

STUDI PEFORMA SPUN PILE DENGAN PERKUATAN STEEL JACKET KE PILE CAP AKIBAT PEMBEBANAN SIKLIK HORIZONTAL

Jansen Reagen¹, Mulia Orientilize², Widjojo Adi Prakoso³, Yuskar Lase⁴, dan Sidiq Purnomo⁵

¹Mahasiswa Program Magister Teknik Sipil, Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, Jawa Barat
jansen.reagen@ui.ac.id

²Departemen Teknik Sipil, Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, Jawa Barat
mulia@eng.ui.ac.id

³Departemen Teknik Sipil, Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, Jawa Barat
wprakoso@end.ui.ac.id

⁴Departemen Teknik Sipil, Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, Jawa Barat
yuskar@eng.ui.ac.id

⁵PT Wijaya Karya Beton Tbk WIKA Tower 1 FL. 2-5, Jl. DI. Panjaitan Kav 9-10 Jakarta, 13340, Indonesia
sidiq@wika-beton.co.id

Masuk: 26-02-2023, revisi: 30-03-2023, diterima untuk diterbitkan: 02-04-2023

ABSTRACT

Experimental and numerical studies were conducted on spun pile to pile cap connections with steel jacketing retrofitting due to cyclic loading. Experimental results show enhancement of spun pile to pile cap connection performance with enhancement of maximum lateral capacity of the connection by 18%; ductility by 5,2%; and seismic energy absorption by 22%. The failure modes found in the experiment were fractures in prestressed reinforcement as well as flexural and shear cracks which occurred at a height of 200 mm above the retrofitted area. In addition, debonding was found between the pile cap and steel jacketing which resulted in the pile lifting and damaging the pile cap. Numerical studies were carried out using ABAQUS 6.14 to analyze the behavior of retrofitting with perfectly bond interaction with the specimen. The proposed model was validated with experimental results and showed good resemblance. The results of numerical studies show that the lateral capacity will increase if perfectly bond interaction between the steel jacket and the specimen is applied. The results of numerical studies show a decrease in ductility which caused by the considerable contribution of zincalume material as a steel jacketing's layer with non-ductile property.

Keywords: Retrofitting; Steel Jacketing; Lateral Capacity; Ductility

ABSTRAK

Studi eksperimen dan numerikal dilakukan pada sambungan *spun pile – pile cap* dengan perkuatan *steel jacketing* akibat pembebanan siklik. Hasil studi eksperimen menunjukkan peningkatan peforma sambungan *spun pile – pile cap* dengan tingkatan kapasitas lateral maksimum sambungan sebesar 18%; daktilitas sebesar 5,2%; dan serapan energi gempa sebesar 22%. Mode kegagalan yang ditemukan pada uji eksperimen berupa *fracture* pada tulangan *prestressed* serta *flexural crack* dan *shear crack* yang terjadi pada ketinggian 200 mm di atas area perkuatan. Selain itu, ditemukan *debonding* antara *pile cap* dan *steel jacketing* yang mengakibatkan tiang terangkat dan merusak *pile cap*. Studi numerikal dilakukan dengan menggunakan ABAQUS 6.14 untuk menganalisis perilaku perkuatan dengan interaksi *perfectly bond* dengan benda uji. Model yang diusulkan sebelumnya divalidasi terlebih dahulu dengan hasil eksperimen dan menunjukan kesesuaian yang baik. Hasil studi numerikal menunjukan bahwa kapasitas lateral akan meningkat jika interaksi *perfectly bond* antara *steel jacket* dan benda uji diterapkan. Adapun hasil studi numerikal menunjukan penurunan nilai daktilitas yang disebabkan oleh kontribusi cukup besar dari material *zincalume* sebagai lapisan *steel jacketing* dengan sifat tidak daktil.

Kata kunci: Perkuatan; *Steel Jacketing*; Kapasitas Lateral; Daktilitas

1. PENDAHULUAN

Peta gempa nasional Indonesia yang dirilis pada tahun 2017 menunjukan adanya peningkatan percepatan gempa pada beberapa wilayah di Indonesia yang tentunya akan meningkatkan potensi kerusakan struktur. Salah satu bagian struktur yang rentan mengalami kerusakan akibat gempa adalah pada daerah sambungan *spun pile* dengan *pile cap*.

Spun pile adalah tiang pancang beton berbentuk lingkaran dengan *hollow* atau lubang pada bagian tengah lingkaran yang difabrikasi secara *prestressed* dan *precast* dengan ukuran diameter luar berkisar antara 300 hingga 1200 mm (Irawan et al., 2014). Kerusakan sambungan *spun pile – pile cap* dijumpai pada gempa Kobe di Jepang dengan magnitudo 6,9 mengakibatkan kegagalan tekan dan geser pada daerah sambungan (Mizuno et al., 1996). Kegagalan yang sama juga ditemukan pada sambungan *spun pile – pile cap* pasca gempa Tohoku dengan magnitudo 9,1 (Kaneko et al., 2018). Berdasarkan analisis daktilitas menggunakan NEHRP 2000, ditemukan bahwa *spun pile* tidak cocok digunakan pada daerah dengan risiko gempa rendah hingga sedang (Irawan et al., 2016).

Desain *spun pile* di Indonesia masih berada dalam batas elastis sebagaimana diatur dalam SNI 8460:2017 pasal 9.7.3.1 yang mengakibatkan desain fondasi cenderung boros secara ekonomi (Badan Standardisasi Nasional, 2017). Sebagai solusi, beberapa penelitian *spun pile* sudah dilakukan berdasarkan *Performanced Based Desain* (PBD), dimana struktur diizinkan mengalami kerusakan dalam batas tertentu. Salah satu parameter yang digunakan untuk mengukur ketahanan struktur terhadap gempa adalah daktilitas, yaitu kemampuan struktur untuk mengalami deformasi siklik yang besar tanpa mengalami reduksi kekuatan yang substansial. Oleh karena itu, struktur disarankan didesain agar bersifat daktil sehingga struktur dapat mendisipasikan sejumlah energi saat mengalami deformasi siklik. Penelitian yang dilakukan oleh Joen (1987) menunjukkan bahwa perilaku daktil dapat tercapai pada *precast pile* dengan *cast in situ pile cap*. Penelitian lain menunjukkan bahwa daktilitas *precast pile* dapat ditingkatkan dengan menggunakan tulangan ulir longitudinal tambahan beserta penggunaan tulangan spiral yang memadai (Ikeda et al., 1982).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan kekuatan dan daktilitas sambungan *spun pile – pile cap*. Bang et al., (2016) menemukan bahwa koneksi antara *spun pile* dan *pile cap* merupakan area yang kritis karena pada koneksi ini terjadi perubahan area, tegangan, dan kekakuan secara tiba-tiba. Studi perkuatan pada *spun pile* komersial buatan Indonesia dilakukan dengan menambahkan beton pengisi pada bagian *hollow spun pile* dan didapatkan peningkatan daktilitas benda uji (Irawan et al., 2020). Jenis perkuatan lainnya menggunakan *T-shape steel* dan *strengthened ring* pada daerah sambungan memberikan kekuatan dan daktilitas lebih tinggi daripada sambungan biasa (Guo et al., 2017). Penelitian lainnya oleh Yang et al., (2020) dengan menggunakan CFRP dan *steel fiber* berhasil meningkatkan daktilitas sambungan *spun pile – pile cap*, namun sayangnya perkuatan yang diberikan masih belum dapat meningkatkan *bearing capacity* dan *stiffness* dari sambungan.

