

Performa Aksial Tekan pada Aplikasi *Fibre Reinforced Polymer* (FRP) terhadap Perkuatan Kolom *Concrete Filled Steel Tube* (CFST) menggunakan Metode Elemen Hingga

Ida Ayu Saraswati^{1,*}, Budi Suswanto¹, Ahmad Basshofi Habieb¹

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya¹

Koresponden*, Email: ida.saraswati@ymail.com

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	05 Juni 2022	<i>Concrete Filled Tubes (CFT) steel tube columns are widely applied in various structural systems that have long spans and many levels such as buildings and bridges. In this thesis, we will discuss strengthening the CFT column by installing a 3-layer carbon-type FRP stripe (CFRP) in the area where there is a potential for a plastic joint that is assumed to be at the lower end of the CFT column. The specimen test parameters are in the form of steel thickness from the CFT column and the effect of CFRP restraint on the column. Modeling due to cyclic lateral loads is modeled with the ABAQUS auxiliary program. From the modeling results, it was analyzed that CFRP significantly increased bearing capacity and reduced the level of crushing of core concrete and inhibited the occurrence of buckling in steel tubes on the CFT column. The brittle behavior of CFRP materials is still able to work well on CFT columns by showing a trend of stiffness degradation that is not sharp. In addition, thickening the CFT-CFRP column from 3 mm to 5 mm and 10 mm can slow down buckling, increase bearing axial capacity, initial stiffness, increase energy dissipation and ductility.</i>
Diperbaiki	25 Juli 2022	
Disetujui	25 Juli 2022	

Keywords: CFST-CFRP column, bearing capacity, ABAQUS, local buckling.

Abstrak

Kolom tabung baja terisi beton atau *Concrete Filled Tubes* (CFT) banyak diaplikasikan dalam berbagai sistem struktur yang memiliki bentang panjang dan jumlah tingkat yang banyak seperti gedung dan jembatan. Dalam tesis ini akan dibahas perkuatan kolom CFT dengan pemasangan FRP tipe karbon (CFRP) sejumlah 3 lapis pada daerah yang berpotensi terjadi sendi plastis yang diasumsikan berada di ujung bawah kolom CFT. Parameter uji spesimen yaitu berupa tebal baja dari kolom CFT dan pemasangan CFRP. Pemodelan akibat beban lateral siklik dimodelkan dengan software ABAQUS. Dari hasil pemodelan dianalisis bahwa CFRP signifikan meningkatkan *bearing capacity* aksial dan mengurangi tingkat *crushing* beton inti dan menghambat terjadinya buckling pada tabung baja pada kolom CFT. Perilaku material CFRP yang getas masih mampu bekerja dengan baik pada kolom CFT dengan menunjukkan tren degradasi kekakuan yang tidak tajam. Selain itu, dengan mempertebal kolom CFT-CFRP dari 3 mm menjadi 5 mm dan 10 mm dapat memperlambat buckling, menambah bearing capacity aksial, *initial stiffness*, meningkatkan disipasi energi dan daktilitas

Kata kunci: kolom CFST-CFRP, kapasitas tahanan, ABAQUS, tekuk lokal

1. Pendahuluan

Kolom tabung baja terisi beton atau *Concrete Filled Steel Tube* (CFST) umumnya lebih diminati daripada kolom beton bertulang atau *Reinforced Concrete* (RC) dan kolom baja konvensional karena beberapa keunggulannya seperti kekuatan, daktilitas, dan kekakuan yang lebih tinggi [1]. Beton inti dapat meningkatkan kekakuan tabung baja dan mengurangi risiko tekuk global maupun tekuk lokal. Ketika kolom menerima kompresi, pengekangan oleh tabung baja menahan deformasi beton ke arah lateral [2]. Kolom tidak hanya mengalami beban aksial tekan tetapi juga beban lateral seperti beban angin dan seismik. Akibat pembebanan berulang tersebut, tekuk lokal terbentuk pada area dimana momen paling besar dihasilkan sehingga mengurangi

efisiensi pengekangan beton inti yang disediakan tabung baja [3]. Selain itu, untuk tabung baja persegi yang memiliki dinding tipis dengan material mutu tinggi sangat rentan terhadap tekuk lokal [4]. Meskipun tekuk ke arah dalam tabung baja dicegah oleh beton inti, tekuk lokal ke arah luar yang terjadi dapat menyebabkan penurunan sifat mekanis kolom [5]. Kolom CFST dengan pembebanan tinggi juga tidak menunjukkan kinerja seismik yang baik kecuali tabung baja yang digunakan sangat tebal. Fenomena tersebut lebih eksplisit ketika kolom CFST yang digunakan berpenampang persegi atau *Rectangular Concrete Filled Steel Tube* (RCFST) yang mana bentuk penampang tersebut cenderung lebih diaplikasikan pada berbagai struktur bangunan [6]. Umumnya, perkuatan bangunan meliputi pengelasan,

pembautan pengaku pelat baja maupun elemen bresing [7]. Akan tetapi, akibat pengelasan pelat baja, perubahan distribusi tegangan dan sifat material terjadi di dalam struktur, sehingga menimbulkan tegangan sisa [8].

Oleh karena itu, pada daerah kritis tersebut dibutuhkan rotasi plastis yang besar tanpa terjadi penurunan kekakuan dan kekuatan yang signifikan. Alternatif perkuatan lainnya yaitu menambahkan material *Fibre Reinforced Polymer* (FRP). FRP menunjukkan keunggulan karakteristik seperti berikut: [9]

- Rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi dan modulus yang spesifik tinggi.
- Sifat material yang sesuai dengan segala desain kolom.
- Ketahanan korosi yang sangat baik.
- Koefisien muai panas mendekati dengan material beton.

Pengujian kolom CFST yang terkekang FRP terhadap kinerja seismiknya telah dilakukan sebelumnya oleh beberapa peneliti. Investigasi kolom CFST menggunakan beton yang terbuat dari campuran air laut dan pasir atau *Seawater and Sea Sand Concrete* (SWSSC) yang dilapisi oleh tabung FRP menunjukkan respon yang serupa antara tegangan-regangan aksial tabung FRP dengan tegangan-regangan aksial keseluruhan bagian kolom [10]. Hal ini menunjukkan bahwa tabung FRP dapat bekerja dengan baik bersama tabung baja dan menghasilkan deformasi yang sinkron. Selain itu, pengujian kolom SWSSC yang dikekang FRP lainnya terhadap beban tekan aksial siklik menunjukkan efek pengekanan dari FRP yang secara efektif meningkatkan kondisi ultimit spesimen. Sehingga membuat kolom CFST mencapai kekuatan yang lebih tinggi dan memiliki daktilitas yang baik [11]. Pengujian terhadap 36 kolom SWSSC yang dikekang FRP menunjukkan bahwa FRP bagian dalam dan luar kolom mampu menunda tekuk lokal dari tabung baja. Selain itu, tabung FRP dapat meningkatkan daya dukung dan deformabilitas dari kolom CFST tersebut [12]. Perilaku tegangan-regangan dari 6 kolom CFST dengan berbagai ketebalan FRP akibat pembebanan aksial siklik menunjukkan, dengan bertambahnya jumlah lapisan FRP, performa FRP dalam memulihkan regangan, kondusif terhadap susut beton selama *unloading* dan secara efektif memperlambat perkembangan regangan plastis [13]. Perilaku kolom CFST yang menggunakan beton mutu tinggi atau *High Strength Concrete* (HSC) dan baja mutu tinggi atau *High Strength Steel* (HSS) akibat beban seismik juga diinvestigasi secara eksperimental. Didapat bahwa efek dari ketebalan tabung FRP pada kolom CFST tidak signifikan [14]. Analisis kolom CFST-FRP menggunakan beton tipe *Recycled Concrete Lumps* (RCL)

didapat bahwa untuk spesimen dengan FRP 6 lapis, tegangan aksial berkurang secara signifikan karena adanya material RCL tersebut. Namun, untuk spesimen dengan FRP 9 lapis, tegangan aksial kolom menjadi tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa efek negatif terkait penggunaan RCL dapat dieliminasi dengan menyediakan pengekanan FRP yang cukup. Perilaku pasca-elastis dari kolom CFST yang memiliki tabung baja ganda atau *Double Skin Tubular Column* (DSTC) dan dikekang FRP menunjukkan perilaku tekan DSTC meningkat hingga sekitar 43% dalam hal kapasitas beban aksial [16]. Selain itu, dampak dari parameter yang berbeda pada kapasitas beban aksial kolom DSTC menunjukkan, ketika rasio panjang kolom terhadap diameter tabung eksternal lebih rendah dan diameter tabung internal konstan, kapasitas beban aksial meningkat sebesar 44,1% hingga 65,4%. Kapasitas beban aksial menjadi turun sebesar 12,6% ketika dimensi tabung baja luar konstan [17].

