

## Pengaruh pengisian beton dan penambahan tulangan untuk perkuatan *spun pile* terhadap kekuatan dan daktilitas lentur

Muhammad Naufal Widodo<sup>1,\*</sup>, Andreas Triwiyono<sup>2</sup>, Hary Christady Hardiyatmo<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik,  
Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

### Article Info

Available online

### Keyword:

Spun pile  
Flexural Strength  
Ductility  
ABAQUS CAE

### Corresponding Author:

Muhammad Naufal Widodo  
\*muhammadnaufal97@mail.  
ugm.ac.id

### Abstract

*The spun pile is a structural component that can accept lateral loads that cause internal forces in the form of bending moments. In the field, the need to use spun piles as the foundation of a building has been widely used. However, the availability of spun pile types in the area is sometimes not under the strength requirements of the building, and it can be insufficient or even vice versa. This resulted in the use of spun piles being less effective and efficient.*

*This research was conducted to find out the effect of the spun pile when the inside of the spun pile is filled with concrete and reinforcement. This research begins by finding the ideal mesh size. Carry out a validation test by comparing the moment and deflection values in the numerical modeling compared to the experimental results. The research continued by providing variations on the model by filling the inside of the spun pile with concrete and reinforcement.*

*The mesh size in this model is 30 mm. From the modeling of the three variations that have been carried out, in variation one, there is an increase in strength at the maximum moment of 10,01%. In variation two, there is an increase in strength at maximum moment of 15,72%. In variation three, there is an increase in strength at maximum moment of 16,85%. However, the difference in the results of variation two and variation 3 was not too significant, and there was only an increase in strength of 1.13%.*

Copyright © 2023 Universitas Islam Indonesia  
All rights reserved

### Pendahuluan

Batang tekan berpenampang lingkaran sudah banyak dikembangkan dalam dunia konstruksi. Batang tekan berpenampang lingkaran dikembangkan menjadi batang tekan berpenampang lingkaran berongga atau dikenal dengan sebutan *spun pile* seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Tiang Pancang *Spun Pile*

Batang tekan berpenampang lingkaran berongga dengan spiral sebagai tulangan lateral dapat berfungsi sebagai pengekang, selain lebih kuat kolom menjadi lebih daktil. *Spun pile* merupakan komponen struktur yang dapat menerima beban lateral berupa momen lentur yang relatif besar. Menurut Lin dan Burns (1989) sebuah konstruksi tiang pancang dalam fungsinya tidak hanya menerima beban aksial.

Beban lateral pada *spun pile* dapat menimbulkan lendutan, berupa beban angin, beban seismik maupun beban yang terjadi selama masa pelaksanaan pekerjaan. Penelitian mengenai *spun pile* akibat dari beban seismik menyimpulkan bahwa pola kegagalan dari *spun pile* adalah berupa kegagalan getas. Menurut Budek (1997) kegagalan awal terjadi karena ledakan dipermukaan lubang bagian dalam dari *spun pile*.

Saat terbabani lentur dapat terjadi retak dan beton mengalami daktilitas, sehingga beton mencapai regangan batasnya. Sistem prategang telah diaplikasikan untuk mengatasi hal tersebut. Lendutan dan retak yang terjadi akan berkurang. Metode untuk meningkatkan daktilitas *spun pile* juga bisa dengan pengisian beton pada rongga *spun pile*.

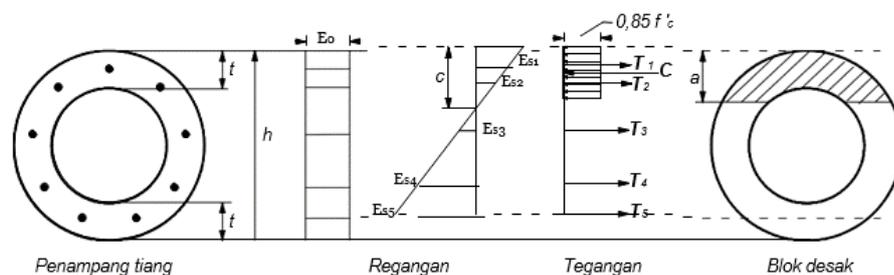
Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari *spun pile* yang diisi dengan beton dan ditambah tulangan normal pada beton isi. Analisis non linier dilakukan menggunakan *software* ABAQUS CAE. Pemodelan *spun pile* pada *software* sesuai dengan benda uji yang telah diteliti Laboratorium Teknik ITS, yaitu panjang 6 m dengan diameter luar 40 cm dan diameter lubang 25 cm. Variasi pengisian beton menggunakan  $f'_c$  25 MPa dan penambahan tulangan normal pada beton isi yaitu besi D10 dan D13.

**Landasan Teori**

**Distribusi regangan *spun pile***

Menurut Tavio dan Kusuma (2010) pada beton pratekan, distribusi regangannya tidak sama dengan distribusi regangan beton bertulang biasa.

