

Studi Numerik Sambungan Spun Pile Terhadap Pile Cap Dengan Dan Tanpa Beton Pengisi Akibat Pembebanan Siklik

Vania Callista¹⁾, Yuskar Lase²⁾, Widjojo Adi Prakoso³⁾, Mulia Orientilize⁴⁾

^{1, 2, 3, 4)} Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok

Email: vania.callista71@ui.ac.id¹⁾, yuskar@eng.ui.ac.id²⁾, wprakoso@eng.ui.ac.id³⁾, mulia@eng.ui.ac.id⁴⁾

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v12i1.681>

(Received: December 2021 / Revised: February 2022 / Accepted: February 2022)

Abstrak

Berdasarkan SNI 8460, *spun pile* sebagai struktur bawah didesain belum menggunakan konsep *performance-based design* (PBD) karena pertimbangan sulitnya proses perbaikan, meskipun PBD sudah diperbolehkan di negara lain. Peta gempa tahun 2017 menunjukkan adanya peningkatan *seismic demand* di Indonesia yang menyebabkan desain fondasi yang tidak efisien jika perilaku *inelastic* pada pondasi akibat gempa besar tidak diperbolehkan. Untuk mempelajari perilaku *inelastic* pondasi, tiga sambungan *spun pile* berukuran *full scale* diuji dengan pembebanan siklik horizontal. Analisis lanjutan dengan *finite element* (FE) dilakukan menggunakan Abaqus. Karena kurangnya jumlah tulangan geser (spiral) pada *spun pile* yang ada di Indonesia, efek *confinement* dari pemodelan tulangan spiral dibandingkan dengan pemodelan jika spiral disederhanakan sebagai *hoops*. Analisis FE juga dilakukan untuk mempelajari perbandingan perilaku antara *spun pile* kosong dan dengan beton pengisi dalam hal kekuatan, daktilitas dan *performance levels* dari sambungan *spun pile*.

Kata kunci: *sambungan spun pile, performance-based design, the effect of concrete infill, daktilitas*

Abstract

According to SNI 8640, *spun pile* as part of lower structure is not designed with the concept of *performance-based design* (PBD) because of repair issues, although PBD has been allowed for lower structures in other countries. According to the 2017 seismic zone, the increasing seismic demand in Indonesia results in an inefficient foundation design if *inelastic* behavior of foundation due to a big earthquake is not allowed. Three full scales of *spun pile* connections were tested with lateral cyclic loading to explore the *inelastic* behavior of foundation. A *finite element* (FE) analysis using Abaqus was conducted for further study. Due to low number of *spun pile*'s shear reinforcement (spiral) produced in Indonesia, the *confinement* effect of spiral model is compared with *hoops* model. *Finite element* analysis was also done to investigate the behavior difference of hollow *spun pile* and *spun pile* with concrete infill in terms of strength, ductility, and *performance levels* of *spun pile*'s connection.

Keywords: *spun pile connection, performance-based design, the effect of concrete infill, ductility*

1. Latar Belakang

Desain struktur pondasi akibat gempa (Badan Standarisasi Nasional, 2017) di Indonesia masih berdasarkan konsep desain konvensional yang tidak mengizinkan struktur pondasi mengalami kerusakan karena sulitnya proses perbaikan. SNI 8460:2017 pasal 9.7.3.1 (Badan Standarisasi Nasional, 2017) menyebutkan bahwa “Estimasi kapasitas lateral tiang sesuai dengan besar deformasi lateral izin kepala tiang. Besar deformasi lateral izin tiang adalah 12 mm untuk gempa rencana dan 25 mm untuk gempa kuat dalam kondisi tiang tunggal dan *freehead*.” Berdasarkan ketentuan ini, tiang tidak diizinkan mengalami kerusakan karena kecilnya batasan lendutan horizontal maksimum yang diizinkan sehingga desain struktur pondasi menjadi tidak ekonomis. Hal ini berlawanan dengan kecenderungan peningkatan potensi bahaya gempa dan pengendalian aspek finansial struktur.

Negara-negara dengan risiko gempa tinggi, seperti Jepang, New Zealand dan Amerika telah beralih ke *performance-based design* (PBD) dalam desain pondasi. Beberapa peraturan sudah memuat PBD dalam *design code*, seperti AASHTO 2011 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011), Japan Road Association 2012 untuk jembatan (Japan Road Association, 2012), dan ASCE 61-14 untuk dermaga (American Society of Civil Engineers, 2014). Suatu saat Indonesia akan beralih ke PBD agar menghasilkan desain pondasi yang tetap kuat namun ekonomis. *Repairable* dan *limited ductility* adalah dua kata kunci pada PBD untuk struktur fondasi yang dimuat pada ketiga peraturan desain tersebut.

Spun pile merupakan tiang pancang pracetak prategang dengan penampang berbentuk lingkaran yang memiliki lubang pada bagian tengah penampang. *Spun pile* merupakan salah satu jenis fondasi yang paling banyak digunakan pada jembatan dan dermaga. Penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sambungan antara pile dan pile cap adalah lokasi yang cukup rawan karena terjadinya perubahan kekakuan yang cukup drastis dari pile cap ke pile (Bang, 2016). Area pertemuan ini mengalami gaya dalam moment (*high curvature*) terbesar terutama jika sambungan antara tiang dan pile cap didisain sebagai *fixed head*. Bagian ini harus didisain agar mampu mengalami deformasi lateral yang besar pada fase *post-elastic* tanpa penurunan kekuatan. Sehingga sambungan *spun pile* terhadap *pile cap* merupakan bagian *critical* yang akan mengalami kerusakan terhadap gempa besar.

Studi terhadap *spun pile* dan sambungannya di Indonesia masih sangat terbatas dikarenakan disainnya masih menganut konsep konvensional. Namun, di satu sisi detailing struktur fondasi mengacu ke detailing yang disyaratkan pada struktur atas, seperti kolom yang sudah menerapkan PBD. Salah satunya adalah tingginya batasan prosentase tulangan transversal pada *spun pile*, sehingga *spun pile* yang diproduksi di Indonesia tidak memenuhi batasan tersebut, bahkan jauh di bawah batas minimal yang ditetapkan.