Merujuk pada latar belakang tersebut, penelitian ini akan dibahas terkait ketebalan tabung baja yang efektif dapat memperlambat *buckling* pada ujung bawah kolom CFST-CFRP. Selain itu, signifikansi degradasi kekakuan kolom CFST tanpa CFRP maupun diperkuat CFRP ketika fase pasca elastis akan dipaparkan. Performa seismik kolom juga dievaluasi seperti daktilitas, disipasi energi, *initial stiffness* dan kapasitas tahanan setelah elemen struktur baja menjadi kesatuan material komposit FRP akibat pembebanan lateral.

2. Metode

Data geometri, konfigurasi, material dan skema pembebanan yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada pengujian kolom CFST-CFRP skala besar [5]. Pendekatan analisis menggunakan metode elemen hingga dengan program bantu ABAQUS. Hubungan tegangan-regangan tabung baja Q550 disimulasikan menggunakan model trilinear yang ditunjukkan pada **Gambar 1** dan berdasarkan perumusan pada Persamaan 1.

$$\epsilon_s = \begin{cases} \frac{f_s}{E_s} & , 0 < f_s \leq 730 \text{ MPa} \\ \frac{f_s}{\alpha E_s} & , 730 < f_s \leq 825 \text{ MPa} \\ 1,25 \epsilon_u & , f_s > 825 \text{ MPa} \end{cases} \quad (1)$$

Parameter plastis *Concrete Damage Plastic* (CDP) dalam model ABAQUS ditunjukkan pada **Tabel 1**. Sedangkan pendekatan kurva tegangan-regangan tekan dan tarik beton *confined* akibat efek pengekanan tabung baja ditunjukkan pada **Gambar 2** dan **Gambar 3**. Pendefinisian kurva tersebut

$$\frac{\sigma_c}{f'_c} = \begin{cases} \frac{2\epsilon_c - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0}\right)^2}{\epsilon_0} & , 0 < \epsilon_c \leq \epsilon_0 \\ \frac{\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0}}{\beta_0 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - 1\right)^{1,6+1,5\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} + \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0}}} & , \epsilon_c > \epsilon_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\epsilon_{c0} = (1300 + 12.5f_c) + \left[1330 + 760 \left(\frac{f_c}{24} - 1\right)\right] \xi^{0.2} \quad (3)$$

$$\sigma_{c0} = \left[1 + (-0.0135\xi^2 + 0.1\xi) \left(\frac{24}{f_c}\right)^{0.45}\right] f_c \quad (4)$$

$$\epsilon_{t0} = 0.0000431\sigma_{t0} \quad (5)$$

$$\sigma_{t0} = 0.26(1.25f_c)^{2/3} \quad (6)$$

$$\beta_0 = \frac{(f'_c)^{0.1}}{1.35\sqrt{1+\xi}} \quad (7)$$

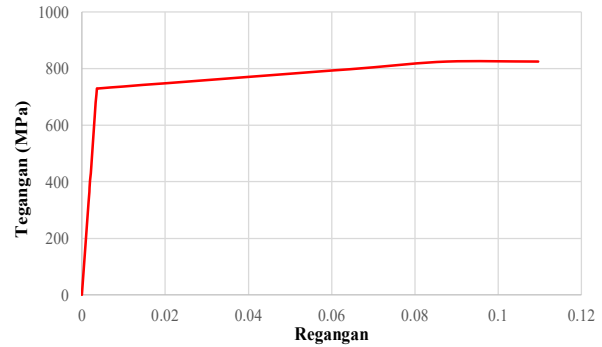
$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_c} \quad (8)$$

menggunakan rumus empiris penelitian [17] yang dijabarkan pada Persamaan 2 hingga 8. Variabel kerusakan beton digunakan untuk menentukan degradasi kekakuan beton akibat aksial tekan dan tarik yang didefinisikan pada Persamaan 9 hingga Persamaan 10.

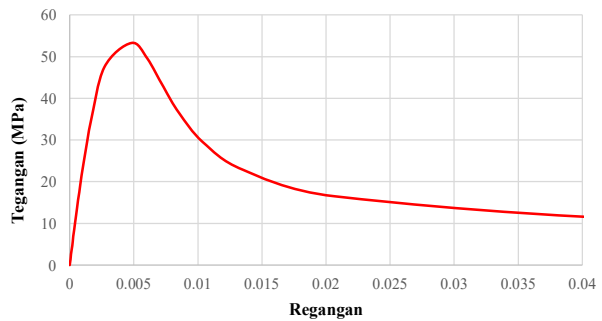
$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c + n_c \sigma_{c0}}{E_c \left(\frac{n_c \sigma_{c0}}{E_c} + \epsilon_c\right)} \quad (9)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t + n_t \sigma_{t0}}{E_c \left(\frac{n_t \sigma_{t0}}{E_c} + \epsilon_t\right)} \quad (10)$$

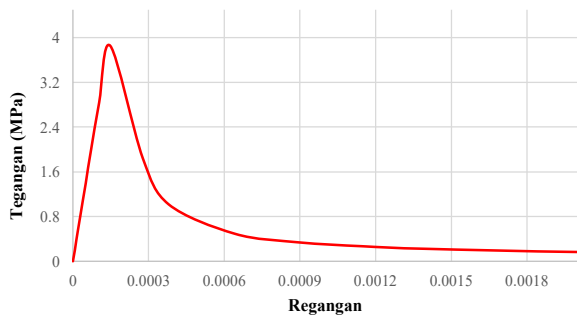
Perilaku elastis CFRP didefinisikan menggunakan *Modulus Young* sebesar 236400 MPa. Sedangkan perilaku plastis didefinisikan dengan kurva tegangan-regangan yang ditunjukkan pada **Gambar 4**. Pemodelan kolom CFST-CFRP terdiri dari *module part solid* beton, *part shell* tabung baja dan *part shell* CFRP. Pada bagian kolom yang berpotensi mengalami sendi plastis ukuran *mesh* lebih halus daripada *mesh* bagian kolom lainnya. *Tools* pada ABAQUS yaitu *partition cell* digunakan untuk membagi bagian kolom CFST yang terlapis CFRP kemudian dilakukan *seed part* dengan ukuran *mesh* 30 mm x 30 mm. Sedangkan bagian kolom lainnya menggunakan ukuran *mesh* 75 mm x 30 mm seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 5**. Step pembebanan yang diaplikasikan yaitu beban horizontal siklik dengan durasi 30 detik berdasarkan skema pembebanan yang ditunjukkan pada **Gambar 6**. Perilaku *bonding* dan *slip* antara permukaan dalam tabung baja dengan permukaan luar beton inti dimodelkan pada *interaction contact* ABAQUS yang mana arah normal menggunakan *hard contact* dan arah tangensial mengadopsi koefisien friksi sebesar 0,25 untuk mencegah permukaan yang saling bersentuhan mengelupas dan *sliding* satu sama lain. Sedangkan untuk mengikat nodal-nodal serta permukaan pada kolom CFST-CFRP dengan Untuk memastikan analisis elemen hingga tidak mengalami