Akibat gaya pratekan menjadikan beton prategang mengalami regangan awal yang diterapkan pada penampang sebesar  $\epsilon_0$ . Pada distribusi tegangan dan regangan yang ditunjukkan pada Gambar 2, gaya tendon prategang pada bagian tarik ( $T_T$ ) dan tekan ( $T_C$ ) dari pusat plastis akan dikurangi gaya yang hilang karena gaya prategang.

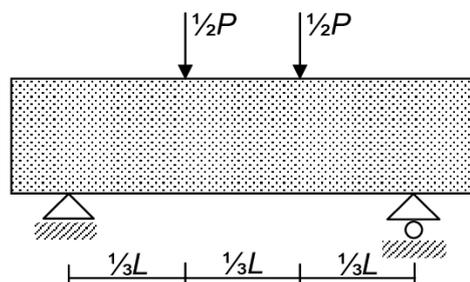


Gambar 2. Distribusi regangan dan tegangan penampang silinder berongga (Tavio dan Kusuma, 2010)

**Permodelan lentur murni**

Pemodelan *spun pile* dimodelkan berdasarkan peraturan JIS 5335-1987 tentang penguian lentur. Metode tersebut memberikan pembebanan dua titik pada tengah bentang. Hal tersebut dilakukan dengan tujuan untuk menghilangkan gaya

geser pada tengah bentang sehingga beban yang terjadi pada tengah bentang adalah beban lentur murni. Pembebanan dengan metode JIS 5335-1987 ditunjukkan pada Gambar 3.



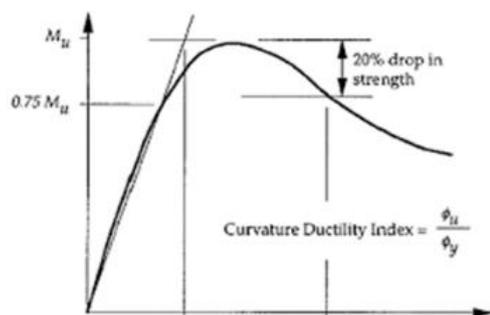
Gambar 3. Permodelan metode JIS 5338-1987

Pemberian beban secara bertahap dengan menggunakan metode seperti gambar diatas akan digunakan pada *spun pile* penelitian ini. pemberian beban dilakukan secara bertahap hingga *spun pile* mengalami kegagalan kemudian didapatkan data hasil beban dan lendutan yang akan diplotkan menjadi sebuah grafik.

### Daktilitas

Daktilitas merupakan kemampuan struktur untuk berdeformasi secara signifikan tanpa mengalami penurunan kekuatan yang berarti.

Penentuan nilai daktilitas dapat diilustrasikan berdasarkan idealisasi kurva hubungan beban-lendutan pada Gambar 4 (El Tawil dan Deierlein, 1999).



Gambar 4. Hubungan Beban Lendutan

Menentukan nilai daktilitas dilakukan dengan perbandingan antara defleksi ultimit dengan defleksi saat leleh pertama. Besarnya nilai daktilitas ( $\mu$ ) dinyatakan pada Pers. (1) sebagai berikut:

$$\mu = \frac{\delta u}{\delta y} \quad (1)$$

Kerangan:

$\mu$  = displacement ductility factor

$\delta u$  = lendutan ultimit (mm)

$\delta y$  = lendutan saat leleh (mm)

### Permodelan finite element

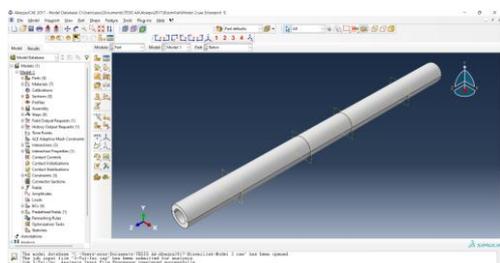
Permodelan elemen hingga merupakan salah satu metode numerik untuk menyelesaikan permasalahan rekayasa dengan cara membagi-bagi model atau benda yang akan dilakukan analisa menjadi sebuah elemen-elemen yang berhingga yang saling berkaitan satu sama lain.

Bathe (2014) menyampaikan bahwa metode elemen hingga digunakan untuk memecahkan masalah berbagai permasalahan desain dan teknik. Masalah seperti pembebanan struktur yang dipengaruhi berbagai macam komponen. Elemen hingga juga digunakan dalam masalah teknik praktis dengan bantuan komputer atau program digital. Elemen hingga merupakan metode penyelesaian masalah yang baik dalam masalah teknik dikarenakan metode elemen hingga memperhatikan aspek analisis teknik dan material. Keunggulan aplikasi metode elemen hingga adalah kompatibilitas penyelesaian masalah pada begitu banyak elemen struktur seperti *solid* dan *wire*, permasalahan statik dan dinamik, dan sebagainya.