Studi terhadap perilaku sambungan *spun piles* terhadap *pile cap* di negara lain sudah banyak dilakukan. Studi terbaru banyak dilakukan di negara Cina berdasarkan *common practice* yang ada di negara tersebut. Salah satu studi dilakukan oleh (Wang et al., 2014) terhadap 6 variasi sambungan. Hasil studi eksperimen mendapatkan sambungan memiliki daktilitas pada rentang 1,99—3,03. Penelitian lainnya dilakukan di Korea, mencoba memperbaiki daktilitas dan kekuatan sambungan *spun pile-pile cap* dengan memberikan *improvement* berupa penambahan tulangan sengkang pada *spun pile* dan memberi variasi jenis

sambungan *spun pile* dan *pile cap* (Bang, Jin-Wook et al., 2016). Hasil studi menunjukkan bahwa kekakuan rotasi inisial pada sambungan dipengaruhi oleh kedalaman penetrasi *spun pile* ke *pile cap* dan kedalaman penjangkaran tulangan. Peneliti di China lainnya (Guo et al., 2017) melakukan penelitian dengan memberikan dua variasi tambahan perkuatan pada sambungan, yaitu menambahkan profil baja ke dalam *spun pile* dan memberikan pembesaran dimensi *spun pile* pada area sambungan. Hasil penelitian menunjukkan terjadinya peningkatan kekuatan sambungan dan daktilitas dari sambungan meskipun peningkatan daktilitas tidak terlalu signifikan.

Penelitian *spun pile* di Indonesia dilakukan oleh Irawan dan difokuskan pada *spun pile*, bukan pada sambungan *spun pile* terhadap *pile cap*. Salah satu penelitian tersebut mempelajari efek beban aksial terhadap sambungan *spun pile* (Irawan et al., 2017). Hasil menunjukkan bahwa peningkatan beban aksial menyebabkan penurunan daktilitas, perpindahan *ultimate*, dan perpindahan *yielding*. Namun, peningkatan beban aksial juga dapat meningkatkan kapasitas momen (*crack*, *yielding*, dan *ultimate*). Penelitian numerik pemodelan *spun pile* dilakukan untuk mencari pemodelan *finite element* (FE) yang tepat menggunakan *software* OpenSees agar dapat merepresentasikan kondisi sesungguhnya (Setiawan et al., 2020). Penambahan perkuatan sambungan *spun pile-pile cap* dengan *steel jacket* dapat disimulasikan secara numerik. Hasil studi menunjukkan penambahan *steel jacket* dengan ketebalan yang tepat dapat meningkatkan kekuatan dan daktilitas sambungan *spun pile-pile cap* (Orientilize et al., 2021).

Studi tentang sambungan *spun pile-pile cap* berbasis *common practice* masih sangat dibutuhkan di Indonesia, karena perilaku inelastiknya belum sepenuhnya dipahami. Untuk itu dalam penelitian ini dilakukan studi eksperimen pada sambungan *spun pile – pile cap* menggunakan *spun pile* yang diambil dari salah satu stok yang ada. Studi lebih lanjut untuk mempelajari *strain development* yang terjadi pada *spun pile* dan efek dari penambahan beton pengisi pada *spun pile* dilakukan dengan pemodelan *finite element* menggunakan *software* Abaqus.

Dalam pemodelan *finite element*, studi-studi terdahulu memodelkan tulangan spiral dengan penyederhanaan sebagai hoops atau sengkang yang terputus (Guo et al., 2017). Penyederhanaan ini tidak terlalu mempengaruhi perilaku *spun pile*, jika tulangan spiral yang diberikan memadai batasan confinement. Dikarenakan *spun piles* yang digunakan *limited confinement*, sehingga sangat penting untuk memodelkan spiral tersebut dengan kondisi sebenarnya. *Performance levels* dari sambungan berdasarkan persyaratan regangan (American Society of Civil Engineers, 2014) dan persyaratan grafik momen terhadap rotasi (American Society of Civil Engineers, 2017) juga dipelajari. Hasil dari studi ini diharapkan menjadi tambahan pengetahuan tentang perilaku sambungan *spun pile-pile cap* pada fase *inelastic* sebagai bagian dari transisi menuju *performance-based design* (PBD) pada struktur bawah. Suatu saat Indonesia akan beralih ke PBD agar menghasilkan desain yang ekonomis akibat gempa besar dalam mengantisipasi peningkatan percepatan gempa.

2. Metode Penelitian

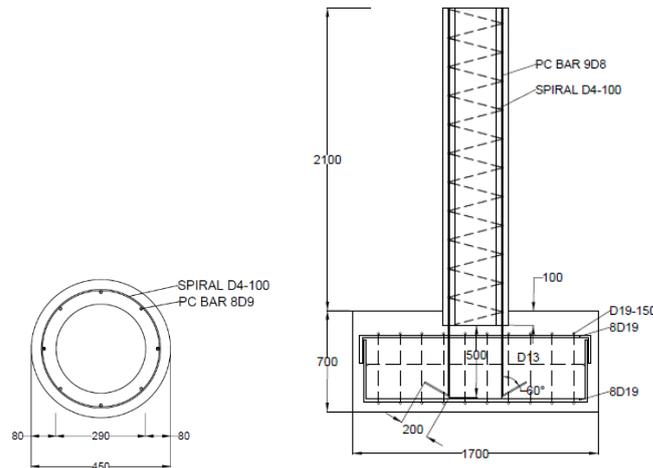
2.1 Eksperimen

Benda uji diberi nama SPPC (*spun pile-pile cap*) dengan kode angka 01 untuk benda uji tanpa beton pengisi. Detail dari benda uji diberikan pada Gambar 1. *Spun*

pile memiliki diameter 4500 mm dengan tebal 80 mm. Panjang *spun piles* 2100 mm dan tertanam ke dalam *pile cap* sedalam 100 mm. Terdapat 10 *prestressed wire* (PC Wire) dengan diameter sebesar 7,1 mm di dalam *spun pile* dengan kekuatan *ultimate* sebesar 1440 MPa. Tulangan geser yang digunakan memiliki diameter 40 mm dengan jarak 120 mm. Beton *spun piles* dan *pile cap* memiliki kuat tekan (f_c') sebesar 57,8 MPa dan 34,2 MPa.