Gambar 1. Grafik Hubungan Tegangan-Regangan Baja Q550



Gambar 2. Kurva Tegangan – Regangan Model Konstitutif Tekan Beton



Gambar 3. Kurva Model Konstitutif Tarik Beton

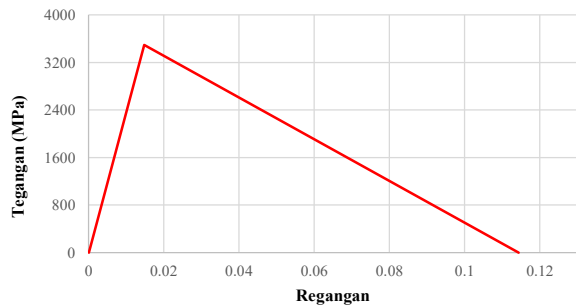
Tabel 1. Data Material Perilaku Beton dalam ABAQUS

Parameter	Nilai
Berat Jenis (ton/mm ³)	2,2 x 10 ⁻⁹
Modulus Elastisitas (MPa)	39000
<i>Poisson Ratio</i>	0,2
Sudut Dilatasi	39
Eksentrisitas	0,1
Fb0/fc0	1,16
K	0,6667
Parameter Viskositas	0,0001

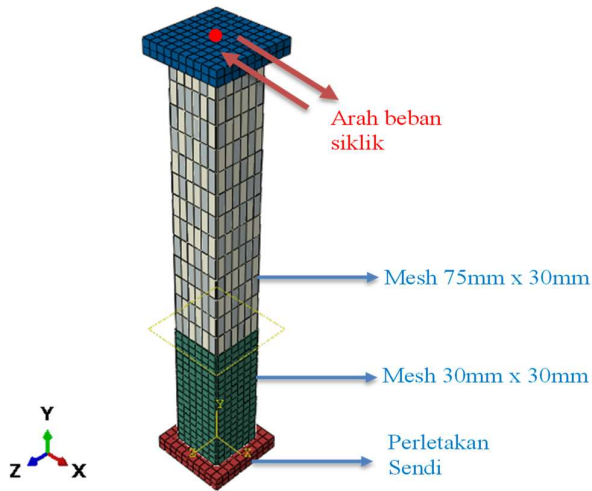
error maka harus dipastikan menggunakan permukaan sebagai *slave surface* dalam setiap *constraint* yang berbeda. *Loading plate* baja dan dengan *base plate* digunakan *tie constraint*.

3. Hasil dan Pembahasan

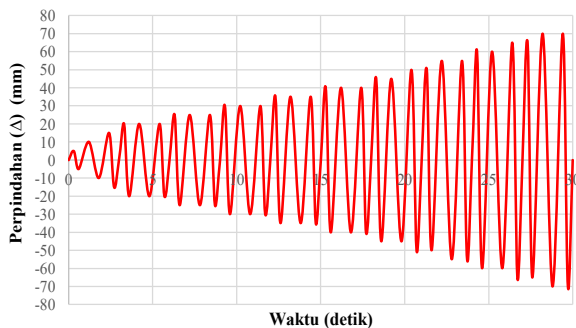
Gambar 7 hingga **Gambar 9** menunjukkan distribusi tegangan kolom CFST *unconfined* dan *confined* menggunakan CFRP akibat pembebanan lateral.



Gambar 4. Grafik Hubungan Tegangan-Regangan CFRP

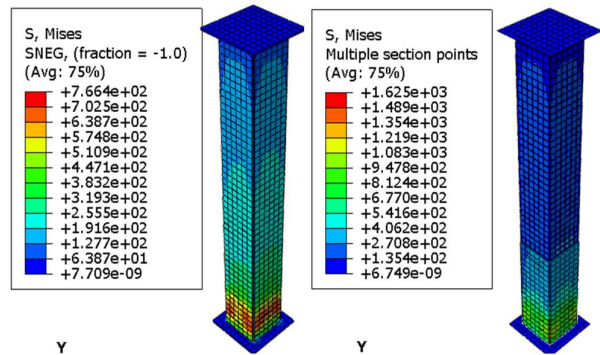


Gambar 5. Ukuran Mesh pada Kolom CFST- CFRP

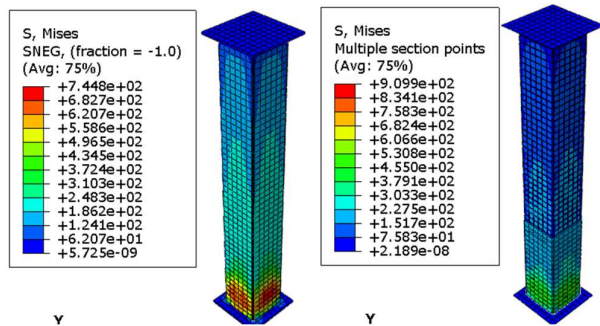


Gambar 6. Grafik Input Beban siklik pada ABAQUS

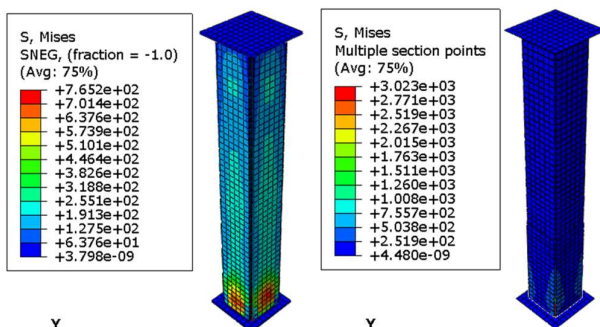
Secara keseluruhan untuk kolom CFST *unconfined*, tegangan paling tinggi terkonsentrasi pada ujung bawah kolom. Tegangan *von mises* dari tabung baja lebih besar dari tegangan leleh bahannya, hal ini mengindikasikan bahwa kolom cenderung mengalami *buckling* pada daerah sendi plastis meskipun tabung baja sudah dipertebal hingga 10 mm. Sedangkan untuk kolom CFST *confined* tegangan paling tinggi yang terjadi tidak lebih besar dari tegangan tarik ultimit CFRP, maka CFRP tersebut mampu menghambat *buckling* dan serat CFRP juga tidak putus (*rupture*) hingga



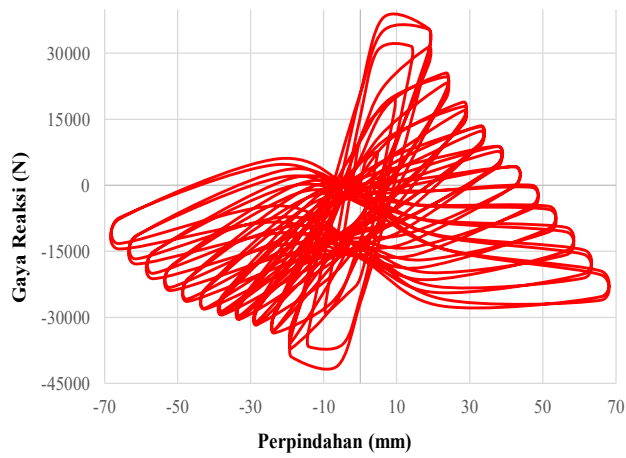
Gambar 7. Kontur Tegangan Kolom CFST-3 dan CFST-3-CFRP



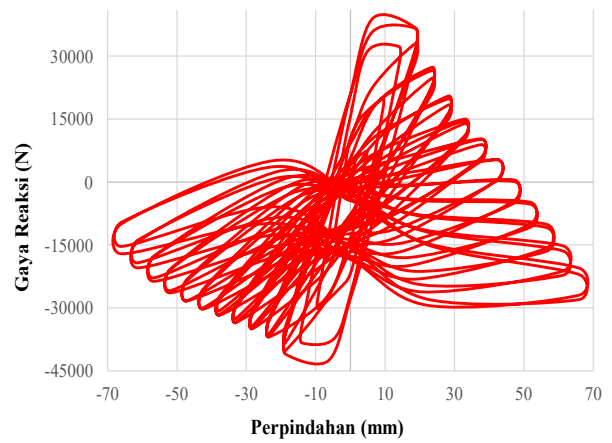
Gambar 8. Kontur Tegangan Kolom CFST-5 dan CFST-5-CFRP