Spun pile komersial buatan Indonesia memiliki sejumlah kelemahan, diantaranya adalah rasio *confinement* yang tidak cukup kuat (Irawan et al., 2018) bahkan berada jauh dibawah standar ASCE 7 – 16. Desain *confinement spun pile* di Indonesia umumnya dibuat lebih rapat pada kedua ujung dan lebih renggang pada bagian pertengahan. Tetapi dalam praktiknya seringkali *spun pile* dipotong tepat pada bagian tengah dengan tulangan spiral yang lebih renggang dan disambung terhadap *pile cap* yang mengakibatkan berkurangnya kekuatan dan daktilitas sambungan. Meskipun umumnya penggunaan *spun pile* di Indonesia diberi perkuatan *concrete infill* dan tulangan dengan tujuan penjangkaran ke *pile cap*, namun hal tersebut masih belum cukup untuk mengatasi permasalahan daktilitas dan kekuatan *spun pile* buatan Indonesia.

Salah satu metode perkuatan yang umum digunakan pada kolom adalah perkuatan *steel jacketing*. *Steel jacketing* adalah teknik perkuatan struktur dengan menggunakan baja yang menyelimuti elemen struktural. Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu, misalnya yang dilakukan oleh Olmos et al., (2019) menemukan bahwa *steel jacket* dapat meningkatkan *base shear* dan *ductility capacity* pada kolom *circular* jembatan. Selain itu, penelitian oleh Li et al., (2005) menemukan bahwa perkuatan *steel jacket* dapat meningkatkan daktilitas, kekuatan lateral, dan kekakuan pada kolom jembatan *circular* di negara Taiwan. Sayangnya tidak banyak yang melakukan penelitian perkuatan *steel jacketing* pada sambungan *spun pile – pile cap*. Oleh karena itu pada penelitian ini akan dilakukan uji eksperimen pada sambungan *spun pile – pile cap* dengan beton pengisi yang diberikan perkuatan *steel jacketing*. *Steel jacketing* dengan material *zincalume* dengan nomor paten P00202109462 dipilih sebagai metode perkuatan dengan alasan untuk meningkatkan rasio *confinement* pada *spun pile* komersial buatan Indonesia sebagai metode perkuatan yang praktis dan ekonomis dalam meningkatkan peforma sambungan *spun pile – pile cap* terhadap gempa.

2. METODE PENELITIAN

Benda uji (SPPC07) merupakan *spun pile* dengan diameter 450 mm dan tebal 80 mm dengan tinggi tiang 2100 mm yang dimasukan sedalam 100 mm ke dalam *pile cap*. *Spun pile* yang digunakan merupakan *fabricated high-strength prestressed concrete pile* (PHC) dengan kuat tekan 57,8 MPa. *Spun pile* menggunakan 10 buah tulangan *pre-stressed* dengan diameter 7,1 mm dengan besar *initial pre-stressed* yang diberikan sebesar 1080 MPa atau 0,75 F_u dan sengkang spiral diameter 4 mm dengan jarak 120 mm. Pada bagian *hollow spun pile*, diisi dengan *reinforced concrete infill* dengan kuat tekan yang sama dengan *pile cap*, yaitu sebesar 35,7 MPa. Benda uji diberi perkuatan *steel jacketing* setinggi 750 mm dengan material *zincalume* setebal 0,7 mm pada sambungannya dan dipasang menggunakan *steel anchorage* pada *spun pile*. Agar *zincalume* dapat melekat pada benda uji, diberikan beton *grouting* dengan tebal 25 mm dan kuat rata-rata 61,1 MPa. Baik *zincalume* dan beton *grouting*, keduanya ternanam sedalam 100 mm ke dalam

pile cap. Detail benda uji dapat terlihat pada Gambar 1 dan properti baja yang digunakan pada benda uji dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Properti Material Baja

	Komponen	f_y (MPa)	f_u (MPa)
<i>Spun Pile</i>	<i>Longitudinal PC Wire</i> (10 Ø7,1 mm)	1224	1440
	Spiral (Ø4 – 120)	390	703
<i>Concrete Infill</i>	Tulangan Longitudinal (6D19)	400	570
	Spiral (Ø8 – 75)	240	370
<i>Pile Cap</i>	Tulangan Utama (D19 – 150)	400	570
	Tulangan Peminggang (D13)	400	570
<i>Steel Jacketing</i>	<i>Zincalume</i> (t = 0,7 mm)	519	529

Benda uji disusun dengan *spun pile* berada pada bagian atas dan *pile cap* berada pada bagian bawah seperti terlihat pada Gambar 2(a). *Pile cap* diangkur terhadap *strong floor* dan ditahan oleh dua *hydraulic jack* yang berfungsi untuk mencegah *slip* pada *pile cap*, sehingga dapat diasumsikan perletakan pada dasar *pile cap* adalah jepit. Karena benda uji berbentuk *circular*, digunakan pelat perata beban pada bagian atas *spun pile* agar beban aksial terbagi secara merata pada penampang benda uji. Terdapat dua jenis pembebanan yang diberikan pada benda uji, yaitu beban aksial sebesar 0,1 fc' Ag atau 50 tonf dan beban siklik horizontal yang mengacu pada standar ACI 374.2R-13 yang menggunakan sistem *drift* dalam mencatat beban yang bekerja pada *displacement* horizontal tertentu. Pada setiap *drift*, terdapat tiga siklus pembebanan tarik dan tiga siklus pembebanan tekan secara bergantian yang diikuti dengan siklus kecil saat akan memasuki *drift* baru. *Loading protocol* untuk pembebanan siklik horizontal dapat dilihat pada Gambar 2(b). Pengujian dihentikan ketika *drift* 3,5% tercapai atau ketika kekuatan struktur telah mengalami penurunan lebih dari 50%. Pengukuran *displacement* pada benda uji dilakukan dengan menggunakan *linear variable differential transformer* (LVDT) dengan LVDT utama diberi label nama Tr-3. Hasil uji eksperimen SPPC07 akan dibandingkan dengan benda uji SPPC02, yang merupakan salah satu benda uji penelitian oleh Tandita et al. (2021). SPPC02 merupakan benda uji yang serupa dengan SPPC07, yaitu sambungan *spun pile* – *pile cap* dengan beton pengisi tetapi tanpa perkuatan *steel jacketing*. Adapun tujuan perbandingan ini adalah untuk mengamati pengaruh dari perkuatan *steel jacketing* pada sambungan *spun pile* – *pile cap* dengan beton pengisi.