Pengujian dilakukan di laboratorium Struktur Puskim. Sambungan *spun pile-pile cap* diposisikan terbalik seperti ditunjukkan pada Gambar 1. *Spun pile* diberikan beban aksial yang konstan selama pengujian sebesar 50 *ton-force* (*ton-force*) atau setara dengan $0,1f_c'Ag$. Pembebanan siklik dalam arah horizontal diberikan pada ujung tiang sesuai dengan *loading protocol* (ACI Committee 374, 2013). Pengujian dilakukan sampai mencapai *drift* 3,5% dengan masing-masing siklus dilakukan sebanyak 3 kali dengan tambahan siklus kecil sebagai transisi di antara *drift*.

Dalam penelitian ini, hasil studi eksperimen dalam bentuk kurva histeresis dijadikan sebagai acuan untuk memvalidasi pemodelan *finite element*. Detail tentang hasil studi eksperimen disajikan dalam paper terpisah.

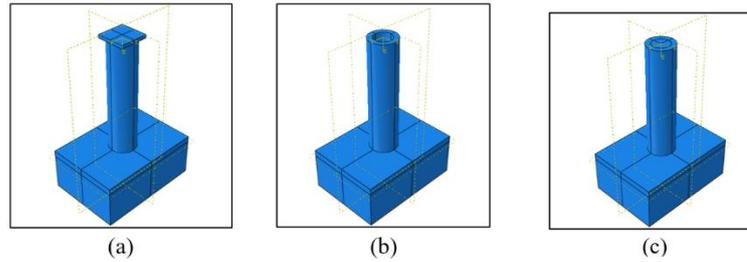


Gambar 1 Detail benda uji SPPC 01

2.2 Analisis Finite Element (FE)

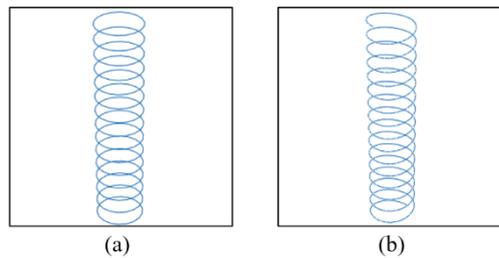
Seperti diuraikan sebelumnya, studi yang dilakukan dalam penelitian ini fokus kepada studi numerik berbasis pemodelan FE. Untuk memastikan model FE merepresentasikan kondisi yang sebenarnya, dilakukan validasi model berdasarkan hasil studi eksperimen. Analisis *finite element* (FE) dilakukan dengan *software* Abaqus pada dua model sambungan *spun pile-pile cap*, satu dengan *spun pile* kosong yang dinamakan SPPC01 dan satu lagi *spun pile* dengan tambahan beton pengisi yang dinamakan SPPC04. Jadi kedua model memiliki spesifikasi yang sama, kecuali adanya tambahan beton pengisi pada *spun pile* SPPC04.

PC Wire dan tulangan pada *pile cap* dimodelkan menggunakan elemen *truss* T3D2 dan beton dimodelkan dengan elemen *solid* C3D8R. *Constitutive law* dari beton mengikuti teori beton Mander, sedangkan PC Wire dan tulangan *pile cap* diasumsikan sebagai *bilinear* dengan adanya *strain hardening* dan mengadopsi *true stress-strain* untuk merepresentasikan terjadinya *necking* pada tulangan. Hasil pemodelan FE dapat dilihat pada Gambar 2.



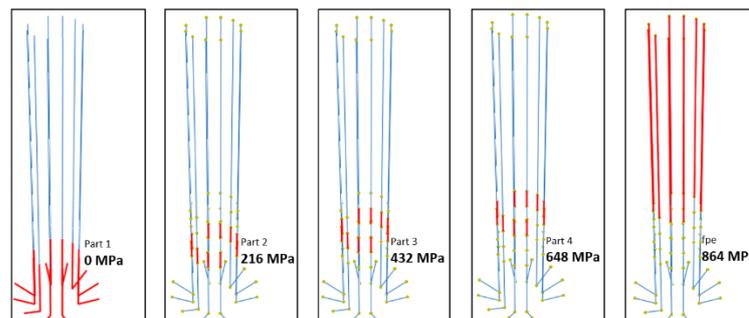
Gambar 2 FE model (a) dengan pelat penutup (b) SPPC01 tanpa pelat penutup (c) SPPC 04 tanpa pelat penutup

Perbedaan pemodelan tulangan geser sebagai spiral dan penyederhanaan dalam bentuk *hoops* adalah bagian dari parameter yang diteliti. Model *hoops* dibuat dengan *part* berbentuk lingkaran yang kemudian digabungkan menjadi *hoops* dengan jarak 120 mm seperti Gambar 3 (a). Untuk model spiral, *part* dibuat sebagai setengah lingkaran dan dirotasi sehingga memberikan jarak 120 mm dan kemudian digabungkan seperti Gambar 3 (b).



Gambar 3 (a) Model *hoops* (b) model spiral

Interaksi antara *spun pile* dan *pile cap* dimodelkan sebagai *hard contact* dengan koefisien friksi sebesar 0,1. Interaksi antara *spun pile* dengan beton pengisi, pelat penutup dengan *spun pile*, dan pelat penutup dengan beton pengisi dimodelkan sebagai *perfect bond* yang artinya tidak ada *relative motion* antara kedua permukaan. Gaya *prestress* pada PC *wire* telah memperhitungkan *loss of prestress* sebesar 15% sehingga gaya *prestress* yang diasumsikan bekerja adalah 864 MPa yang setara dengan 0,85fpi. Untuk merepresentasikan hilangnya gaya *prestress* akibat pemotongan pada *wire*, maka PC *wire* dibagi dalam lima bagian seperti ditunjukkan pada Gambar 4, dimana gaya *prestress* pada *wire* diasumsikan mengalami penambahan secara linier dari nol di bagian ujung bawah sampai penuh di ujung atas.