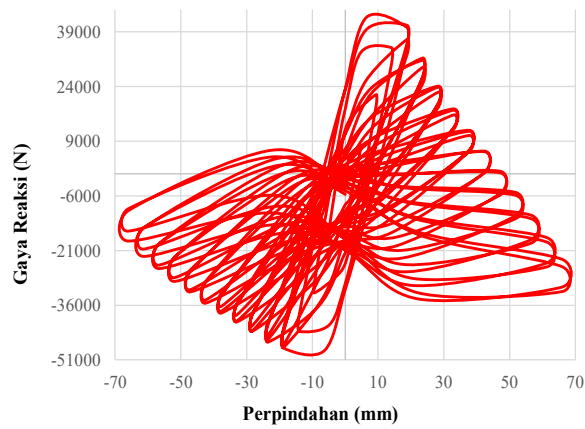
Gambar 9. Kontur Tegangan Kolom CFST-10 dan CFST-10-CFRP



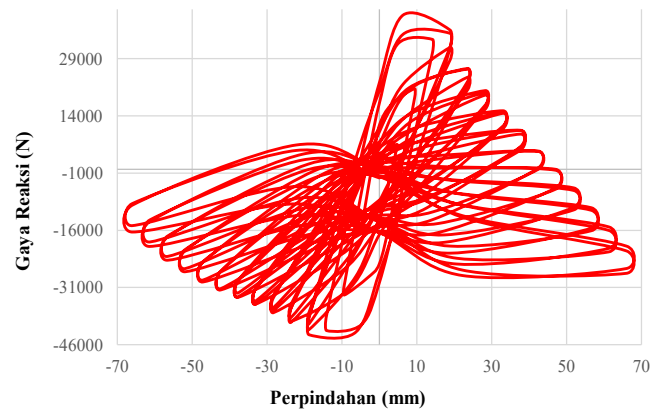
(a) Kolom CFST-3



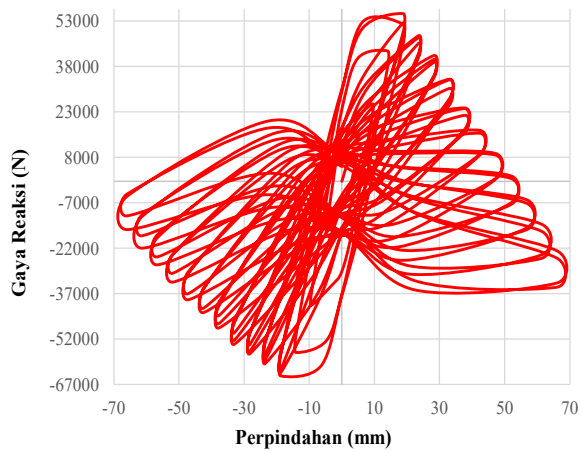
(b) Kolom CFST-3-CFRP



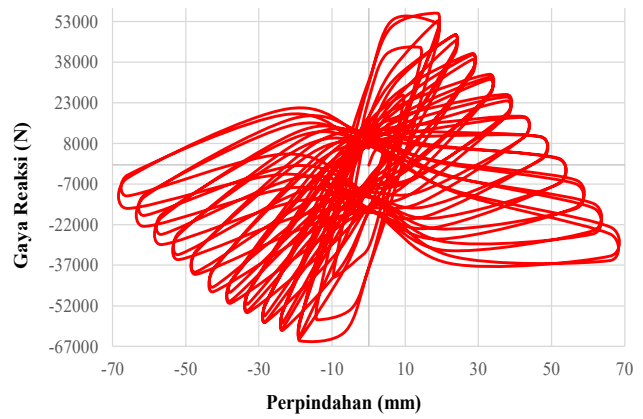
(c) Kolom CFST-5



(d) Kolom CFST-5-CFRP



(e) Kolom CFST-10



(f) Kolom CFST-10-CFRP

Gambar 10. Perbandingan Kurva Histeresis Kolom CFST *Unconfined* dan *Confined* oleh CFR

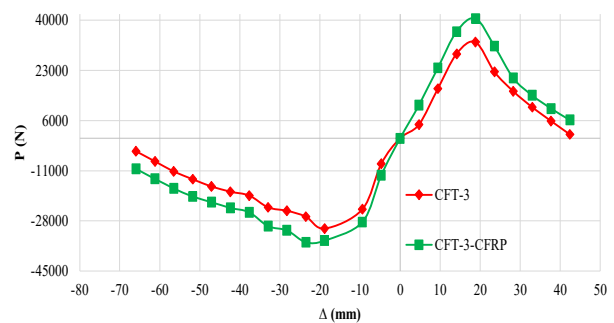
akhir pembebanan. **Gambar 10** menunjukkan perbandingan berbagai kurva histeresis kolom CFST *unconfined* dan *confined* menggunakan CFRP. Secara umum, kolom CFST *confined* memiliki puncak *bearing capacity* yang lebih tinggi daripada kolom CFST *unconfined*. Hal ini bersesuaian dengan analisa distribusi tegangan kolom CFST sebelumnya, dimana CFRP dapat menghambat deformasi *buckling* pada casing baja. Material CFRP sendiri memiliki perilaku getas, namun dari kurva-kurva histeresis tersebut terlihat *bearing capacity* mengalami degradasi secara perlahan setelah mencapai *peak load*. Sehingga dapat disimpulkan material CFRP mampu bekerja secara daktail pada kolom CFST.

Perbandingan kurva skeleton berbagai model kolom CFST ditunjukkan pada **Gambar 11**. Untuk kolom CFST-CFRP dengan tebal baja 3 mm, kapasitas tahanan pada tahap akhir pembebanan dapat mencapai 5309,44 N. Sedangkan untuk kolom CFST tanpa CFRP, kapasitas tahanan hanya mencapai 4.313,44 N sebelum *failure* terjadi. Hal ini juga terjadi pada kolom CFST dengan ketebalan tabung baja lebih dari 3 mm, dimana terdapat perbedaan yang cukup jelas untuk kapasitas tahanan antara kolom CFST *unconfined* dan *confined* ketika fase *failure*. Maka dapat disimpulkan, penambahan lapisan CFRP dapat memperlambat kolom CFST mengalami keruntuhan (*failure*).

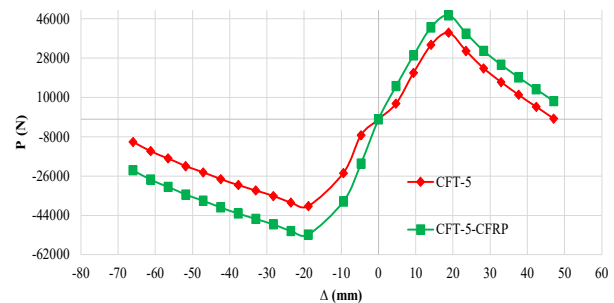
Untuk membandingkan tahapan kerusakan kolom CFST yang diperkuat dan tidak diperkuat CFRP, kontur tegangan untuk kolom CFST yang menggunakan tebal baja 3 mm ditampilkan pada **Gambar 12** dan **Gambar 13**. Untuk kolom yang tidak diperkuat CFRP, ketika tabung baja leleh, ditemukan *buckling* pada daerah sudut kolom yang berlokasi 0-90 mm dari bawah kolom (**Gambar 12(a)**). Ketika mencapai beban puncak, tabung baja *fracture* dan beton mulai terlihat *crushing*. Sedangkan pada tahap pembebanan akhir, tegangan baja meningkat namun belum mencapai tegangan ultimitnya dan *crushing* beton semakin terlihat jelas dengan area kerusakan yang lebih besar. Untuk kolom yang diperkuat CFRP (**Gambar 13**) ketika tabung baja mencapai tegangan lelehnya, CFRP belum menunjukkan tanda-tanda kerusakan serat. Kemudian saat mencapai beban puncak, beton inti mulai *crushing* dan tingkat kerusakannya tidak signifikan seperti kolom CFST yang tidak diperkuat CFRP pada **Gambar 12(c)**. Ketika mencapai kondisi ultimit, area tengah bawah kolom mulai kehilangan efek *confinement* dari CFRP, sehingga retak CFRP semakin melebar dan beton semakin hancur.