### Program abaqus

Program yang digunakan untuk analisis elemen hingga salah satunya yaitu Abaqus FEA (*Finite Element Analysis*) dan Abaqus CAE (*Computer-Aided Engineering*) yang telah dirilis pada tahun 1978. Program ini dapat menyelesaikan pemodelan elemen hingga baik pemodelan linear maupun non-linear. Program pemodelan elemen hingga ini pada umumnya digunakan untuk pemodelan dan analisis untuk menyelesaikan problem pemodelan dengan respon statik, dinamik, thermal, listrik dan

elektromagnetik. *User Interface* Abaqus CAE ditunjukkan oleh Gambar 5.

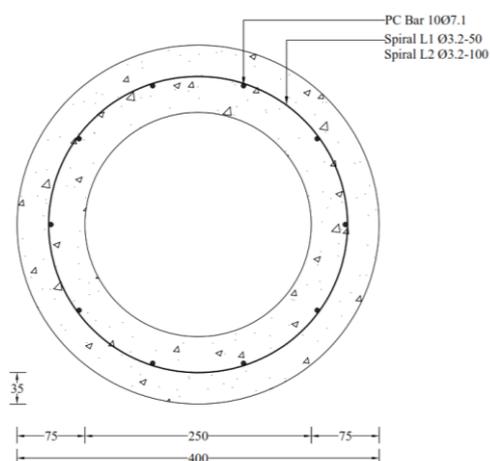


Gambar 5. *User Interface* Abaqus CAE 2017

## Metode Penelitian

### Data penelitian

Data awal penelitian diacu pada eksperimen yang telah dilakukan oleh Putra dkk (2015) dengan memodelkan *spun pile* sesuai dengan eksperimen pengujian kuat lentur yang telah dilakukan Laboratorium Struktur Jurusan Teknik Sipil ITS. Pada eksperimen tersebut digunakan *spun pile* yang dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Penampang *Spun Pile*

### Data pemodelan *spun pile*

Pembuatan permodelan menggunakan program bantu Abaqus CAE dengan melalui tiga tahapan yaitu *preprocessing*, *solutions*, *postprocessing*. *Preprocessing* adalah tahap persiapan yang terdiri dari pembuatan geometri model, material, dan perakitan model. *Solutions* merupakan

tahap pembuatan geometri menjadi bagian elemen-elemen. *Postprocessing* meliputi analisa program dan visualisasi.

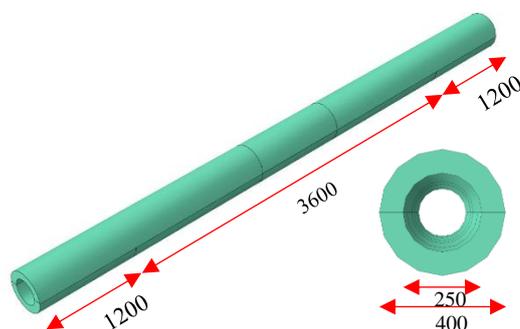
Simulasi dimulai dengan memilih pemodelan Standard Explicit Model dan membuka file baru untuk mulai simulasi numerik dengan Abaqus. Berikut merupakan module utama dalam pemodelan elemen hingga dengan Abaqus:

- a. Part Module
- b. Property Module
- c. Assembly Module
- d. Step Module
- e. Interaction Module
- f. Load Module
- g. Mesh Module

### Permodelan dan penulangan *spun pile*

*Part module* digunakan untuk merancang bagian-bagian model secara detail. Bagian-bagian tersebut akan dijadikan satu pada modul *assembly*. Permodelan *spun pile* pada penelitian ini memiliki dimensi luar 400 mm, dimensi dalam 250 mm dengan panjang 6000 mm. Dengan tulangan tendon berdiameter 7,1 mm dan diameter tulangan spiral 3,2 mm dengan jarak untuk bagian tumpuan 50 mm dan lapangan 100 mm. Permodelan *spun pile* pada aplikasi Abaqus CAE dapat dilihat pada Gambar 7.

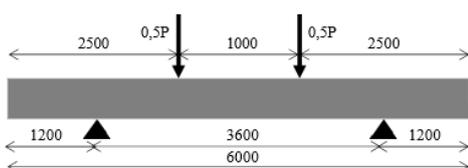
Pemodelan penulangan pada penelitian ini memiliki dua tipe tulangan. Tulangan tendon dengan diameter 7,1 mm digunakan sebagai tulangan longitudinal dan tulangan spiral dengan diameter 3,2 mm sebagai tulangan Sengkang. Pemodelan dan penulangan *spun pile* pada aplikasi Abaqus CAE dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Permodelan *spun pile* di aplikasi Abaqus CAE

**Pemodelan pembebanan**

Pembebanan *spun pile* pada penelitian ini digunakan system pembebanan dua titik pada tengah bentang. Pembebanan berdasarkan peraturan JIS 5335-1987 tentang pengujian lentur yang ditunjukkan pada Gambar 8. Pada penelitian sebelumnya mengenai pengujian monotonic load pada hollow *spun pile* yang dilakukan Irawan (2020), digunakan system pembebanan yang sama berdasarkan JIS 5335-1987. Pembebanan dua titik pada tengah bentang akan menghilangkan gaya geser pada tengah bentang. Akibat hal tersebut beban pada tengah bentang merupakan beban lentur murni.