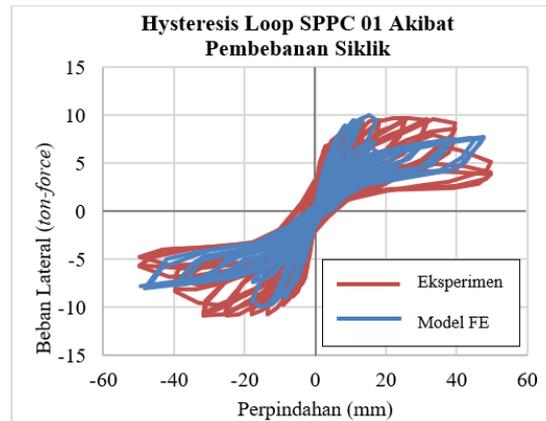


Gambar 4 Bagian PC *wire*

3. Hasil dan Pembahasan

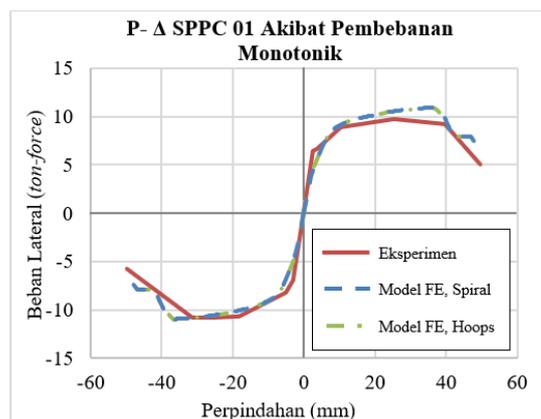
3.1 Validasi Model

Validasi model dilakukan untuk memastikan model dapat merepresentasikan kondisi sebenarnya dari sambungan *spun pile* tanpa beton pengisi. Dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6, hasil eksperimen dan FE berimpit sehingga dapat dikatakan bahwa model dapat menggambarkan kondisi sebenarnya. Eksperimen memiliki beban lateral maksimum 9,731 *ton-force* pada perpindahan 25,44 mm untuk arah dorong dan 10,824 *ton-force* pada perpindahan 25,11 mm untuk arah tarik.



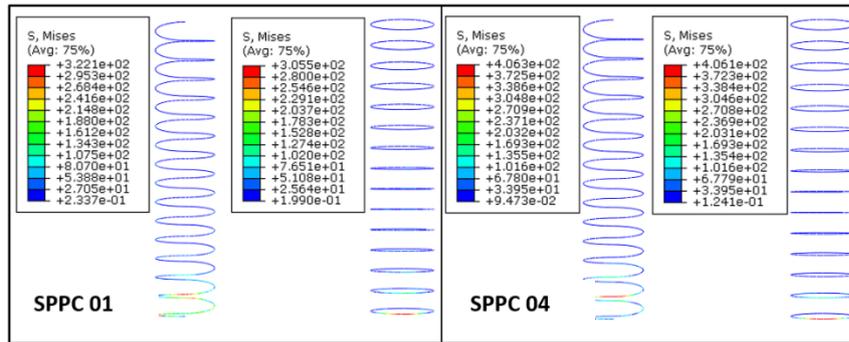
Gambar 5 Hysteresis loop akibat pembebanan siklik SPPC 01

Model spiral dan *hoops* memberikan hasil yang hampir sama (mirip) untuk kekuatan dan tegangan. Distribusi tegangan pada tulangan geser dapat dilihat pada Gambar 7. Model *hoops* untuk SPPC 01 dan SPPC 04 yang dibebani secara monotonik memberikan tegangan maksimum sebesar 305,5 MPa dan 406,1 MPa. Model spiral untuk SPPC 01 dan SPPC 04 yang dibebani secara monotonik memberikan tegangan maksimum sebesar 322,1 MPa dan 406,3 MPa.



Gambar 6 P-Δ akibat pembebanan monotonik SPPC 01

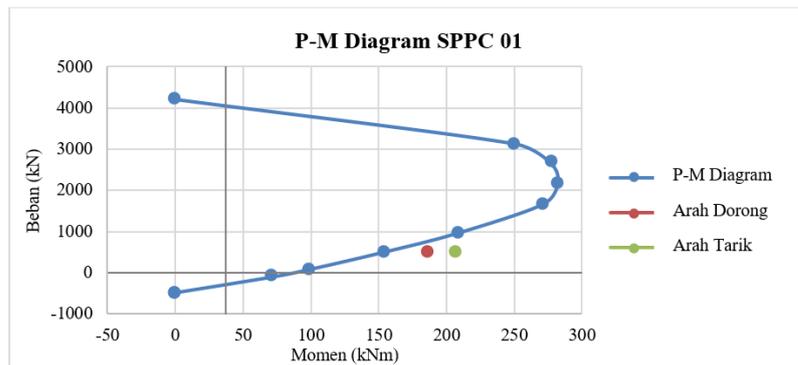
Tegangan yang terjadi pada model spiral lebih besar 5,43% untuk SPPC 01 dan 0,05% untuk SPPC 04. Untuk kekuatan maksimum, masing-masing SPPC 01 dan SPPC 04 memiliki kekuatan yang sama untuk model spiral dan *hoops*.