Pada dasarnya, kapasitas tahanan kolom tanpa CFRP dapat meningkat secara signifikan seiring bertambahnya ketebalan tabung baja yaitu 12,8%-34,05%. Pada **Tabel 2** didapat bahwa perpindahan leleh (*yield displacement*) dari

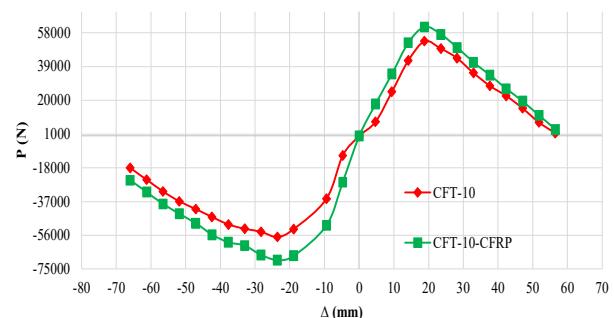
kolom CFST yang tidak dilapisi CFRP (*unconfined*) dan kolom CFST yang dilapisi CFRP (*confined*) saling mendekati. Akan tetapi, kapasitas tahanan (*bearing capacity*) dari kolom CFST dapat meningkat ketika dikekang oleh CFRP. Pada stase elastis, ketika arah pembebanan lateral negatif, kapasitas tahanan kolom *unconfined* dan *confined* dengan tebal tabung baja 3 mm yaitu masing – masing 31040,9 N dan 32486,4 N atau meningkat sebesar 4,66% (**Tabel 2**). Hal ini menunjukkan bahwa penambahan CFRP pada kolom tidak memperlambat pelelehan kolom CFST-3-CFRP, melainkan hanya menambah kemampuan tahanan kolom.



(a) Tebal Tabung Baja 3 mm



(b) Tebal Tabung Baja 5 mm

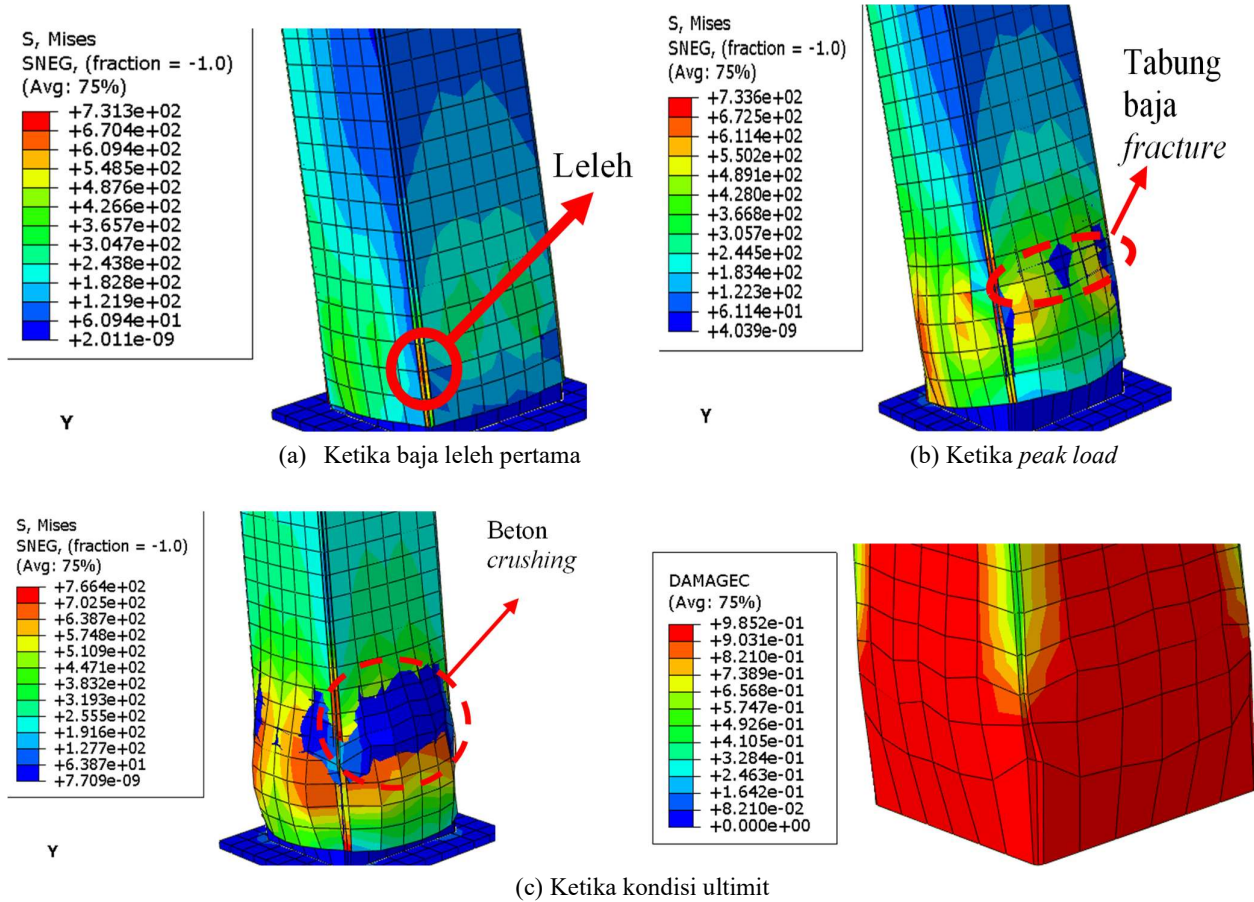


(c) Tebal Tabung Baja 10 mm

Gambar 11. Perbandingan Kurva Hubungan Gaya Reaksi Aksial vs Displacement Kolom CFST *Unconfined* dan *Confined* oleh CFRP