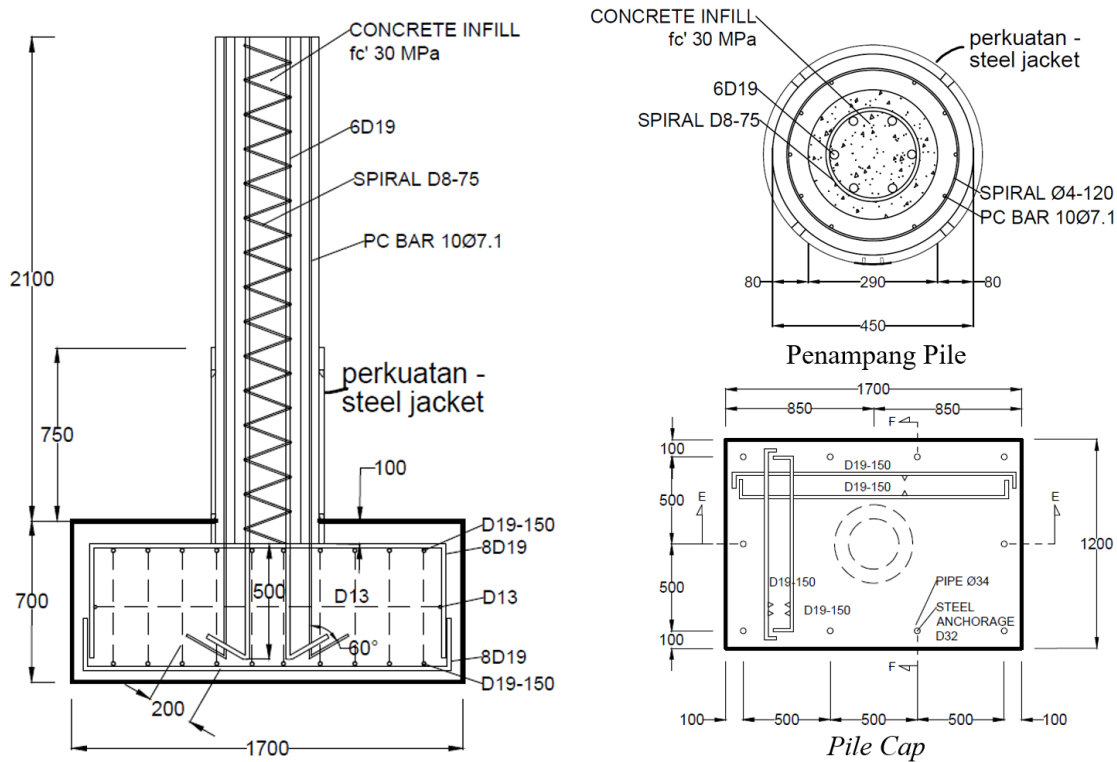
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Observasi Eksperimen dan Mode Kegagalan

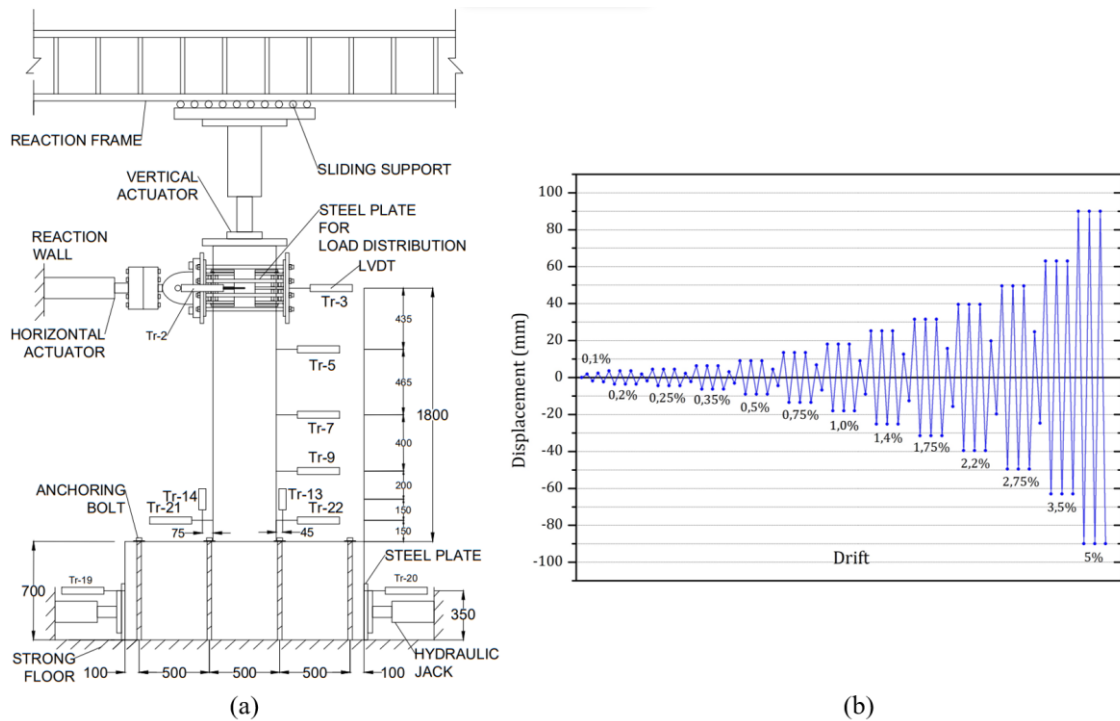
Kerusakan ditemukan pertama kali pada *drift* 1,75% dimana *pile* mengalami *uplift* terhadap *pile cap* sehingga menimbulkan *gap* antara *steel jacket* dengan *pile cap*. Fenomena ini mengakibatkan *debonding* antara *pile cap* dengan *steel jacket*, seperti ditunjukkan pada Gambar 3(a) dan mengakibatkan bagian *pile cap* yang bersentuhan dengan *steel jacket* terjadi *gap*. *Crack* pertama kali ditemukan pada *drift* 1,75% untuk kondisi pembebanan dorong dan tarik, dengan jenis *crack* berupa *flexural* dan *shear crack*. Jenis *crack flexural* diamati berdasarkan arah *crack* yang bergerak dalam arah sejajar arah pembebanan pada *spun pile*, sementara *shear crack* diamati berdasarkan arah *crack* yang miring dan tidak sejajar arah pembebanan. Letak *crack* berada pada ketinggian 950 mm dari permukaan *pile cap* atau 200 mm dari batas area perkuatan *steel jacketing* dengan arah keretakan dari arah *west* (kiri) dan *east* (kanan) menuju ke bagian tengah *spun pile* seperti terlihat pada Gambar 3(b).

Selain retak, seluruh tulangan *spun pile* mengalami *fracture* atau putus yang diamati melalui suara tulangan putus sepanjang pengujian. Tulangan pertama terdengar putus pada *drift* 2,2% dan tulangan terakhir terdengar putus pada *drift* 5%. Lokasi tulangan putus diduga berada pada ujung *spun pile* di bawah area perkuatan karena tidak ditemukan tulangan putus setelah area perkuatan dibobok. Hasil pengamatan setelah pembobokan menunjukkan *bonding* yang baik antara beton *grouting* dengan *spun pile* karena tidak ditemukan *spalling* pada beton *grouting*. Pada fase – fase akhir pengujian terjadi tekuk pada *steel jacket* karena adanya *gap* antara *steel jacket* dengan beton *grouting*, sehingga *steel jacket* tidak lagi tertahan akibat beban lentur dan memungkinkan terjadinya tekuk. Timbulnya *gap* menandakan