Gambar 8. Permodelan uji lentur JIS 5335-1987

**Material**

Pemilihan spesifikasi material yang digunakan pada penelitian ini menggunakan data material eksperimen *spun pile* yang telah dilakukan oleh Laboratorium Struktur Teknik Sipil ITS, spesifikasi material yang digunakan tersebut sesuai dengan yang tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1. Material dan mutu *spun pile*

Material	Keterangan
Beton	$f'c = 52$ Mpa
Beton Pengisi	$f'c = 25$ Mpa
Spiral	$Fy = 440$ Mpa & $f_u = 540$ Mpa
Tendon	$Fpy = 1275$ Mpa & $fpu = 1420$ Mpa

Berat jenis beton mengacu pada penelitian yang dilakukan Federal Highway Administration (FHWA). Nilai modulus elastisitas beton dihitung berdasarkan SNI 2847-2019. Nilai material elastis yang dimasukkan dalam pemodelan sesuai dengan Tabel 2. Material plastis yang dimasukkan berupa parameter *concrete damage plasticity* berdasarkan penelitian Kmiecik (2011) dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 2. Material elastis pada pemodelan

	Beton	Baja
Mass	$2,364 \cdot 10^{-5}$	$7,85 \cdot 10^{-5}$
Density	N/mm <sup>3</sup>	N/mm <sup>3</sup>
Young's Modulus	36.055,513	200.000
Poisson's ratio	0,2	0,3

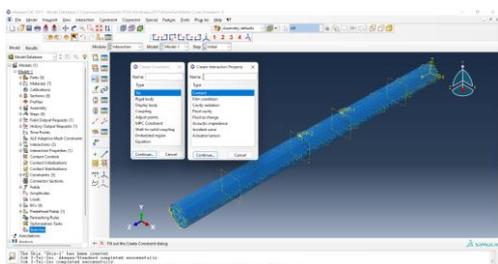
Tabel 3. Material plastis pada pemodelan

Dilation Angle	38
Eccentricity	0,1
$Fb0/fc0$	1,16
K	0,6667
Viscosity Parameter	0,0001

**Pengaturan interaksi pada model**

Interaksi antar bagian diatur apabila ada 2 part yang saling bersentuhan. Interaksi yang diatur pada pemodelan ini berupa *constrain* dan *contact*. Interaksi diasumsikan sebagai *perfect bound* dimodelkan dengan *constrain* berupa *embedded Region* khusus pada interaksi tulangan dan beton, pada interaksi ini tulangan sebagai *embedded region* dan beton sebagai *host region*. Interaksi antara beton *spun pile* dengan beton pengisi *spun pile* diatur sebagai *surface to surface*

contact dikarenakan kedua objek tersebut tidak saling terikat satu sama lain namun saling bersentuhan, pada interaksi ini beton *spun pile* sebagai *master surface* dan beton pengisi *spun pile* sebagai *slave surface*. Pengaturan interaksi pada model dengan modul interaksi ditunjukkan pada Gambar 9.



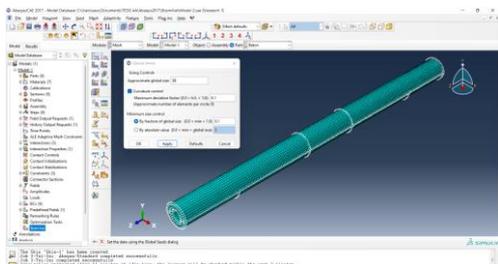
Gambar 9. Pengaturan interaksi antar model

### Pengaturan mesh tiap part

Mesh pada tiap part yang dimodelkan pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Beton pada *Spun Pile* dimodelkan dengan elemen *solid 3D* yang berupa elemen *3D8R (continuum 3D, 8-node linear brick, reduced integration)*
2. Tulangan tendon dan *spiral* dimodelkan dengan elemen *truss 2D* yang berupa elemen *T3D2 (truss 3D, 2-node linear truss)*.