Tabel 2. Titik-Titik Karakteristik dari Kurva Skeleton

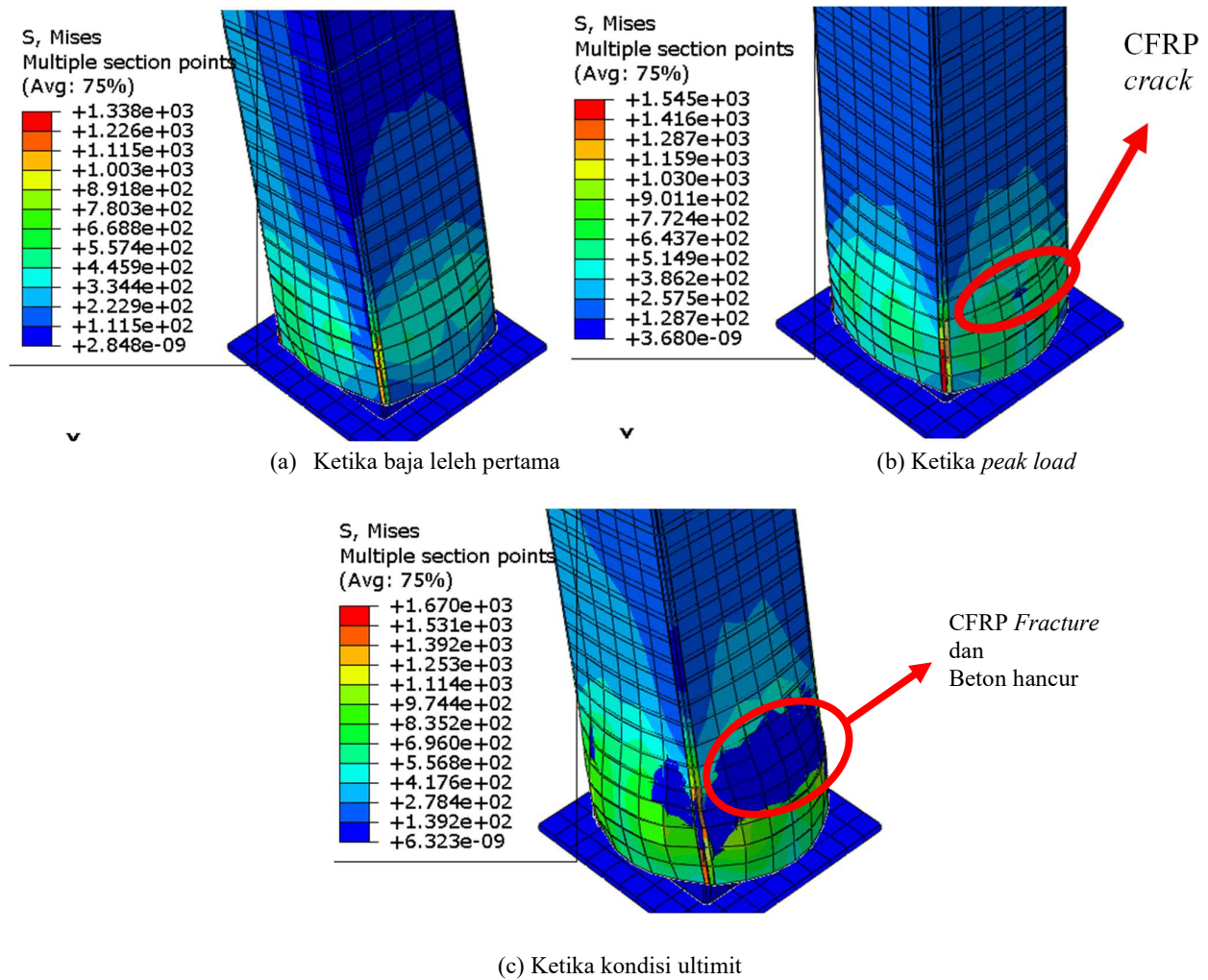
Model	Arah Pembebanan	Titik Leleh		Titik Puncak		Titik Ultimit	
		P_y (N)	Δ_y (mm)	P_m (N)	Δ_m (mm)	P_u (N)	Δ_u (mm)
CFST-3	+	33739,47	16,67	35571,64	18,84	30235,89	21,34
	-	-31040,90	-12,29	-35615,00	-18,84	-30272,80	-33,64
CFST-5	+	37631,95	16,73	40126,40	18,84	34107,44	22,16
	-	-44619,00	-16,89	-47742,80	-18,84	-40581,40	-33,07
CFST-10	+	50364,58	18,07	51800,00	18,84	44030,00	25,78
	-	-58414,40	-20,02	-60156,80	-23,55	-51133,30	-35,12
CFST-3-CFRP	+	34732,34	16,78	36668,96	18,84	31168,62	21,62
	-	-32486,40	-13,02	-36935,10	-23,55	-31394,90	-39,71
CFST-5-CFRP	+	34831,09	15,53	36533,96	18,84	31053,87	21,35
	-	-40304,00	-16,06	-43370,00	-18,84	-36864,50	-12,93
CFST-10-CFRP	+	47909,67	16,52	52301,60	18,84	31053,87	21,35
	-	-59072,70	-19,98	-60929,60	-23,55	-36864,50	-12,93



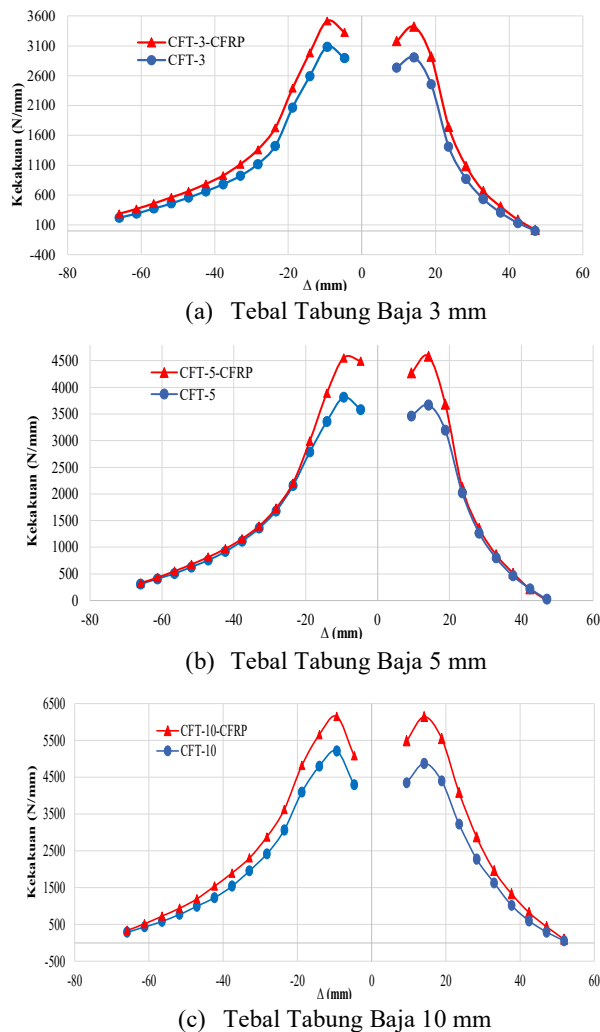
Gambar 12. Mode Kegagalan Kolom CFST

Tabel 3. Titik-Titik Karakteristik dari Kurva Skeleton

Model	Arah Pembebanan	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	μ
CFST-3	+	16,67	21,34	1,280
	-	-12,29	-33,64	2,738
CFST-5	+	16,73	22,16	1,325
	-	-16,89	-33,07	1,957
CFST-10	+	18,07	25,78	1,427
	-	-20,02	-35,12	1,754
CFST-3-CFRP	+	16,78	21,62	1,288
	-	-13,02	-39,71	3,051
CFST-5-CFRP	+	15,53	21,35	1,375
	-	-16,06	-12,93	0,805
CFST-10-CFRP	+	16,52	21,35	1,293
	-	-19,98	-12,93	0,647



Gambar 13. Mode Kegagalan Kolom CFST-CFRP



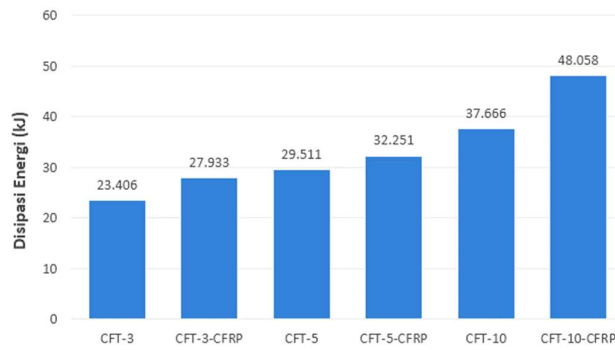
Gambar 14. Perbandingan Deteriorasi Kekakuan Kolom CFST *Unconfined* dan *Confined* oleh CFRP

Namun hal tersebut tidak berlaku khususnya untuk kolom diperkaku menggunakan CFRP dengan ketebalan tabung baja yang digunakan 5-10 mm. Untuk kolom CFST dengan tebal tabung baja lebih dari 3 mm, kapasitas tahanan menurun ketika diperkaku CFRP mencapai 4,87%-9,67%. Hal ini ditunjukkan dengan kapasitas tahanan ketika fase elastis-plastis (**Tabel 2**) untuk kolom CFST dan kolom CFST-CFRP dari 35.571,64 N menjadi 36.668,96 N atau meningkat sebesar 3,71%. Namun jika dibandingkan dengan kolom CFST-3, kolom CFST-5 memiliki kinerja seismik yang buruk. Terutama ketika fase elastis-plastis dan fase *failure*, kapasitas tahanan kolom CFST-CFRP menurun 8,95%-9,16% dari kapasitas tahanan kolom CFST dan *failure* terjadi lebih cepat. Maka dapat disimpulkan bahwa CFRP dapat