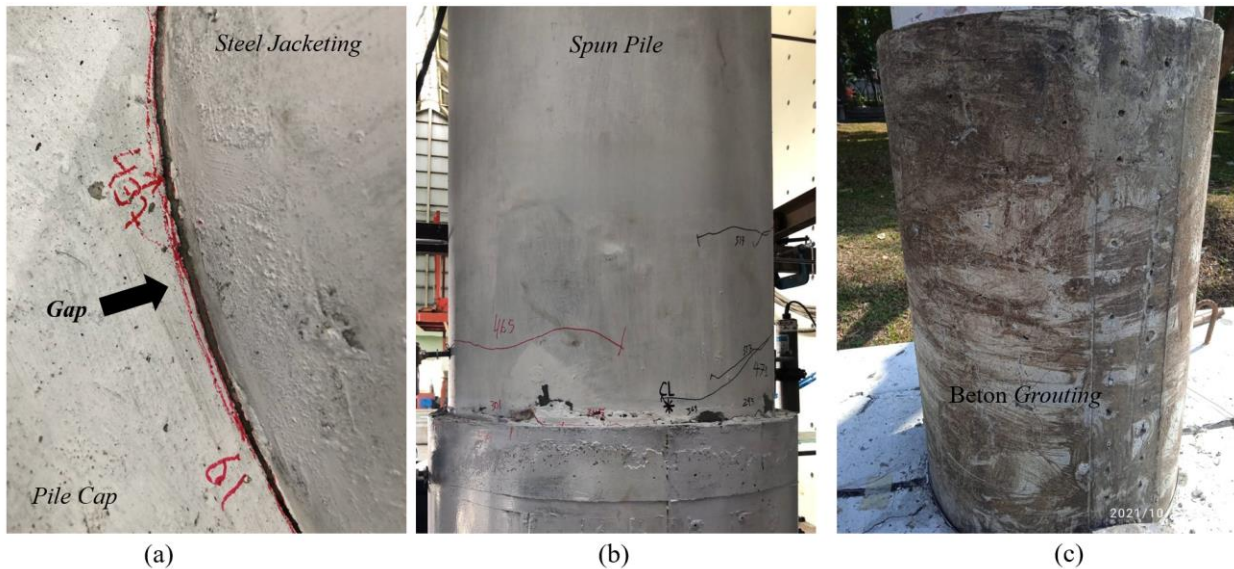
bahwa *steel jacket* tidak melekat sempurna pada beton *grouting*, oleh karena itu akan dilakukan studi numerikal dengan asumsi terjadi interaksi *perfectly bond* antara *steel jacket* dan *grouting*.



Gambar 1. Detail Benda Uji SPPC07



Gambar 2. (a) Set-up Pengujian; (b) Loading Protocol



Gambar 3. Pola Kerusakan Benda Uji. (a) *Debonding Pile Cap* dan *Steel Jacket*; (b) *Crack* pada *Spun Pile*; (c) Kondisi Benda Uji setelah *Steel Jacket* dilepas

Kurva Histeretik

Perkuatan *steel jacketing* yang diberikan berperan untuk meningkatkan *confinement* pada penampang *spun pile*. Rasio *confinement* penampang tanpa *steel jacket* menurut ASCE 7 – 16 dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 1 yang menghasilkan nilai rasio *confinement* minimum senilai 1,022%. Rasio *confinement* aktual dihitung dengan menggunakan Persamaan 2 yang menghasilkan nilai rasio *confinement* pada benda uji SPPC07 tanpa perkuatan *steel jacketing* sebesar 0,11%. Angka ini berada jauh dibawah standar rasio *confinement* yang seharusnya. Perkuatan *steel jacketing* dengan tebal 0,7 mm yang diberikan pada benda uji diasumsikan berperan sebagai sengkang dengan jarak 1 mm dengan diameter ekivalen sebesar 0,94 mm. Perolehan nilai diameter ekivalen dihitung dengan persamaan 3. Nilai rasio *confinement* dengan perkuatan *steel jacketing* meningkat lima kali lipat dengan nilai 0,56%. Benda uji SPPC02 Tandita et al. (2021) dengan rasio *confinement* 0,11% akan dibandingkan dengan benda uji SPPC07 yang memiliki rasio *confinement* 0,56%. Perbandingan kurva histeretik antara benda uji SPPC07 dan SPPC02 dapat diperlihatkan pada Gambar 4.

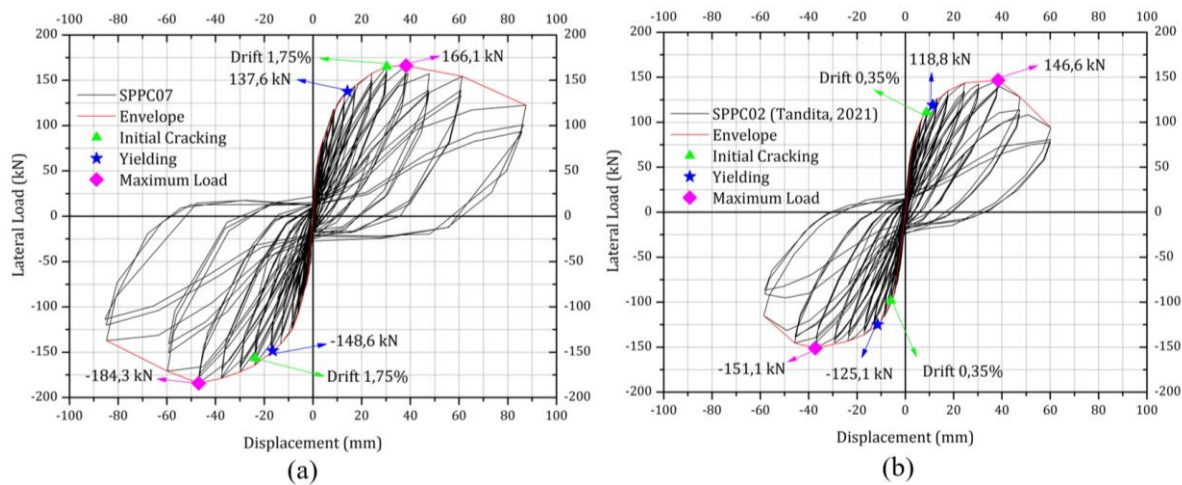
$$\rho_s = 0,25 \left(\frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \left(0,5 + \frac{1,4P}{f'_c A_g} \right) < 0,021 \quad (1)$$

$$\rho_{s \text{ aktual}} = \frac{4A_{sp}}{D'S} \quad (2)$$

$$\frac{\pi}{4} d^2 = s * t_{sj} \quad (3)$$

dengan ρ_s = rasio *confinement*, f'_c = kuat tekan beton (MPa), f_{yh} = kuat leleh Sengkang (MPa), A_g = luas penampang *pile* (mm²), A_{ch} = luas penampang *pile* yang terkekang (mm²), P = beban aksial (kN), A_{sp} = luas penampang Sengkang (mm²), D' = diameter Sengkang (mm), d = diameter sengkang ekivalen (mm), s = jarak sengkang (mm), dan t_{sj} = tebal *steel jacketing* (mm).