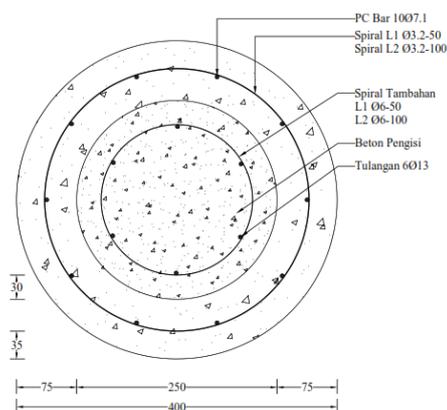
Ukuran *mesh* tersebut dapat diatur pada menu *seed part*. Ukuran *mesh* yang memenuhi tes konvergensi *mesh* akan digunakan di pemodelan plastis. Pengaturan modul *mesh* diberikan pada Gambar 10.



Gambar 10. Pengaturan ukuran mesh

### Variasi penelitian

Pada penelitian ini terdapat tiga variasi pemodelan. Variasi pertama berupa pengisian beton pada lubang *spun pile*. Variasi kedua berupa pengisian beton dan penambahan tulangan D10 pada lubang *spun pile*. Variasi ketiga yaitu pengisian beton dan penambahan tulangan D13 pada lubang *spun pile*. Pada variasi dua dan tiga ditambahkan juga tulangan D6 sebagai tulangan Sengkang. Visualisasi variasi pemodelan dapat dilihat pada Gambar 11.

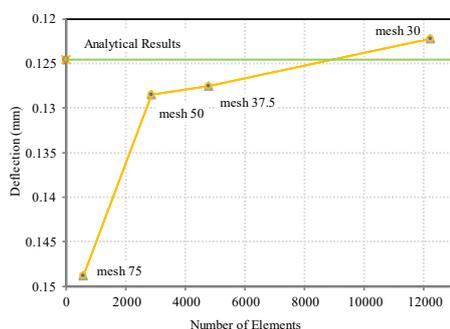


Gambar 11. Variasi penambahan beton dan tulangan disisi dalam *spun pile*

### Hasil Analisis

#### Uji konvergensi

Uji konvergensi dilakukan dengan cara membandingkan nilai defleksi yang terjadi pada hasil pemodelan linier dengan hitungan analitik *simple beam*. Uji konvergensi dilakukan dengan melakukan beberapa *running* pemodelan dengan variasi beberapa ukuran *mesh*. Dari hasil *running* pemodelan tersebut didapatkan 4 nilai defleksi yang akan diplot menjadi sebuah grafik. Apabila grafik telah menunjukkan sifat asimtotik ukuran *mesh* yang digunakan dapat dipilih. Grafik hasil uji konvergensi ukuran *mesh* dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Hasil Uji Konvergensi

Dari grafik tersebut dapat dilihat garis yang telah diplot sudah mendekati sifat asimtotik pada ukuran *mesh* 30. Berikut ini data hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Data Hasil Uji Konvergensi

Ukuran <i>Mesh</i> (mm)	Jumlah elemen (n)	Defleksi <i>spun pile</i> (mm)	<i>error</i> (%)
75	576	0,1488	2,428
50	2880	0,1285	0,398
37.5	4800	0,1275	0,298
<b>30</b>	<b>12240</b>	<b>0,1222</b>	<b>0,232</b>
<b>Analitik</b>	-	<b>0,1245</b>	-

Dari hasil uji konvergensi tersebut didapatkan bahwa ukuran *mesh* 30 merupakan ukuran yang tepat. *Mesh* 30 memiliki nilai *error* yang terkecil (0,232%) dibandingkan dengan ukuran *mesh* lainnya. Setelah ukuran *mesh* didapatkan, ukuran *mesh* tersebut digunakan untuk pemodelan plastis.

### Pembebanan pada model

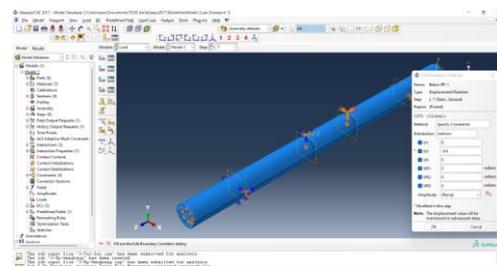
Pembebanan pada penelitian ini dilakukan dengan metode pembebanan dua titik pada tengah bentang. Pembebanan dilakukan dengan cara memberikan beban defleksi (*deflection*) pada pemodelan. Pembebanan defleksi dilakukan dengan cara memasukan atau memberikan beban pada arah gravitasi (sumbu y) dengan nilai tertentu. Nilai yang digunakan pada pemodelan ini untuk *input deflection loading* sesuai dengan defleksi maksimum yang terjadi pada model eksperimental

yaitu 9,19 mm. Pembebanan pada pemodelan ini dibagi menjadi 7 *step* pembebanan. Pemberian beban defleksi pada setiap *Step* pada pemodelan dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Beban defleksi setiap *step*

<i>Step</i>	Beban Defleksi
<i>Initial</i>	-
1	1,5
2	3
3	4,5
4	6
5	7,5
6	9
7	10,5
8	13
9	14,5
10	16

Pemodelan *spun pile* ini, titik pembebanan defleksi pada model diberi perpindahan sejauh 50mm ke arah berlawanan gravitasi yang ditujukan untuk dapat mengakomodasi variasi kekuatan lain. Titik pembebanan pada model Abaqus tunjukan oleh gambar 13.