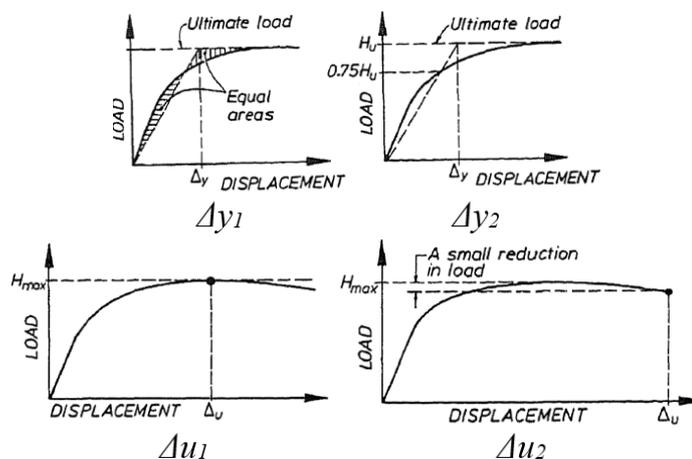
Gambar 7 Tegangan Model Spiral dan Hoops SPPC 01 dan SPPC 04

3.2 Perilaku Sambungan Spun Pile

Perilaku sambungan *spun pile* dilihat dari benda uji dan model SPPC 01. SPPC 01 mengalami kegagalan *flexural* karena rasio kondisi *flexural* lebih kecil daripada rasio kondisi geser ($\Phi M_n / \mu < \Phi V_n / V_u$). Benda uji juga mengalami kegagalan tarik (*tension failure*) karena regangan beton lebih kecil daripada regangan baja yang terjadi ($\epsilon_{beton} < \epsilon_{baja}$). Nilai OSR lokal diperoleh dari diagram P-M (model mander) yang dapat dilihat pada Gambar 8. *Overstrength ratio* (OSR) lokal yang diperoleh memiliki nilai 1,209 untuk arah dorong dan 1,332 untuk arah tarik.



Gambar 8 P-M diagram SPPC 01



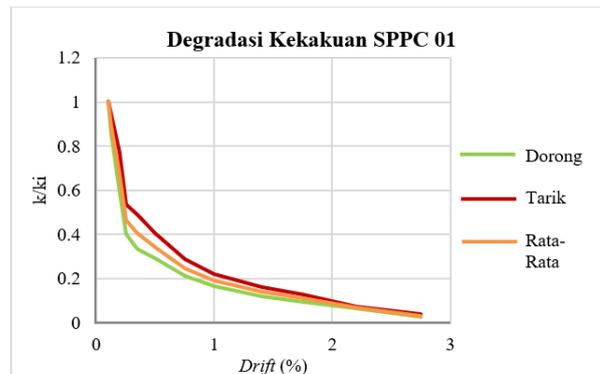
Gambar 9 Metode perhitungan daktilitas (Park, 1988)

Daktilitas sambungan *spun pile* didefinisikan sebagai rasio dari perpindahan *ultimate* terhadap perpindahan *yielding*. Kedua parameter tersebut dapat diperoleh menggunakan dua cara untuk masing-masing parameter (Park, 1988). Perpindahan *ultimate* dapat dihitung sebagai perpindahan maksimum (Δu_1) dan 0,85 dari perpindahan maksimum (Δu_2). Perpindahan *yielding* dapat dihitung dengan metode area (Δy_1) dan metode *secant* (Δy_2). Dapat dilihat pada Tabel 1, daktilitas kemudian dihitung menggunakan kombinasi dari metode-metode yang telah dijelaskan.

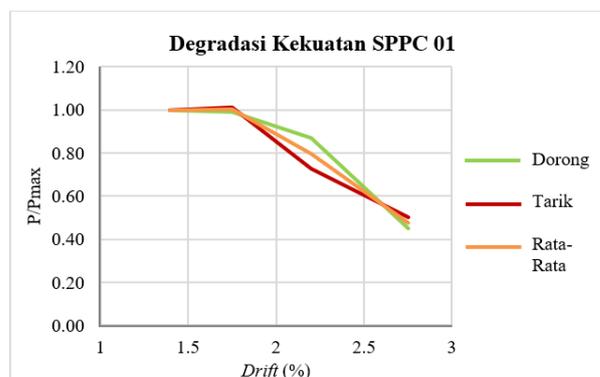
Tabel 1 Daktilitas SPPC 01

Daktilitas	Metode 1 Δu_1 and Δy_2		Metode 2 Δu_1 and Δy_1		Metode 3 Δu_2 and Δy_1		Metode 4 Δu_2 and Δy_2	
	Eksperimen	Model	Eksperimen	Model	Eksperimen	Model	Eksperimen	Model
	SPPC 01	FE SPPC 01						
μ^+	3.867	3.366	3.018	3.351	3.327	5.515	4.262	5.540
μ^-	3.867	4.966	3.018	3.997	3.327	4.734	4.262	5.882
μ rata-rata	3.867	4.166	3.018	3.674	3.327	5.125	4.262	5.711

Benda uji mengalami degradasi kekakuan dan kekuatan ketika diuji seperti yang dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11. Persentase degradasi kekakuan untuk SPPC 01 sebesar 2,784% untuk arah dorong; 4,135% untuk arah tarik; dan 3,398% untuk rata-rata. Degradasi kekuatan SPPC 01 yang terjadi sebesar 45% untuk arah dorong, 50% untuk arah tarik, dan 48% untuk rata-rata.