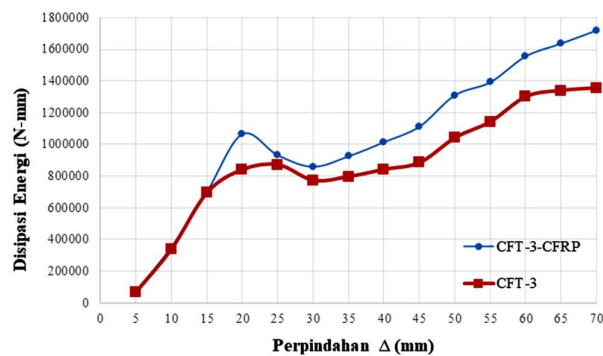
bekerja secara efektif menaikkan kapasitas tahanan kolom jika tebal baja yang digunakan yaitu 3 mm.

Koefisien daktilitas seluruh kolom CFST tersedia dalam **Tabel 3**. Dari tabel tersebut terlihat koefisien daktilitas berkisar 1,28 – 1,427 ketika pembebanan arah positif dan 0,647 – 3,051 ketika pembebanan arah negatif. Koefisien daktilitas rata – rata untuk kolom CFST mutu normal pada umumnya lebih besar dari 3 [17] yang menunjukkan daktilitas kolom CFST mutu tinggi dalam pemodelan ABAQUS ini sangat kecil. Faktor utama yang mempengaruhi daktilitas kolom yaitu tebal selongsong baja, kuat tekan beton dan kuat leleh baja. Penggunaan kolom CFST dengan beton mutu tinggi dan baja mutu tinggi dengan dinding yang tipis dapat melemahkan daktilitas. Namun adanya perkuatan dari CFRP ini kondusif terhadap daktilitas. Koefisien daktilitas untuk kolom CFST tanpa CFRP dibandingkan dengan kolom CFST-CFRP meningkat mencapai 0,63% – 11,43%. Namun untuk kolom CFST yang menggunakan tebal tabung baja 10 mm, koefisien daktilitas menurun sebesar 9,38% ketika arah pembebanan positif dan 63,10% ketika arah pembebanan negatif. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan CFRP tidak meningkatkan daktilitas *displacement* pada kolom CFST yang menggunakan tebal tabung baja 10 mm. Pengekangan CFRP pada kolom CFST lebih signifikan meningkatkan daktilitas spesifik pada kolom CFST yang menggunakan tebal tabung baja sebesar 3 mm. Dari analisis kurva skeleton sebelumnya juga sudah disimpulkan bahwa performa seismik untuk kolom CFST-CFRP dengan tebal tabung baja 3 mm lebih efektif daripada kolom kolom CFST-CFRP dengan ketebalan tabung baja lainnya.

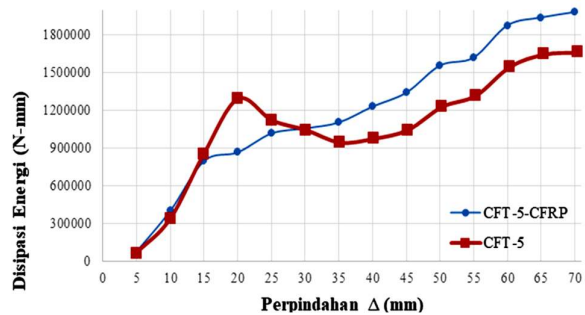
Perbandingan deteriorasi kekakuan berbagai kolom CFST ditunjukkan pada **Gambar 14**. Grafik kekakuan setiap model kolom CFST menunjukkan tren yang serupa, dimana deteriorasi kekakuan semakin signifikan seiring bertambahnya perpindahan (*displacement*). Namun pada 3 siklus pertama, kekakuan masih mengalami kenaikan. Sedangkan pada siklus selanjutnya hingga akhir siklus pembebanan, degradasi kekakuan antara kolom CFST-CFRP dan kolom CFST menunjukkan tren yang sangat mirip terutama untuk kolom CFST dengan tabung baja setebal 10 mm. Sedangkan tren degradasi kekakuan untuk kolom CFST yang menggunakan tabung baja 10 mm, kekakuan kolom ketika fase awal pembebanan jauh lebih tinggi, sehingga deteriorasi kekakuan kolom terlihat seperti turun lebih tajam. Sedangkan pada fase elastis-plastis atau ketika rentang perpindahan lateral antara 10 mm–25 mm, kolom CFST-CFRP yang menggunakan tebal baja 3 mm memiliki kekakuan yang lebih besar berkisar 3,7-18,65% dari kolom.



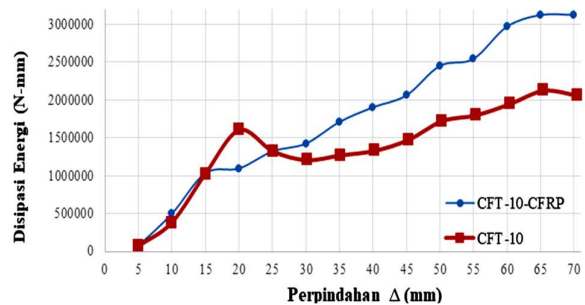
Gambar 15. Perbandingan Disipasi Energi Kolom CFST *Unconfined* dan *Confined* oleh CFRP



(a) Tebal Tabung Baja 3 mm



(b) Tebal Tabung Baja 5 mm



(d) Tebal Tabung Baja 10 mm

Gambar 16. Perbandingan Disipasi Energi Kolom CFST *Unconfined* dan *Confined* oleh CFRP

CFST *unconfined*. Sedangkan kolom CFST dengan tabung baja 10 mm, kekakuan kolom CFST-CFRP lebih besar berkisar 0,66%-7,83% daripada kolom CFST *unconfined*. Namun untuk kolom CFST yang menggunakan tebal baja 5 mm, performa yang dimiliki kolom CFST *unconfined* justru lebih baik daripada kolom CFST-CFRP. Hal ini ditunjukkan ketika fase elastis-plastis, kolom CFST dengan tabung baja 5 mm *unconfined* memiliki kekakuan lebih besar berkisar 2,01-13,62% daripada kolom CFST *confined*. Hal ini sejalan dengan analisa kurva skeleton dimana kinerja seismik kolom CFST-CFRP lebih efektif untuk ketebalan tabung baja 3 mm dibandingkan kolom CFST dengan tebal baja 5-10 mm.

Akumulasi disipasi energi setiap kolom CFST ditunjukkan pada **Gambar 15**. Secara umum, dari grafik bar tersebut dapat disimpulkan pengekanan CFRP secara efektif meningkatkan kapasitas disipasi energi. Untuk kolom CFST yang memiliki tebal baja 3 mm, akumulasi energi bertambah ketika diperkuat CFRP yaitu dari 23,41 kJ menjadi 27,93 kJ atau meningkat sebesar 19,34%. Sedangkan untuk kolom CFST yang memiliki tebal baja 5 mm, akumulasi energi bertambah ketika diperkuat CFRP yaitu dari 29,51 kJ menjadi 32,25 kJ atau meningkat sebesar 9,28%. Peningkatan akumulasi energi juga berlaku untuk kolom CFST dengan tebal baja 10 mm, dimana disipasi energi 37,66 kJ menjadi 48,06 kJ atau meningkat sebesar 27,59%.