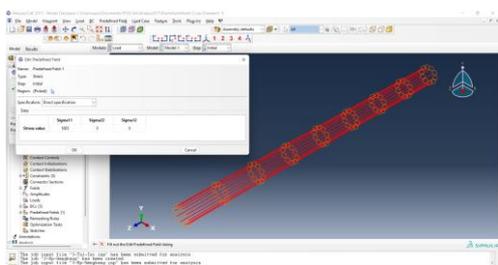


Gambar 13. Titik pembebanan *spun pile*

### Stressing pada tendon

Pada pemodelan *spun pile* tendon yang terdapat pada model *spun pile* tersebut perlu diberikan beban prategang, dimana hal ini agar sesuai dengan uji eksperimen yang telah dilakukan. Gaya prategang yang dimasukan yaitu diambil dari nilai 0,75% dari nilai leleh maksimum tendon (1420 MPa). Gaya prategang tersebut diberikan kesetiap tulangan tendon sebesar 1065 MPa. Pemberian beban prategang pada pemodelan dilakukan pada *step initial*, agar beban prategang tersebut

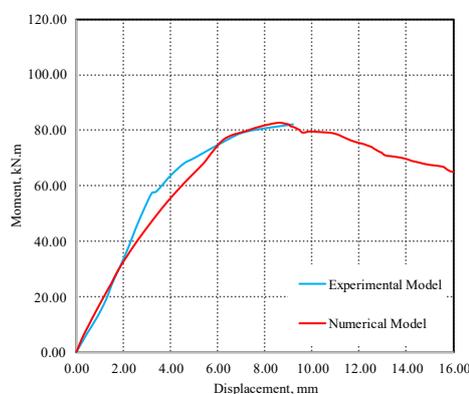
bekerja terlebih dahulu sebelum dimulainya *step* pembebanan defleksi. Pemberian beban prategang pada Abaqus dapat melalui modul *load* yaitu bagian *input predefined field*. Pemberian beban prategang pada tendon di Abaqus dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Pemberian beban Prategang pada tendon

### Validasi pemodelan

Uji validasi pada penilitan ini dilakukan dengan membandingkan nilai momen dan defleksi hasil pemodelan numerik dengan hasil pengujian eksperimen. Hasil *running* pemodelan spun pile yang didapat pada aplikasi Abaqus CAE berupa nilai gaya dan defleksi. Dilakukan konversi dari nilai gaya yang diperoleh menjadi nilai momen agar dapat dibandingkan dengan data hasil pengujian eksperimen. Grafik nilai momen dan defleksi dari hasil *running* pemodelan spun pile yang dibandingkan dengan hasil pengujian eksperimen ditunjukkan pada Gambar 15.



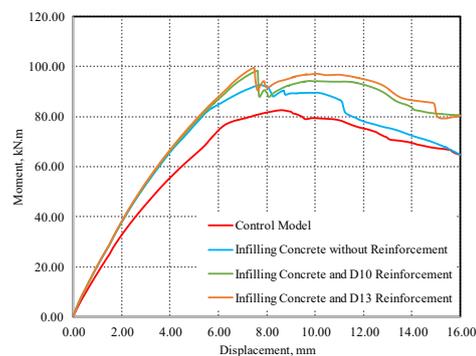
Gambar 15. Grafik perbandingan model numerical dan eksperimental

Dari grafik perbandingan nilai momen dan defleksi diatas, hasil nilai momen numerical sudah mendekati hasil nilai momen pengujian eksperimen. Hasil momen maksimum yang dicapai pemodelan numerik sebesar 86,62 kNm sedangkan hasil momen maksimum dari pengujian eksperimen 82,23 kNm. Hanya terdapat nilai error sebesar 0,38%. Dari hasil tersebut, pemodelan numerical dianggap dapat mewakili penelitian eksperimental.

### Hasil variasi pemodelan

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari pengisian beton pada dan penambahan tulangan pada lubang spun pile terhadap kekuatan dan daktilitas lentur spun pile. Terdapat tiga variasi pada penelitian ini, yaitu: (1) Pengisian beton tanpa tulangan; (2) Pengisian beton dan tulangan D10; (3) Pengisian beton dan tulangan D13.

Hasil *running* variasi pemodelan spun pile menunjukkan bahwa dari ketiga variasi pemodelan terdapat kenaikan kekuatan yang dapat dilihat pada Gambar 16 dan Tabel 6. Kenaikan nilai momen maksimum pada ketiga variasi pemodelan tersebut akibat dari adanya variasi pengisian dan penambahan tulangan pada lubang *spun pile*.