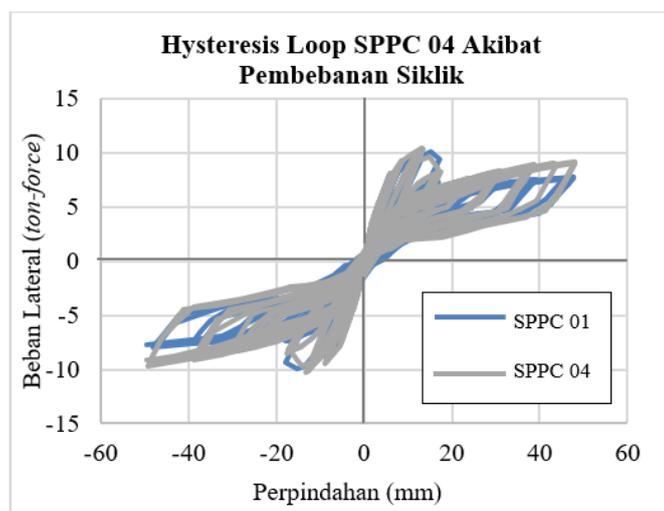
Gambar 10 Degradasi kekakuan SPPC 01



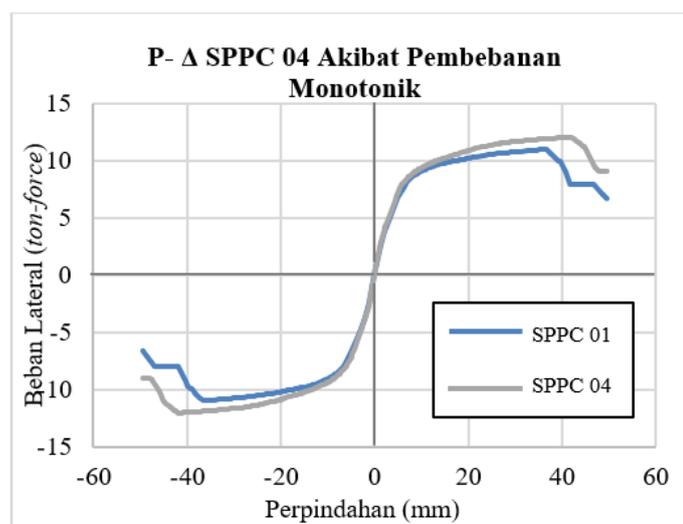
Gambar 11 Degradasi kekuatan SPPC 01

3.3 Efek Beton Pengisi

Dua model digunakan untuk mengetahui efek beton pengisi, yaitu model SPPC 01 dan model SPPC 04. Penggunaan beton pengisi memberikan beban lateral maksimum yang lebih besar seperti dapat dilihat pada Gambar 12 dan Gambar 13, meskipun perbedaannya tidak signifikan (0,097%). Secara teoritis, beton pengisi akan memberikan situasi lebih *confined* untuk *spun pile*, sehingga daktilitas seharusnya meningkat. Karena *spun pile* dibuat dengan jumlah tulangan geser yang sedikit, beton pengisi tidak berperilaku seperti yang seharusnya. Berdasarkan perhitungan empat metode daktilitas yang telah dijelaskan sebelumnya, daktilitas model dengan beton pengisi menjadi lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa tulangan geser harus diberikan sesuai dengan persyaratan agar tidak mengubah perilaku beton pengisi.



Gambar 12 Hysteresis loop akibat pembebanan siklik

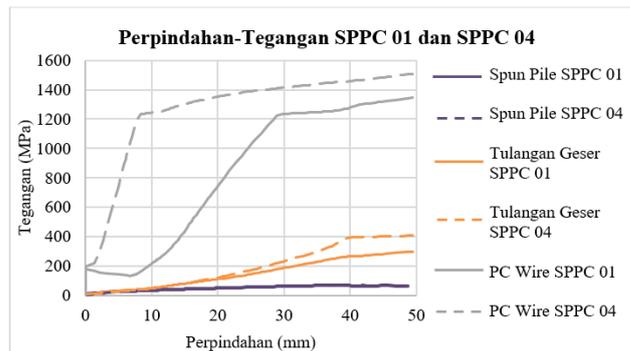


Gambar 13 P-Δ akibat pembebanan monotonik SPPC 04

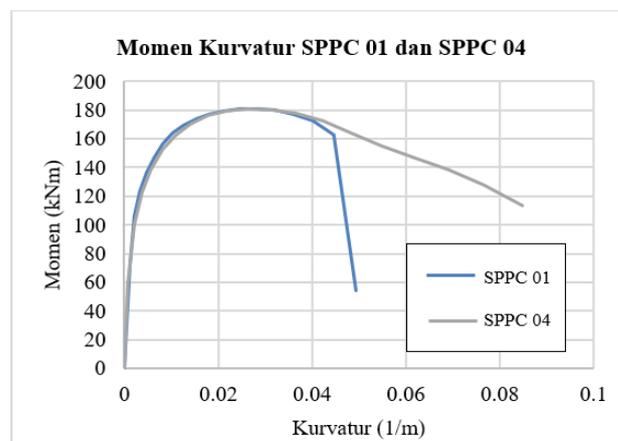
Tabel 2 Perbandingan Daktilitas SPPC 01 dan SPPC 04

Daktilitas	Metode 1		Metode 2		Metode 3		Metode 4	
	$\Delta u1$ and $\Delta y2$		$\Delta u1$ and $\Delta y1$		$\Delta u2$ and $\Delta y1$		$\Delta u2$ and $\Delta y2$	
	Model FE SPPC 04	Model FE SPPC 01	Model FE SPPC 04	Model FE SPPC 01	Model FE SPPC 04	Model FE SPPC 01	Model FE SPPC 04	Model FE SPPC 01
	$\mu+$	3.442	3.867	3.024	3.018	3.325	3.327	3.784
$\mu-$	3.442	3.867	3.024	3.018	3.325	3.327	3.784	4.262
μ rata-rata	3.442	3.867	3.024	3.018	3.325	3.327	3.784	4.262

Penggunaan beton pengisi juga meningkatkan tegangan pada tulangan geser dan PC Wire pada perpindahan yang sama, namun tidak berpengaruh terhadap tegangan *spun pile*. Model dengan beton pengisi memiliki momen plastis dan momen *ultimate* (157,792 kNm dan 180,705 kNm) yang lebih rendah dibandingkan dengan model tanpa beton pengisi (171,205 kNm dan 180,740 kNm). Beton pengisi menyebabkan peningkatan momen leleh dari 145,684 kNm menjadi 146,697 kNm. OSR global dihitung dengan membagi momen *ultimate* dengan momen leleh. Nilai OSR global diperoleh sebesar 1,242 untuk SPPC 01 dan 1,232 untuk SPPC 04 (Chiou, 2011).