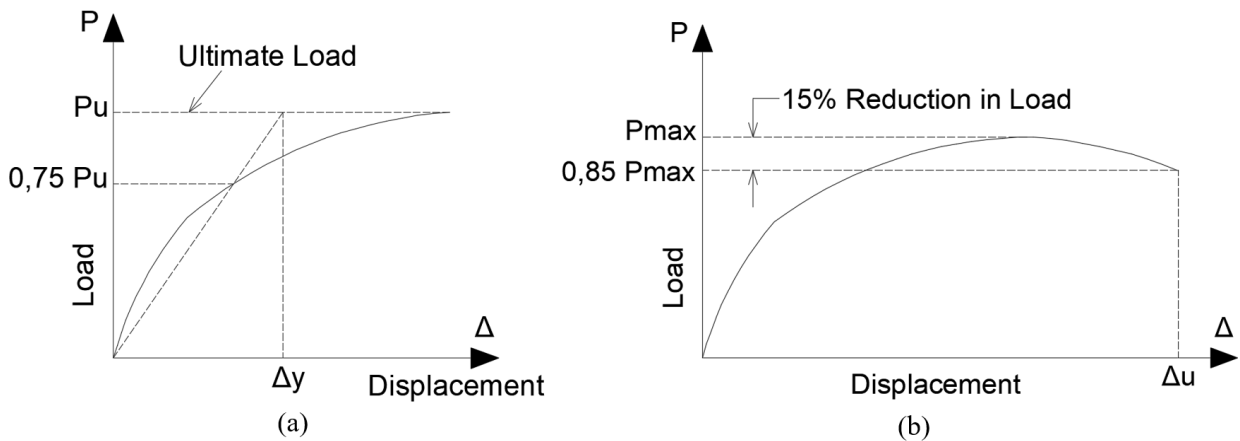
Perkuatan *steel jacketing* yang diberikan meningkatkan kapasitas lateral pada sambungan sebesar 13,3% saat kondisi pembebanan dorong dan 22% saat kondisi pembebanan tarik, dengan nilai rata-rata peningkatan 18%. Berdasarkan Gambar 4(a), terlihat bahwa perkuatan *steel jacketing* yang diberikan masih belum mampu menghindari fenomena *pinching* yang terjadi. Adapun *pinching* ditandai dengan reduksi kekakuan yang besar pada fase *reloading* setelah *unloading*. Meskipun perkuatan *steel jacketing* mampu meningkatkan kekuatan, tetapi masih belum dapat meningkatkan serapan energi gempa secara signifikan. Jika diperhatikan dengan lebih saksama, besarnya kapasitas lateral pada saat pembebanan tarik (-) cenderung lebih besar daripada saat pembebanan dorong (+). Hal ini disebabkan oleh adanya *displacement* permanen pada saat pembebanan dorong pertama, sehingga diperlukan beban yang lebih besar untuk kembali ke posisi *displacement* sama dengan nol. Selain itu, pengujian benda uji SPPC02 dihentikan ketika *drift* 3,5%; sedangkan ketika benda uji diberikan perkuatan *steel jacketing*, benda uji mampu bertahan hingga *drift* 5%. Hal ini menandakan bahwa perkuatan *steel jacketing* mampu meningkatkan daktilitas pada sambungan *spun pile – pile cap*.



Gambar 4. Kurva Histeretik. (a) Benda Uji SPPC07; (b) Benda Uji SPPC02 (Tandita, 2021)

Daktilitas

Daktilitas adalah kemampuan struktur untuk mengalami deformasi siklik yang besar pada daerah inelastik tanpa mengalami reduksi kekuatan yang substantial, sehingga struktur dapat mendisipasi sejumlah energi saat mengalami deformasi siklik. Daktilitas dihitung dengan membandingkan antara deformasi maksimum dengan deformasi yang terjadi pada saat yielding. Jenis deformasi yang digunakan dalam menghitung nilai daktilitas adalah deformasi lendutan (Δ). Oleh karena itu, nilai daktilitas yang digunakan merupakan perbandingan antara lendutan saat *ultimate* (Δ_u) dengan nilai lendutan saat struktur mengalami *yielding* (Δ_y). Menurut R Park (1989), nilai dari Δ_u didefinisikan sebagai lendutan setelah beban puncak telah mengalami degradasi 15% dari titik maksimumnya dan nilai Δ_y ditentukan berdasarkan perpotongan garis linear saat beban *ultimate* direduksi 75%. Nilai Δ_u dan Δ_y pada kurva *load – displacement* diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Definisi Parameter Daktilitas. (a) Δ_u ; (b) Δ_y (R Park, 1989)

Nilai daktilitas yang diperoleh pada saat kondisi benda uji mengalami pembebanan dorong adalah 5,10 dan saat pembebanan tarik adalah 4,26 dengan nilai rata-rata daktilitas adalah 4,68. Terdapat selisih daktilitas sebesar 20 persen antara daktilitas pada saat kondisi pembebanan dorong dan tarik. Adapun hal ini diakibatkan karena perbedaan letak beban maksimum yang bekerja pada benda uji. Pada saat mengalami pembebanan dorong, benda uji mengalami beban maksimum pada *drift* sekitar 2,2% sedangkan pada kondisi pembebanan tarik, benda uji mengalami beban maksimum pada *drift* sekitar 2,75%. Dengan kondisi pembebanan dorong mengalami *ultimate* lebih dahulu, nilai Δ_u yang diperoleh akan lebih kecil daripada Δ_u pada fase pembebanan tarik, yang mengakibatkan nilai daktilitas pada kondisi dorong lebih besar daripada saat kondisi tarik. Hasil perhitungan daktilitas juga dibandingkan dengan benda uji SPPC02. Nilai daktilitas yang didapat pada benda uji SPPC02 menunjukkan nilai daktilitas sebesar 4,45. Hal ini menunjukkan bahwa perkuatan *steel jacketing* dapat meningkatkan daktilitas pada sambungan *spun pile – pile cap*

dengan beton pengisi sebesar 5,2%. Mengacu pada FEMA 356 (Federal Emergency Management Agency, 2000) nilai daktilitas benda uji yang bernilai lebih dari empat tergolong sebagai struktur dengan daktilitas tinggi.

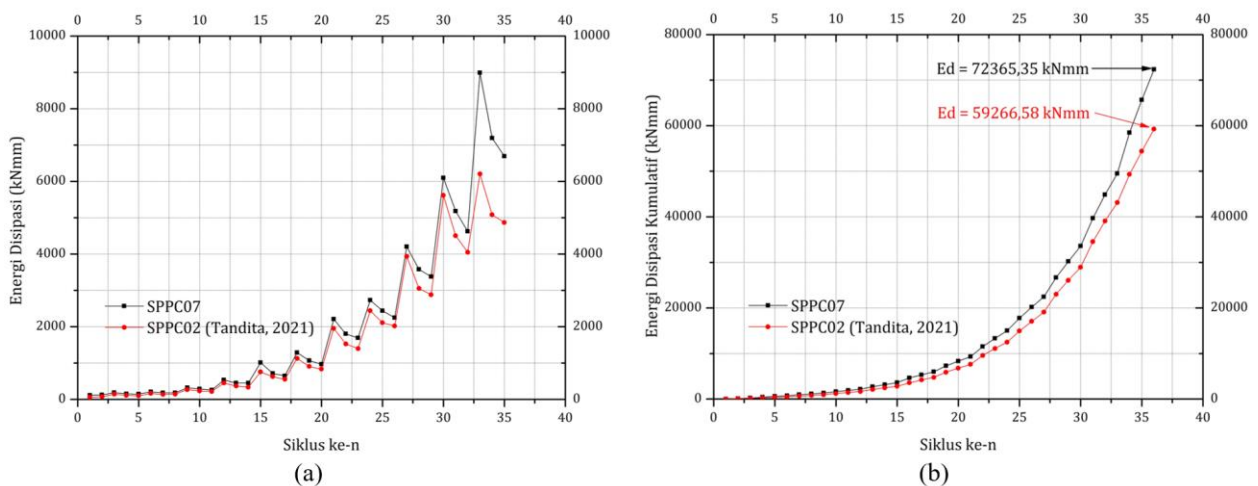
Tabel 2 memperlihatkan perhitungan daktilitas pada benda uji SPPC07 dan SPPC02.

