diagram interaksi digunakan sebagai validasi perhitungan. Penampang dan material didefinisikan sesuai data pada perhitungan sebelumnya. Diagram interaksi penampang *spun pile* ditunjukkan pada gambar 13. Pada diagram terdapat perbedaan sebesar antara hasil perhitungan dengan hasil analisa program.



Gambar. 13. Diagram interaksi spun pile diameter 400 mm.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan analisa dan eksperimental yang telah dilakukan pada *spun pile* diameter 400 dengan tulangan 10-D7,1 mm dan spiral 3,2-100 mm serta rasio yang kurang dari

persyaratan SNI 2847-2013 dan SNI 1726-2012 didapatkan hasil:

Dari analisa perhitungan didapat:

1. Momen saat *crack* sebesar 54,038 KN.m, momen saat leleh sebesar 67,043 KN.m, dan momen *ultimate* sebesar 83,409 KN.m.
2. Lendutan pada saat *crack* 1,852 mm, saat leleh sebesar 2.890 mm, dan saat nominal sebesar 9.350 mm.
3. Diagram interaksi menunjukkan kuat tekan nominal $P_n = 3183,071$ KN; $P_b = 1237,556$ KN; $M_b = 188,295$ KN.m; $M_n = 83,409$ KN.m

Dari hasil permodelan program Xtract® didapat:

1. Momen saat leleh sebesar 69,700 KN.m, dan momen *ultimate* sebesar 85,560 KN.m.
2. Lendutan pada saat leleh sebesar 3,004 mm, dan saat nominal sebesar 9,592 mm.
3. Diagram interaksi menunjukkan kuat tekan nominal $P_n = 3357,000$ KN; $P_b = 1381,000$ KN; $M_b = 200,800$ KN.m; $M_n = 82,710$ KN.m

Dari hasil permodelan program *finite element*:

1. Momen saat *crack* sebesar 54,038 KN.m, saat leleh sebesar 65,462 KN.m, dan momen *ultimate* sebesar 89,343 KN.m.
2. Lendutan pada saat *crack* 2,548 mm, saat leleh sebesar 3,337 mm, dan saat nominal sebesar 10,790 mm.

Dari hasil pengujian di laboratorium:

1. Momen saat *crack* sebesar 59,150 KN.m, saat leleh sebesar 65,000 KN.m, dan momen *ultimate* sebesar 83,850 KN.m.
2. Lendutan pada saat *crack* 3,400 mm, saat leleh sebesar 4,000 mm, dan saat nominal sebesar 9,190 mm.

Terdapat perbedaan nilai antara satu metode dengan metode lainnya. Perbedaan nilai dikarenakan adanya asumsi permodelan yang berbeda pada tiap metode. Jika dilihat secara trend grafik pada bab sebelumnya sesuai dengan penelitian-penelitian yang telah dilakukan. Menurut hasil analisa metode perhitungan memiliki nilai beban *ultimate* mendekati hasil eksperimental dengan selisih sebesar 0.529%.

Pada permodelan *finite element* luasan desak tidak berkurang dengan luas tulangan yang menggunakan model wire. Begitu pula dengan material beton pada permodelan yang tidak menggunakan trend garis berdasarkan pengujian langsung melainkan menggunakan model yang digunakan pada penelitian sebelumnya. Hal ini mungkin dapat menjelaskan fenomena pada grafik beban vs displacement yang memperlihatkan hasil lebih tinggi dari kondisi asli.

Dari grafik gaya dan lendutan didapat nilai daktilitas lendutan dari rasio nilai lendutan terjauh dengan lendutan saat leleh. Nilai daktilitas lendutan berdasarkan hasil eksperimental didapat sebesar 2,3. Nilai ini berada dibawah batas ketentuan

untuk daktilitas lendutan yaitu lebih dari sama dengan 3 [5] dan masuk dalam kategori resiko seismik rendah [4].

Dari hasil analisa tersebut dapat dibuktikan bahwa walaupun penulangan tiang pancang jenis *spun pile* dibawah persyaratan SNI 2847-2013 dan SNI 1726-2012 tiang pancang dapat memberikan respon yang daktail ketika diberi beban lentur murni. Walaupun nilai daktilitas berada dibawah ketentuan bukan berarti tiang tidak layak digunakan. Untuk menentukan tiang layak atau tidak, kajian lanjut mengenai kinerja tiang sebagai kesatuan suatu struktur perlu dilakukan.

VI. SARAN

Untuk beton mutu tinggi di atas $f'c$ 50 dan mutu baja tinggi perhitungan lebih sesuai menggunakan teori *strain compability*. Permodelan elemen hingga *spun pile* belum memodelkan kepala tiang pancang. Model material pada program bantu sebaiknya menggunakan hasil uji langsung benda uji.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] SNI 2847:2013. 2013. Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- [2] SNI 1726:2012. 2012. Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- [3] Tavo, and Benny Kusuma. 2010. "Studi Analitis Pengaruh Pengekangan Terhadap Kapasitas Interaksi P-M Tiang Pancang Prategang." Konferensi Nasional Teknik Sipil 4.
- [4] Budek, Andrew, and Gianmario Benzoni. 2009. "Obtaining Ductile Performance From Precast, Prestressed Concrete Piles." PCI Journal.
- [5] Hawkis, Neil M., dan S. K. Ghosh. 2000. "Proposed Revision to 1997 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulation for Precast Concrete Structures Part 2-Seismic-Force-Resisting System." PCI Journal 35.
- [6] Raka, I Gusti Putu. 2013. "Duktilitas Penampang Tiang Pancang Beton Pratekan Pratarik Bulat Berongga Hasil Pematatan Sentrifugal." Seminar Nasional IX – 2013 Teknik Sipil ITS Surabaya.
- [7] Japanese Industrial Standard. 1987. Pretensioned Spun Concrete Piles. JIS A 5335, Japan: Japan Standards Association.
- [8] Lin, T. Y., and H. Burns. 1989. Desain Struktur Beton Prategang. Jakarta: Erlangga.
- [9] Nawy, Edward G. 2009. Reinforced Concrete-A Fundamental Approach. New Jersey: Pearson Education.
- [10] Popov, Egor P. 1978. Mechanics of Materials. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.,
- [11] Turner-Fairbank Highway Research Center. 2006. Optimized Sections for High-Strength Concrete Bridge Girders — Effect of Deck Concrete Strength. McLean: U.S. Department of Transportation-Federal Highway Administration.