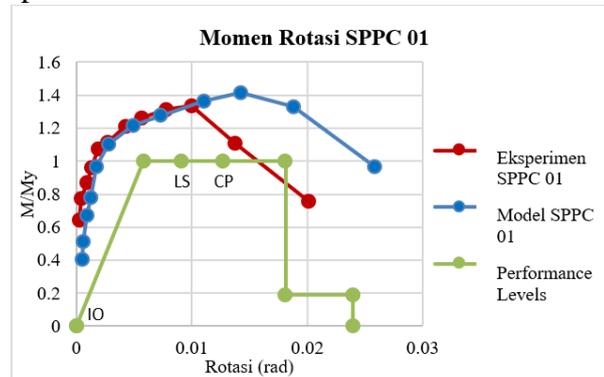
Gambar 14 Perpindahan-tegangan SPPC 01 dan SPPC 04



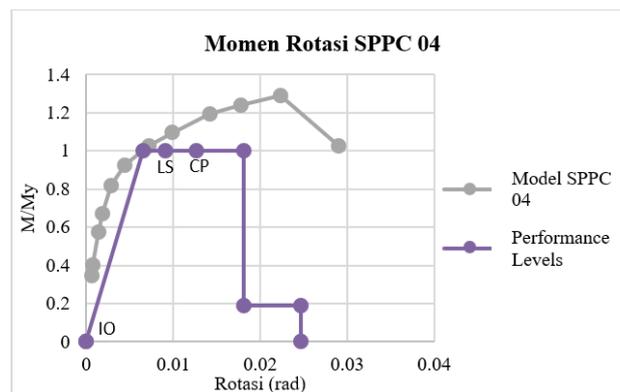
Gambar 15 Momen kurvatur SPPC 01 dan SPPC 04

3.4 Performance Levels

Performance levels ditentukan berdasarkan dua standar bangunan, yaitu ASCE 41-17 dan ASCE 61-14. Berdasarkan ASCE 41-17, eksperimen SPPC 01, model SPPC 01, dan model SPPC 04 mampu mencapai *collapse prevention* (CP) yang dapat dilihat pada Gambar 16 dan Gambar 17.

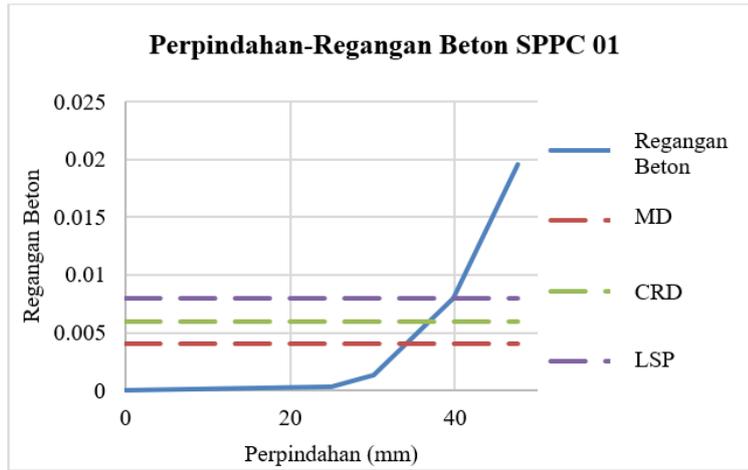


Gambar 16 Grafik momen terhadap rotasi dan *performance levels* ASCE 41-17 SPPC 01

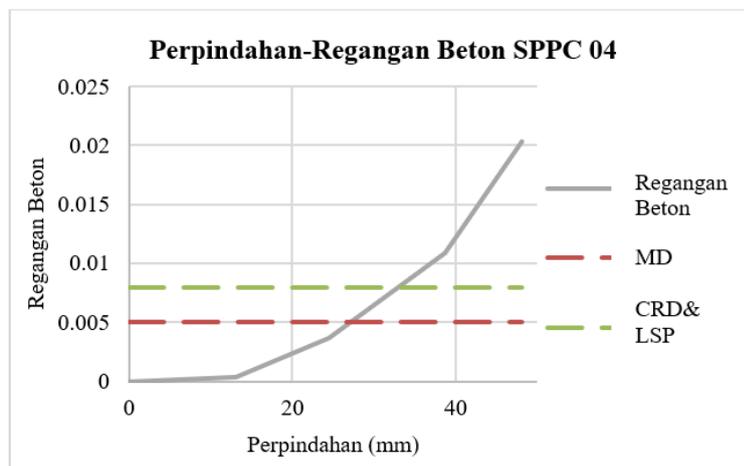


Gambar 17 Grafik momen terhadap rotasi dan *performance levels* ASCE 41-17 SPPC 04

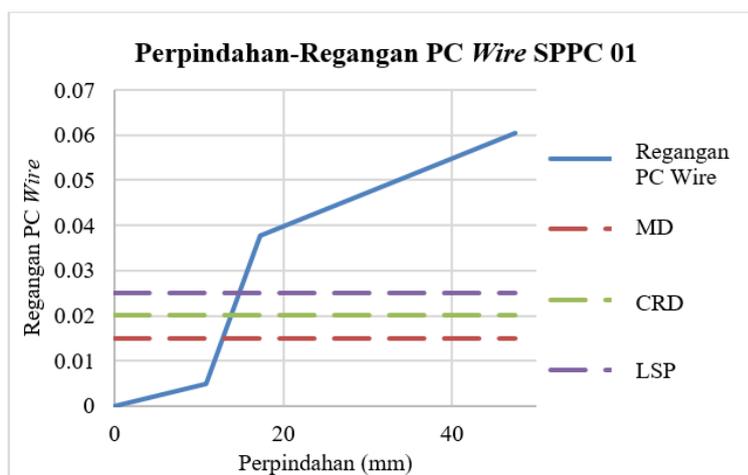
Performance levels berdasarkan ASCE 61-14 dapat dilihat pada Gambar 18, Gambar 19, Gambar 20, dan Gambar 21. Untuk SPPC 01, regangan untuk PC Wire dan beton terjadi sebesar 0,06 dan 0,0006 saat perpindahan 25 mm. Saat kondisi akhir, regangan SPPC 01 untuk PC Wire dan beton terjadi sebesar 0,02 dan 0,06. SPPC 01 mampu mencapai *minimal damage* (MD) pada perpindahan 25 mm untuk beton, *life safety protection* (LSP) pada perpindahan 25 mm untuk PC Wire, dan *life safety protection* (LSP) pada kondisi akhir untuk keduanya. Untuk SPPC 04, regangan untuk PC Wire dan beton terjadi sebesar 0,06 dan 0,005 saat perpindahan 25 mm. Saat kondisi akhir, regangan SPPC 04 untuk PC Wire dan beton terjadi sebesar 0,06 dan 0,02. SPPC 04 mampu mencapai *controlled and repairable damage* (CRD) pada perpindahan 25 mm untuk beton, *life safety protection* (LSP) pada perpindahan 25 mm untuk PC Wire, dan *life safety protection* (LSP) pada kondisi akhir untuk keduanya.