Tabel 2. Parameter Daktilitas

Benda Uji	SPPC 02		SPPC 07	
	(Tandita, 2021)			
Arah Beban	Dorong	Tarik	Dorong	Tarik
Δu (mm)	48,74	-52,93	72,17	-70,36
Δy (mm)	11,39	-11,44	14,15	-16,50
$\mu = \Delta u / \Delta y$	4,28	4,62	5,09	4,26
μ_{avg}	4,45		4,68	

Energi Disipasi

Energi disipasi menunjukkan besarnya energi yang diserap oleh struktur saat gempa. Besarnya energi disipasi dapat dihitung dengan mencari luas bidang dalam kurva histeretik. Gambar 6(a) menunjukkan perbandingan energi disipasi dari tiap siklus antara SPPC07 dan SPPC02 serta Gambar 6(b) menunjukkan perbandingan energi disipasi kumulatif antar keduanya. Terlihat bahwa energi disipasi meningkat seiring dengan meningkatnya *drift* dan mengalami penurunan antar siklus pada *drift* yang sama. Menurut Badriah & Imran (2014), hal ini disebabkan karena perkembangan retak pada *drift* yang sama relatif konstan sehingga hanya terjadi pelebaran *crack* pada lokasi yang sama. Peningkatan energi disipasi antar *drift* terjadi karena besar gaya lateral yang diberikan semakin besar seiring dengan peningkatan antar *drift*. Sedangkan penurunan energi disipasi antar siklus pada *drift* yang sama disebabkan oleh kondisi benda uji yang telah mengalami *damage* – dalam kondisi ini berupa *crack* – pada siklus pertama, yang kemudian pada siklus kedua dan ketiga hanya merupakan kelanjutan *damage* dari siklus pertama, sehingga tidak terjadi *damage* baru yang berarti antar siklus pada *drift* yang sama. Penggunaan *steel jacketing* meningkatkan energi disipasi kumulatif sebesar 22%.



Gambar 6. Energi Disipasi Benda Uji. (a) Perbandingan Energi Disipasi SPPC07 dan SPPC02; (b) Perbandingan Energi Disipasi Kumulatif SPPC07 dan SPPC02

Studi Numerikal

Studi numerikal dilakukan dengan menggunakan program ABAQUS 6.14 untuk menganalisis benda uji SPPC07 dengan interaksi *perfectly bond* antara *steel jacket* dan *grouting*. Model benda uji dengan perkuatan *steel jacketing* diperlihatkan pada Gambar 7. Material yang digunakan dalam permodelan dimodelkan sebagai *elastic – plastic* material. Fase inelastik beton dimodelkan dengan menggunakan fitur *concrete damage plasticity* dengan menginput nilai tegangan dan regangan inelastis, serta *damage parameter*. *Constitutive model* beton yang digunakan dalam permodelan adalah milik Reddiar (2009) yang terdiri dari tiga koordinat utama, yaitu saat kekuatan *ultimate* (ϵ_{co} ; f_c'),

kekuatan pasca *ultimate* (ϵ_{c1} ; f_{c1}), dan saat *failure strain* (ϵ_{sp} ; 0). Persamaan 4 hingga Persamaan 9 digunakan untuk menentukan hubungan tegangan – regangan beton pada permodelan ABAQUS.

$$\epsilon_{co} = 0,0015 + \frac{f'_c(MPa)}{70000} \quad (4)$$

$$\epsilon_{c1} = 0,0036 \quad (5)$$

$$\epsilon_{sp} = 0,012 - 0,0001 f'_c \quad (6)$$

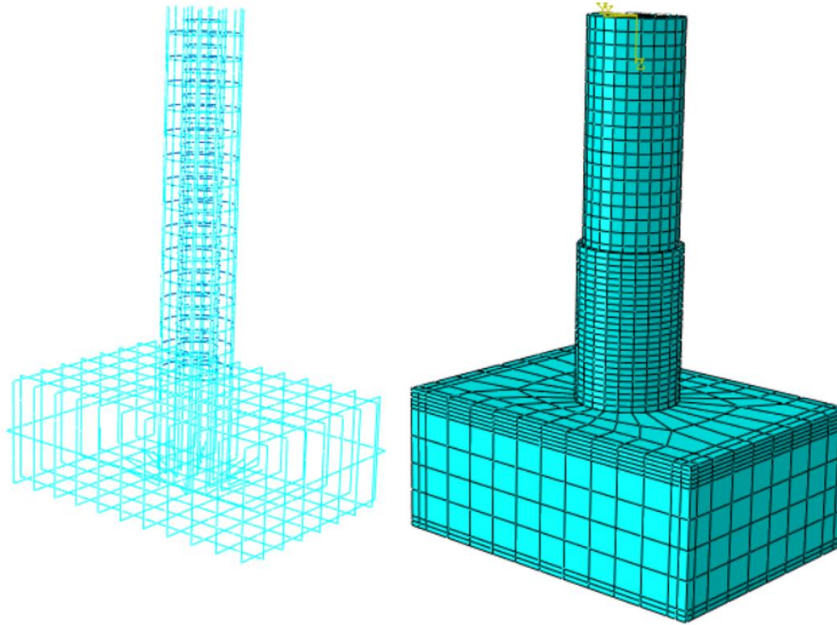
$$E_c = 5000\sqrt{f'_c(MPa)} \quad (7)$$

$$f_c = K f'_c(1 - |1 - x|^n) MPa \quad (8)$$

$$Unconfined Concrete, n = \frac{E_c \epsilon_{co}}{f'_c} \quad (9)$$

dengan ϵ_{co} = regangan saat kuat tekan beton *ultimate*, f'_c = kuat tekan beton (MPa), ϵ_{c1} = regangan beton pasca *ultimate*, ϵ_{sp} = regangan beton saat *failure strain*, E_c = modulus elastisitas beton (MPa), f_c = kuat tekan beton (MPa).

Hubungan tegangan – regangan pada fase tarik mengacu pada *constitutive model* milik Nayal & Rasheed (2006) dengan nilai kuat tarik beton (f'_t) diambil menurut ACI 318 – 2019 sebesar $0,62\sqrt{f'_c}$. *Constitutive model* milik Nayal & Rasheed (2006) membuat hubungan tegangan – regangan tarik beton dengan menghubungkan tiga koordinat titik utama secara linear, yaitu fase *ultimate* (ϵ_t ; f'_t), fase *primary cracking* (ϵ_t ; $0,8f'_t$), dan fase *secondary cracking* ($0,4\epsilon_t$; $0,45f'_t$). Gambar 8(a) menunjukkan model kurva beton yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 7. Model ABAQUS Benda Uji