Gambar 16. Grafik perbandingan model control dengan seluruh model variasi

Tabel 6. Rangkuman *cracking* dan *ultimate moment* pada pemodelan *spun pile*

Spesimen	Moment, kNm	
	Crack	Ultimate
Model Control	4,09	82,61
Pengisian beton tanpa tulangan	55,41	92,62
Pengisian beton dan tulangan D10	59,74	98,33
Pengisian beton dan tulangan D13	59,15	99,46

## **Pembahasan**

### ***Pengisian beton tanpa tulangan (variasi 1)***

Variabel yang ditambahkan pada variasi pertama yaitu dengan mengisi bagian lubang spun pile dengan beton. Karakteristik beton pengisi berbeda dengan beton spun pile yang digunakan sebagai uji validasi. Karakteristik beton yang digunakan untuk pengisian menggunakan  $F'c$  25 MPa.

Dapat dilihat pada Gambar 12 dan Tabel 6, terdapat kenaikan kekuatan momen maksimum pada variasi pengisian beton tanpa tulangan. Hasil nilai momen maksimum pada pemodelan control yaitu 82,61 kNm sedangkan pada variasi pemodelan pengisian beton tanpa tulangan yaitu 92,62 kNm. Terdapat pertambahan kekuatan momen maksimumnya sebesar 10,01%. Kenaikan nilai momen maksimum menunjukkan bahwa terjadi pengaruh pada spun pile akibat dari pengisian beton pada lubang spun pile.

### ***Pengisian beton dan tulangan D10 (variasi 2)***

Karakteristik beton yang digunakan untuk mengisi bagian lubang spun pile sama dengan pemodelan variasi satu. Pada pemodelan variasi ini, ditambahkan tulangan longitudinal D10 dan tulangan spiral D6 untuk Sengkang. Pemilihan penggunaan tulangan D10 karena syarat minimal rasio tulangan untuk kolom tidak boleh kurang dari 0,01 (1%). Pemilihan tulangan ini juga didasarkan pada kemudahan dalam mencari tulangan di lingkungan proyek.

Dapat dilihat pada Gambar 12 dan Tabel 6, pemodelan variasi pengisian beton dan penambahan tulangan D10 kekuatan momen maksimumnya mencapai 98,33 kNm. Nilai momen maksimum tersebut mengalami peningkatan kekuatan sebesar 15,72% dibandingkan dengan model control. Terlihat pada grafik hasil pemodelan, pada akhir garis terlihat bahwa grafik menjadi lebih landai. Hal ini menandakan bahwa terdapat peningkatan nilai daktilitas spun pile terhadap lentur. Penambahan tulangan pada variasi ini menunjukkan bahwa tulangan mampu menyebabkan kenaikan nilai momen maksimum dan nilai daktilitas spun pile terhadap lentur.

### ***Pengisian beton dan tulangan D13 (variasi 3)***

Pada variasi ketiga, variabel yang ditambahkan sama dengan variasi kedua. Perbedaan pada variasi ini yaitu menggunakan tulangan D13 untuk tulangan longitudinalnya.

Dari hasil running pemodelan variasi ketiga, didapatkan hasil bahwa terdapat kenaikan nilai momen maksimum sebesar 16,85% terhadap model control yang dapat dilihat pada Gambar 12 dan Tabel 6. Variasi pemodelan ketiga, nilai momen maksimumnya mencapai 99,46 kNm sedangkan model control hanya 82,61 kNm.

Pada pemodelan variasi ketiga hasil nilai kenaikan nilai momen maksimumnya tidak terlalu signifikan apabila dibandingkan dengan variasi kedua. Perbandingan nilai kekuatan antara variasi menggunakan tulangan D10 dan D13 hanya terjadi peningkatan kekuatan momen maksimum sebesar 1,13%. Hal ini memandakan bahwa tidak terlalu berpengaruh perubahan variasi tulangan D10 menjadi D13. Hal tersebut didasarkan pada hasil momen maksimum yang awalnya 98,33 kNm meningkat menjadi 99,46 kNm.