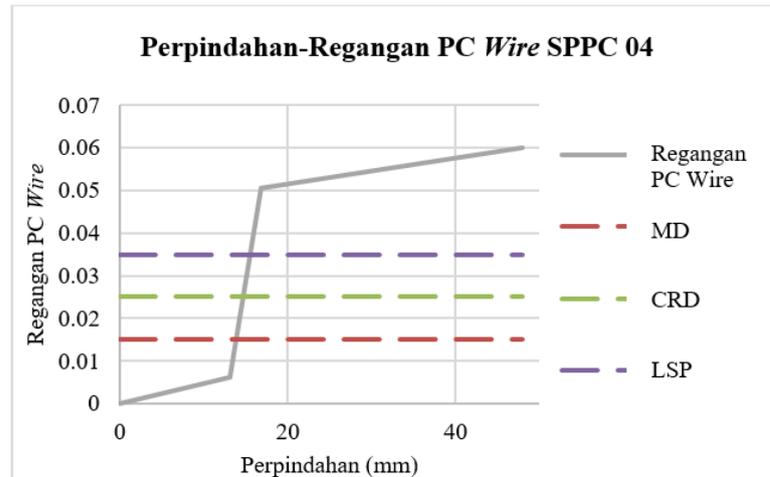
Gambar 18 Perpindahan-regangan beton ASCE 61-14 SPPC 01



Gambar 19 Perpindahan-regangan beton ASCE 61-14 SPPC 04



Gambar 20 Perpindahan-regangan PC wire ASCE 61-14 SPPC 01



Gambar 21 Perpindahan-regangan PC wire ASCE 61-14 SPPC 04

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Model pada analisis *finite element* dapat merepresentasikan hasil eksperimen dengan baik. Pemodelan tulangan geser menggunakan *hoops* akan menurunkan tegangan yang terjadi dibandingkan dengan model spiral, namun penurunan yang terjadi tidak signifikan sehingga tulangan geser dapat dimodelkan sebagai *hoops*. Jumlah tulangan geser yang lebih sedikit dari standar menyebabkan beton pengisi tidak memberikan efek yang signifikan terhadap daktilitas. SPPC 01 dan SPPC 04 pada kondisi akhir memiliki *performance levels* berupa *collapse prevention* (CP) untuk standar ASCE 41-17 dan *life safety protection* (LSP) untuk standar ASCE 61-14. Untuk perpindahan 25 mm, kedua model memberikan *repairable performance levels* untuk beton, namun tidak untuk PC Wire. Penggunaan beton pengisi memberikan kekuatan yang lebih besar untuk benda uji. Penelitian yang dilakukan sudah memberikan informasi perilaku dasar *spun pile* dan dapat memenuhi syarat *limited ductility* untuk mendukung *performance-based design* di Indonesia.

4.2 Saran

Performance-based design (PBD) memiliki syarat *limited ductility* dan *repairable*. Untuk mendukung syarat *repairable*, penelitian lanjutan mengenai perbaikan sambungan *spun piles* terhadap *pile cap* dapat dilakukan dalam mendukung penerapan *performance-based design* (PBD) untuk struktur bawah di Indonesia.

Daftar Kepustakaan

ACI Committee 374, 2013. Guide for testing reinforced concrete structural elements under slowly applied simulated seismic loads. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

- American Association of State Highway and Transportation Officials (Ed.), 2011. AASHTO guide specifications for LRFD seismic bridge design, 2nd ed. ed. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- American Society of Civil Engineers, 2017. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, 41st ed. American Society of Civil Engineers, Reston, VA. <https://doi.org/10.1061/9780784414859>
- American Society of Civil Engineers, 2014. Seismic Design of Piers and Wharves, 61st ed. American Society of Civil Engineers, Reston, VA. <https://doi.org/10.1061/9780784413487>
- Badan Standarisasi Nasional, 2017. SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik. Badan Standarisasi Nasional.
- Bang, Jin-Wook, Oh, Sang-Jin, 이승수, Kim, Yun-Yung, 2016. Pile-cap Connection Behavior Dependent on the Connecting Method between PHC pile and Footing. J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp. 20, 25–32. <https://doi.org/10.11112/JKSMI.2016.20.3.025>
- Guo, Z., He, W., Bai, X., Chen, Y.F., 2017. Seismic Performance of Pile-Cap Connections of Prestressed High-Strength Concrete Pile with Different Details. Struct. Eng. Int. 27, 546–557. <https://doi.org/10.2749/222137917X14881937845963>
- Irawan, C., Putu Raka, I.G., Djamaluddin, R., Faimun, F., Suprobo, P., Soeprapto, G., 2017. Ductility and Seismic Performance of Spun Pile Under Constant Axial and Reverse Flexural Loading. Proc. Int. Symp. Concr. Technol.
- Japan Road Association, 2012. Specifications for Highway Bridges - Part V Seismic Design. Japan Road Association.
- Orientilize, M., Prakoso, W.A., Fadel, M., Fernaldy, R.P., 2021. Study of spun pile connection with steel jacket strengthening. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 622, 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/622/1/012028>
- Park, R., 1988. Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing. Proc. Ninth World Conf. Earthq. Eng. VIII, 605–616.
- Setiawan, A.F., Darmawan, M.F., Ismanti, S., Mukhlis, S., Guntara Muria, A., 2020. Numerical model for investigating seismic performance of Prestressed Hollow Concrete (PHC) piles with Fiber section element. E3S Web Conf. 156, 03007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015603007>
- Wang, T., Yang, Z., Zhao, H., Wang, W., 2014. Seismic Performance of Prestressed High Strength Concrete Pile to Pile Cap Connections. Adv. Struct. Eng. 17, 1329–1342. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.17.9.1329>

Copyright (c) Vania Callista, Yuskar Lase, Widjojo Adi Prakoso, Mulia Orientilize