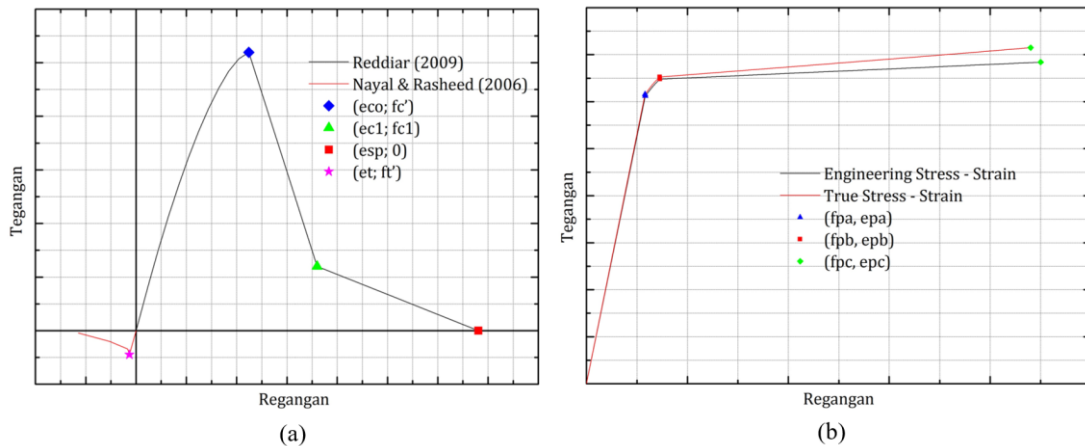
Kurva tegangan – regangan baja yang digunakan dalam penelitian ini mengacu kepada model buatan Thompson & Park (1978) baik untuk tulangan *prestress* maupun untuk tulangan biasa. Material baja juga dimodelkan sebagai *elastic – plastic* material dengan input yang diperlukan untuk mendefinisikan adalah nilai *true stress* dan *true strain* dengan formulasi menggunakan Persamaan 10 hingga Persamaan 11. Kurva tegangan – regangan *prestressed bar* terdiri dari dua garis linear yang dihubungkan dengan garis hiperbolik dengan menghubungkan tiga titik utama, yaitu f_{pa} , f_{pb} , dan f_{pc} . Nilai f_{pa} merupakan titik *yielding*, yang diasumsikan bernilai $0,85f_u$. Nilai f_{pb} merupakan nilai tegangan saat mulai memasuki fase *plastic*. Nilai f_{pc} merupakan kuat *ultimate prestressed bar* atau f_u . Besar tegangan pada fase hiperbolik diperoleh dengan menggunakan Persamaan 12. Gambar 8(b) menunjukkan model kurva *prestressed bar* yang digunakan dalam penelitian ini.

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng}(1 + \epsilon_{eng}) \quad (10)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (11)$$

$$f_p = \left(\frac{f_{pb}\varepsilon_{pb} - f_{pa}\varepsilon_{pa}}{\varepsilon_{pb} - \varepsilon_{pa}} + \frac{(\varepsilon_{pb}\varepsilon_{pa})(f_{pa} - f_{pb})}{\varepsilon_p(\varepsilon_{pb} - \varepsilon_{pa})} \right) \quad (12)$$

dengan σ_{true} = true stress (MPa), σ_{eng} = engineering stress (MPa), ε_{true} = true strain, ε_{eng} = engineering strain, ε_{pa} = regangan saat f_{pa} , dan ε_{pb} = regangan saat f_{pb} .



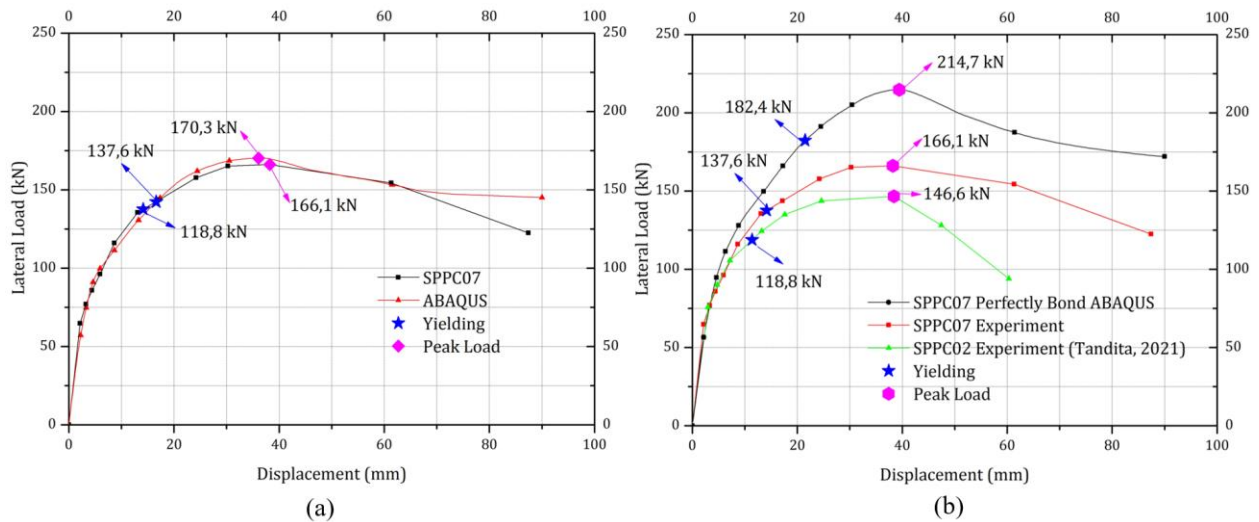
Gambar 8. Kurva Tegangan Regangan Material. (a) Beton; (b) Prestressed Bar

Komponen beton dimodelkan dengan menggunakan elemen C3D8R, yaitu 3D 8-node *solid reduced-integration element*. Komponen tulangan dimodelkan dengan menggunakan elemen T3D2 – 3D 2-node *truss element*. Komponen *zincalume* menggunakan elemen S4R, yaitu 4-node *shell element*. Jenis interaksi *surface-to-surface contact* digunakan untuk mendefinisikan interaksi yang terjadi antar komponen *solid*. *Surface contact* memungkinkan pengguna untuk mendefinisikan *normal behaviour* dan *tangential behaviour* pada permukaan interaksi yang memungkinkan terjadinya kontak dalam arah normal dan arah tangential. Nilai koefisien friksi yang digunakan pada kontak arah tangential adalah 0,3 dan 0,9 dengan nilai 0,3 digunakan pada interaksi antara *spun pile – grouting* dan *steel jacket – grouting*. *Embedded region* digunakan untuk mendefinisikan interaksi yang terjadi antara beton dengan tulangan atau antara komponen *solid* dengan komponen *truss*. Tegangan awal pada *prestressed bar* diinput menggunakan fitur *predefined field*, dengan besar tegangan 0,75 F_u serta *loss of prestress* sebesar 20%, sehingga tegangan *prestress* adalah 864 MPa. Nilai tegangan berkurang secara linear sepanjang diameter *spun pile* hingga pada ujung *pile* yang terpotong bernilai 0. Perletakan tipe jepit atau *fixed* diberikan pada bagian bawah *pile cap*.

Kurva *lateral load – displacement* yang diperoleh dari model FE dibandingkan dengan kurva *envelope* eksperimen seperti ditunjukkan pada Gambar 9(a). Asumsi adanya friksi antara *steel jacketing* dan beton *grouting* pada permodelan membuktikan bahwa pada pengujian eksperimen keduanya tidak melekat sempurna. Terlihat bahwa permodelan dapat merepresentasikan hasil eksperimen dengan baik hingga benda uji mencapai titik *ultimate*. Meskipun demikian, permodelan FE masih belum dapat menggambarkan dengan tepat fase *failure*. Model FE mengalami isu konvergensi sebelum menyelesaikan analisis hingga *displacement* yang diinginkan. Hal ini dikarenakan beberapa faktor, diantaranya adalah *instability data* pada material dimana input tegangan – regangan menimbulkan modulus elastisitas bernilai negatif. Kemudian isu lainnya adalah penggunaan komponen yang terlalu kompleks, yang terdiri dari *spun pile*, *concrete infill*, *pile cap*, dan *steel jacketing*. Hal ini menimbulkan interaksi yang terjadi antara node juga semakin banyak, sehingga isu konvergensi sulit dihindari.