## Kesimpulan Dan Saran

### Kesimpulan

Dari hasil dan pembahasan pada bab sebelumnya, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil ukuran *mesh* yang ideal pada pemodelan numerik yang dilakukan pada penelitian ini adalah 30 mm.
2. Pada penelitian ini hasil numerik telah sesuai atau mendekati dengan hasil penelitian eksperimental. Hal tersebut diketahui dari perbandingan grafik antara hasil numerik dan hasil eksperimen yang dapat dilihat pada Gambar 15. Dari hasil grafik tersebut terlihat bahwa hasil momen maksimum yang dicapai telah mendekati. Pada permodelan numerik didapatkan nilai momen maksimum sebesar 82,61 kN.m dan untuk eksperimental sebesar 82,23 kN.m dengan *error* 0,38%. Dari hasil tersebut dapat model numerikal dianggap sudah sesuai atau dapat mewakili penelitian eksperimental.
3. Pada variasi 1 terdapat penambahan kekuatan pada momen maksimum sebesar 10,01%. Pada variasi 2, terjadi penambahan kekuatan pada momen maksimum sebesar 16,85%. Pada variasi 3, terdapat penambahan kekuatan sebesar 15,72% pada momen maksimum yang dapat diterima oleh *spun pile*. Namun perbedaan hasil dari variasi 2 dan variasi 3 tidak terlalu signifikan, hanya terjadi penambahan kekuatan sebesar 1,13% saja. Ini menandakan bahwa tidak terlalu berpengaruh perubahan tulangan D10 menjadi D13.

### Saran

Peneliti menyadari betul bahwa penelitian ini masih memiliki kekurangan, oleh sebab itu hal yang dapat dilakukan untuk

menyempurnakan penelitian ini diantaranya adalah:

1. Pada penelitian ini model tulangan *spiral* dibuat dengan menyederhanakan bentuknya menjadi lingkaran, seharusnya dapat dikembangkan menjadi bentuk *spiral* sesuai dengan kondisi dilapangan.
2. Permodelan *spun pile* pada penelitian ini, belum memodelkan kepala tiang pancang.
3. Perlu dilakukan kajian lebih lanjut mengenai interaksi antara permukaan beton *spun pile* dengan beton pengisi *spun pile* agar interaksi dapat sesuai dengan kondisi nyata dilapangan.

### DAFTAR PUSTAKA

- Akiyama, M., Abe, S., Aoki, N., & Suzuki, M. (2012). Flexural Test Of Precast High-Strength Reinforced Concrete Pile Prestressed With Unbonded Bars Arranged At The Center Of The Cross-Section. *Elsevier*.
- Budek, A. M., Benzoni, G. & Priestley, M. J. N., 1997. Experimental Investigation of Ductility of In-ground Hinges in Solid and Hollow Prestressed Piles, San Diego: University of California.
- Budek, A., & Benzoni, G. (2009). Obtaining Ductile Performance From Precast, Prestressed Concrete Piles. *PCI Jurnal*.
- Conte, E., Troncone, A., & Vena, M. (2012). Nonlinear Three-Dimensional Analysis Of Reinforced Concrete Piles Subjected To Horizontal Loading. *Elsevier*.
- El Tawil, S. dan Deierlein, G. G. (1999). Strength and Ductility of Concrete Encased Composite Columns, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125. No. 9.

- Greenwood, & Michael, S. (2008). Analytical Performance Evaluation of Hollow Prestressed Piles and Pile Cap Connections In The 1-5 Ravenna Bridge.
- Irawan, C. et al., (2016). The Eperimental Investigation of Failure Mechanism of Spun Pile due to Monotonic Loading using NEHRP 2000. Beijing, 4th International Conference on Protective Structures (ICPS4).
- Irawan, C. et al., (2020). The Effect of The Presence of Infilling Concrete on Flexural Performance of Spun Pile - An Experimental Study. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, LXXXII(1), pp. 85-94.
- Japanese Industrial Standard. (1987). *Pretensioned Spun Concrete Piles*. JIS A 5335. Japan: Japan Standards Association.
- Kmiecik, P., and M. Kaminski. (2011). Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration, *Archives Of Civil And Mechanical Engineering*.
- Lin, T. Y., & Burns, N. H. (1989). *Desain Struktur Beton Prategang* (Vol. 3). Jakarta: Erlangga.
- Popov, E. P. (1978). *Mechanics of Materials*. New Jersey: Prentice-Hall. Inc.
- Putra, D. D., Siswanto, B., Raka, I. G., & Irawan, C. (2015). Evaluasi Kekuatan Tiang Pancang Jenis Spun Pile Diameter 400 mm Dibawah Pengaruh Beban Lentur Murni Dan Aksial Dengan Bantuan Program Finite Element. *Teknik Sipil ITS Surabaya*.
- SNI 2847:2019. (2019). Persyaratan beton struktural untuk bangunan Gedung, Badan Standardisasi Nasional.
- Tavio, & Kusuma, B. (2010). Studi Analitis Pengaruh Pengekangan Terhadap Kapasitas Interaksi P-M Tiang Pancang Tegang. *Konferensi Nasional Teknik Sipil*. Bali.
- 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.
- Wang, C.-K., & Salmon, C. G. (1999). *Desain Beton Bertulang* (Vol. 4). (B. Hariandja, Trans.) Jakarta: Erlangga.
- Zhang, J., & Hutchinson, T. C. (2012). *Inelastic Pile Behavior With And Without Liquefaction Effects*. Elsevier.