Disipasi energi pada setiap tingkat pembebanan dapat dihitung berdasarkan luas dari *loop* kurva histeresis pada setiap siklus pembebanan tersebut. **Gambar 16** menunjukkan kurva hubungan disipasi energi terhadap perpindahan lateral. Secara keseluruhan, energi setiap model kolom CFST-CFRP dan kolom CFST tanpa CFRP bertambah secara linear seiring bertambahnya perpindahan lateral. Oleh karena efek *Bauschinger* dari material baja ketika proses *loading* dan *unloading* tidak sepenuhnya dipertimbangkan dalam ABAQUS. Maka, disipasi energi terlihat naik signifikan hanya ketika kolom CFST memasuki fase pasca leleh (perpindahan lateral 15 mm).

Meskipun efek pengekanan CFRP tidak dapat memperlambat tekuk lokal kolom CFST, kekakuan elastis (*initial stiffness*) dapat meningkat seperti yang ditunjukkan dalam **Tabel 4**, dimana ketika kolom CFST dibebani secara lateral arah positif, untuk kolom dengan tebal tabung baja 10 mm, kekakuan elastis kolom CFST dan kolom CFST-CFRP yaitu 2.787,20 N/mm meningkat menjadi 2.900 N/mm. Sedangkan kekakuan elastis kolom CFST dan kolom CFST-CFRP dengan tebal tabung baja 5 mm menurun 0,33% - 4,97%. Pada stase elastis-plastis, tekuk lokal mulai terbentuk dan CFRP memiliki peran penting dalam menghambat tekuk lokal tersebut.

Tabel 4. Kekakuan pada Stase Elastis (*Initial Stiffness*)

Model	Arah Pembebanan	Kekakuan Elastis (N/mm)
CFST-3	+	2023,49
	-	2526,40
CFST-5	+	2249,60
	-	2641,32
CFST-10	+	2787,20
	-	2917,38
CFST-3-CFRP	+	2069,91
	-	2496,00
CFST-5-CFRP	+	2242,22
	-	2509,98
CFST-10-CFRP	+	2900,92
	-	2955,98

4. Simpulan

Dari hasil dan analisa yang dilakukan dalam penelitian dengan pemodelan ABAQUS ini, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Kolom CFST yang tidak diperkaku CFRP (*unconfined*) dengan tebal tabung baja 3 mm memiliki *yield displacement* 16,67 mm. Sedangkan selisih *yield displacement* ketika tabung baja dipertebal menjadi 5 mm, hanya sebesar 0,06 mm. Maka, dengan mempertebal tabung baja tidak memperlambat pelelehan atau potensi *buckling* pada kolom CFST.
2. Kolom CFST dengan tebal tabung baja lebih dari 3 mm, kapasitas tahanan menurun ketika diperkaku CFRP mencapai 4,87% - 9,67%.
3. Degradasi kekakuan ketika fase elastis-plastis kolom CFST-CFRP yang menggunakan tebal baja 3 mm memiliki kekakuan yang lebih besar berkisar 3,7-18,65% dari kolom CFST tanpa CFRP. Namun untuk kolom CFST yang menggunakan tebal baja 5 mm, kolom CFST CFST tanpa CFRP memiliki kekakuan lebih besar berkisar 2,01-13,62% daripada kolom CFST-CFRP.
4. Kolom CFST dengan tebal baja 10 mm memiliki peningkatan akumulasi energi terbesar yaitu dari 23,41 kJ menjadi 27,93 kJ atau meningkat sebesar 19,34%.
5. Perkuatan CFRP menaikkan daktilitas kolom CFST-CFRP hanya pada pemodelan dengan tebal baja 3 mm, yaitu 0,63%–11,43%. Namun untuk kolom CFST dengan tebal baja 10 mm, koefisien daktilitas menurun 9,38% ketika arah pembebanan positif dan 63,10% ketika arah pembebanan negatif.

Daftar Pustaka

- [1] M. Ansari, M. Z. Jeddi, W. H. W. Badaruzzaman, M. M. Tahir, S. A. Osman, and E. Hosseinpour, "A numerical investigation on the through rib stiffener beam to concrete-filled steel tube column connections subjected to cyclic loading," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 24, no. 3, pp. 728–735, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.jestch.2020.10.004.
- [2] Y. Ouyang and A. K. H. Kwan, "Finite element analysis of square concrete-filled steel tube (CFST) columns under axial compressive load," *Engineering Structures*, vol. 156, pp. 443–459, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.11.055.
- [3] J. F. Hajjar, "Concrete-filled steel tube columns under earthquake loads," *Progress in Structural Engineering and Materials*, vol. 2, no. 1, Jan. 2000, doi:10.1002/(SICI)1528-2716(200001/03)2:1<72::AID-PSE9>3.0.CO;2-E.
- [4] Z. Zhou, D. Gan, and X. Zhou, "Cyclic-shear behavior of square thin-walled concrete-filled steel tubular columns with diagonal ribs," *Engineering Structures*, vol. 259, p. 114177, May 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.114177.
- [5] Z. Chen, S. Dong, and Y. Du, "Experimental study and numerical analysis on seismic performance of FRP confined high-strength rectangular concrete-filled steel tube columns," *Thin-Walled Structures*, vol. 162, May 2021, doi: 10.1016/j.tws.2021.107560.
- [6] Y. Xiao, Wenhui He, and K.-K. Choi, "Confined Concrete-Filled Tubular Columns," *Journal of Structural Engineering*, pp. 488–497, 2005, doi: 10.1061/ASCE0733-94452005131:3488.
- [7] K. Sakino, H. Nakahara, S. Morino, and I. Nishiyama, "Behavior of Centrally Loaded Concrete-Filled Steel-Tube Short Columns," *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, no. 2, Feb. 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:2(180).
- [8] X. Y. Mao and Y. Xiao, "Seismic behavior of confined square CFST columns," *Engineering Structures*, vol. 28, no. 10, pp. 1378–1386, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.engstruct.2006.01.015.
- [9] Z. Dong *et al.*, "A review of the research and application progress of new types of concrete-filled FRP tubular members," *Construction and Building Materials*, vol. 312, p. 125353, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125353.
- [10] Y. Wei, C. Zhu, K. Miao, K. Zheng, and Y. Tang, "Compressive performance of concrete-filled steel tube columns with in-built seawater and sea sand

- concrete-filled FRP tubes,” *Construction and Building Materials*, vol. 317, p. 125933, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125933.
- [11] Y. Zhang, Y. Wei, K. Miao, and B. Li, “A novel seawater and sea sand concrete-filled FRP-carbon steel composite tube column: Cyclic axial compression behaviour and modelling,” *Engineering Structures*, vol. 252, p. 113531, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.113531.
- [12] G. Wang, Y. Wei, K. Miao, K. Zheng, and F. Dong, “Axial compressive behavior of seawater sea-sand coral aggregate concrete-filled circular FRP-steel composite tube columns,” *Construction and Building Materials*, vol. 315, p. 125737, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125737.
- [13] Y. Zhang, Y. Wei, K. Zhao, M. Ding, and L. Wang, “Analytical model of concrete-filled FRP-steel composite tube columns under cyclic axial compression,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 139, p. 106414, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.soildyn.2020.106414.
- [14] J.-J. Zeng, S.-D. Liang, Y. Zhuge, J.-K. Zhou, and J. Liao, “Seismic behavior of FRP-concrete-steel double skin tubular columns with a rib-stiffened Q690 steel tube and high-strength concrete,” *Thin-Walled Structures*, vol. 175, p. 109127, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.tws.2022.109127.
- [15] J. K. Zhou, G. Lin, and J. G. Teng, “Compound concrete-filled FRP tubular columns under cyclic axial compression,” *Composite Structures*, vol. 275, p. 114329, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114329.
- [16] M. Zakir and F. A. Sofi, “Experimental and nonlinear FE simulation-based compressive behavior of stiffened FRP-concrete-steel double-skin tubular columns with square outer and circular inner tubes,” *Engineering Structures*, vol. 260, p. 114237, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.114237.
- [17] Han, “Concrete-Filled Steel Tube Structure- Theory and Practice,” *Science Press Beijing*, 2016.