Studi numerikal kemudian dilanjutkan dengan menghilangkan friksi antara *steel jacketing* dan beton *grouting*, sehingga keduanya memiliki interaksi *perfectly bond*. Jenis interaksi yang digunakan pada program ABAQUS adalah *tie*, yang mendefinisikan interaksi antara dua permukaan tanpa adanya friksi. Hasil yang didapat kemudian dibandingkan dengan benda uji SPPC07 dan SPPC02 untuk melihat pengaruh *steel jacketing* yang melekat sempurna pada benda uji. Studi numerikal menunjukkan bahwa kapasitas lateral pada model dengan interaksi *perfectly bond* meningkat sebesar 30% jika dibandingkan dengan SPP07 dan meningkat sebesar 46% jika dibandingkan dengan SPPC02. Perilaku komposit antara *steel jacket* dan tiang terbukti dapat meningkatkan kapasitas lateral pada benda uji. Namun, daktilitas model dengan interaksi *perfectly bond* mengalami penurunan sebesar 30% jika dibandingkan dengan daktilitas SPPC07 dan SPPC02. Adapun hal ini terjadi karena sifat material *steel jacketing*, yaitu *zincalume*

sendiri yang meskipun berkekuatan tinggi, tetapi tidak daktil. Ikatan *perfectly bond* pada permodelan menyebabkan *zincalume* berperan cukup besar dalam peforma struktur, sehingga daktilitas pada permodelan mengalami penurunan.



Gambar 9. Hasil Studi Numerik. (a) Validasi; (b) Interaksi *Perfectly Bond Steel Jacket*

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil uji eksperimen dapat ditarik kesimpulan bahwa perkuatan *steel jacketing* dapat meningkatkan kekuatan, daktilitas, dan energi disipasi pada sambungan *spun pile – pile cap* dengan *reinforced concrete infill*. Pola kerusakan yang ditemui pada sambungan berupa *crack* pada bagian *spun pile* yang tidak dilapisi perkuatan setinggi 200 mm dari area perkuatan *steel jacketing* dengan jenis *crack* berupa *crack flexural* dan *crack shear*. Permodelan numerikal menggunakan ABAQUS 6.14 menunjukkan hasil validasi yang baik dengan kurva *envelope* eksperimen. Permodelan dilakukan untuk meninjau peforma sambungan *spun pile – pile cap* dengan perkuatan *steel jacketing* yang melekat sempurna pada area perkuatan. Studi numerikal menunjukkan peningkatan kapasitas lateral dan penurunan nilai daktilitas pada model dengan interaksi *steel jacketing perfectly bond* yang disebabkan oleh kontribusi yang cukup besar dari material *zincalume* sebagai lapisan *steel jacketing* yang memiliki kekuatan tinggi, tetapi tidak daktil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Kementrian Riset dan Universitas Indonesia melalui Riset Terapan, nomor kontrak NKB-254/UN2.RST/HKP.05.00/2021 dan PT Wijaya Karya Beton, Tbk.

DAFTAR PUSTAKA

- American Concrete Institute. (2013). *Guide for Teesting Reinforced Concrete Structural Elements under Slowly Applied Simulated Seismic Load* (ACI 374.2R-13). https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=374213&Language=English&Units=US_AND_METRIC
- American Society of Civil Engineers. (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (ASCE 7-16). <https://sp360.asce.org/PersonifyEbusiness/Merchandise/Product-Details/productId/233133882>.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *Persyaratan Perancangan Geoteknik* (SNI 8460:2017). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Badriah, R. M. S., & Imran, I. (2014). Kinerja Struktur Portal Terbuka Beton Bertulang Terhadap Beban Lateral. *Jurnal Teknik Sipil*, 10(2), 92-119.
- Bang, J.-W., Oh, S.-J., Lee, S.-S., & Kim, Y.-Y. (2016). Pile-cap Connection Behavior Dependent on the Connecting Method between PHC pile and Footing. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(3), 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. *Structural Engineering International*, 27(4), 546–557.

- <https://doi.org/10.2749/222137917X14881937845963>
- Ikeda, S., Tsubaki, T., & Yamaguchi, T. (1982). Ductility Improvement of Prestressed Concrete Piles. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 4, 531–538.
- Irawan, C., Djamaluddin, R., Raka, I. G. P., Faimun, Suprobo, P., & Gambiro. (2018). Confinement behavior of spun pile using low amount of spiral reinforcement - An experimental study. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 8(2), 501–507. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.8.2.4343>
- Irawan, C., Djamaluddin, R., Raka, I. G. P., Faimun, Suprobo, P., & Gambiro. (2020). The effect of the presence of infilling concrete on flexural performance of spun pile – An experimental study. *Jurnal Teknologi*, 82(1), 85–94. <https://doi.org/10.11113/jt.v82.11974>
- Irawan, C., Djamaluddin, R., Raka, I. G. P., & Suprobo, P. (2016). Experimental Investigation of Failure Mechanism of Spun Pile Due To Monotonic Loading Using Nehrp 2000. *International Conference on Protective Structures (ICPS4), Beijing, China, October*, 313–322.
- Irawan, C., Suprobo, P., Gusti Putu Raka, I., & Djamaluddin, R. (2014). A review of prestressed concrete pile with circular hollow section (Spun pile). *Jurnal Teknologi*, 72(5), 115–123. <https://doi.org/10.11113/jt.v72.3950>
- Joel, P. H. (1987). *Seismic Performance of Prestresses Concrete Piles and Pile - Pile Cap Connections*. 319.
- Kaneko, O., Kawamata, S., Nakai, S., Sekiguchi, T., & Mukai, T. (2018). Analytical study of the main causes of damage to pile foundations during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. *Japan Architectural Review*, 1(2), 235–244. <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12033>
- Li, Y. F., Hwang, J. S., Chen, S. H., & Hsieh, Y. M. (2005). A study of reinforced concrete bridge columns retrofitted by steel jackets. *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A/Chung-Kuo Kung Ch'eng Hsueh K'an*, 28(2), 319–328. <https://doi.org/10.1080/02533839.2005.9670997>
- Mizuno, H., Iiba, M., & Hirade, T. (1996). Pile Damage During the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake in Japan. In *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Nayal, R., & Rasheed, H. A. (2006). Tension Stiffening Model for Concrete Beams Reinforced with Steel and FRP Bars. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(6), 831–841. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2006\)18:6\(831\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2006)18:6(831))
- Olmos, B., Jara, J. M., Gómez, G., & Martínez, G. (2019). Influence of steel jacket thickness on the RC bridges' seismic vulnerability. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(1), 15–34. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.09.004>
- R Park. (1989). Structural Assemblages From Laboratory Testing. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 22(3), 155–166.
- Reddiar, M. K. M. (2009). *STRESS-STRAIN MODEL OF UNCONFINED AND CONFINED CONCRETE AND STRESS-BLOCK PARAMETERS*. Pondicherry Engineering College.
- Tandita, A. H., Lase, Y., Prakoso, W. A., & Orientilize, M. (2021). The Numerical Study Of Spun Pile To Pile Cap Connection With Reinforced Concrete Infill Under Cyclic Loading. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 2013–2015.
- Thompson, K. J., & Park, R. (1978). Stress-Strain Model for Grade 275 Steel With Cyclic Loading. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 11(4), 209–218. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.11.4.209-218>
- Yang, Z., Li, G., & Nan, B. (2020). Study on Seismic Performance of Improved High-Strength Concrete Pipe-Pile Cap Connection. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4326208>

