

# KARAKTERISTIK PERILAKU KOLOM *CONCRETE-FILLED TUBES* (CFT) DENGAN BEBAN LATERAL SIKLIK EKSENTRIK MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

I Ketut Sudarsana<sup>1,2</sup> Ida Ayu Made Budiwati<sup>1,2</sup>, Putu Ryan Priyatna<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

<sup>2</sup>Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

Email: ksudarsana@unud.ac.id

**ABSTRAK:** Penggunaan material komposit dalam dunia konstruksi telah mengarah kepada penggunaan *Concrete-Filled Tubes* (CFT). Selain secara eksperimental, dengan meningkatnya perkembangan teknologi dan formulasi elemen hingga memungkinkan dilakukan penelitian secara analitik melalui aplikasi berbasis metode elemen hingga (FEM). ABAQUS dengan fitur *Concrete Damage Plasticity*, dapat digunakan untuk pemodelan keruntuhan beton yang mampu memprediksi perilaku inelastisnya. Dengan aplikasi ini, interaksi antar elemen dimodelkan dengan *surface to surface contact* dengan *friction coefficient* beton dan baja sebesar 0,2, sedangkan baja dan baja sebesar 0,1. Beban aksial diaplikasikan secara konstan pada bagian bebas yang diikuti dengan beban lateral siklik yang mengacu pada SNI 7834-2012. Studi pengaruh ketebalan baja dan eksentrisitas gaya lateral dilakukan dengan menggunakan *true stress* dan *true strain* sebagai *input* aplikasi. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan baja hingga 50% dapat meningkatkan kapasitas beban, kapasitas *drift*, dan daktilitas. Peningkatan ketebalan baja juga dapat memperkecil panjang sendi plastis dan distribusi tegangan maksimum pada kolom CFT. Sedangkan, hasil uji eksentrisitas gaya lateral hingga 400 mm menghasilkan kecenderungan terbalik dengan peningkatan ketebalan baja, tetapi distribusi tegangan maksimum juga terjadi pada kolom CFT. Dari hasil validasi analisis FEM memberikan prediksi yang baik dengan keakuratan diatas 95% dan pola keruntuhan yang menyerupai hasil uji eksperimental.

**Kata kunci:** *Concrete-Filled Tubes*, *Concrete Damage Plasticity*, eksentrisitas, torsi, beban siklik, sendi plastis.

## CHARACTERISTICS OF *CONCRETE-FILLED TUBES* (CFT) COLUMN BEHAVIOR WITH ECCENTRIC CYCLIC LATERAL LOADS USING THE FINITE ELEMENT METHOD

**ABSTRACT:** The composite materials in the construction field have led to *Concrete-Filled Tubes* (CFT). Apart from being an experimental study, with the development of technology and finite element formulations, it is possible to do analytical research using finite element methods (FEM) based software. The *Concrete Damage Plasticity* feature in ABAQUS, can be used for concrete failure modeling, which can predict its inelastic behavior. With this application, the interaction between elements modeled by *surface-to-surface contact* with a *friction coefficient* of 0.2 for concrete and steel, while steel and steel are 0.1. Axial loads are applied constantly to any part of the steel followed by cyclic lateral loads referring to SNI 7834-2012. The effect of steel thickness and lateral force eccentricity was studied using actual stress and strain as software application inputs. The results show that increasing steel thickness up to 50% can increase the load capacity, drift capacity, and ductility. Increasing the thickness of the steel can also reduce the length of the plastic hinge and the maximum stress distribution in the CFT column. While the eccentricity test results for lateral forces up to 400 mm produce a reverse trend with the increase in steel thickness, the maximum stress distribution also occurs in the CFT column. The FEM analysis's validation results provide good predictions with an accuracy above 95% and a collapse pattern that resembles the results of experimental tests.

**Keywords:** *yield point spectra method*, *capacity spectrum method*, FEMA 360, FEMA 440

## PENDAHULUAN

Penggunaan material komposit dalam dunia konstruksi berkembang sangat pesat pada beberapa tahun terakhir. Salah satunya adalah penggunaan *Concrete-Filled Tubes* (CFT). CFT memberikan banyak manfaat seperti meningkatkan kapasitas beban kolom tanpa memberikan efek penambahan dimensi (Ghasemian and Schmidt, 1999). Kolom CFT memposisikan baja sebagai tulangan yang terdistribusi dengan baik untuk menahan momen lentur dan bekisting permanen yang dapat melindungi permukaan beton dari dampak lingkungan yang dapat merusak seperti karbonasi, serta waktu pengerjaannya yang efisien (Kilpatrick and Rangan, 1999a).

Kilpatrick dan Rangan, (1999b) melakukan eksperimen terhadap perilaku kolom CFT lingkaran dengan beban lateral. Hasilnya menunjukkan bahwa kekuatan kolom dalam menahan tekuk menurun jika rasio kelangsingan kolom ( $L/D_o$ ) meningkat. Kilpatrick dan Rangan, (1999a) juga meneliti pengaruh ikatan antara beton dengan baja pada kolom CFT yang menunjukkan bahwa beton yang terkekang penuh dapat meningkatkan daktilitas dan kapasitas beban pada kolom. Wang et al. (2019) melaporkan bahwa penambahan *shear stud* sebagai pengikat pada baja dan beton dapat meningkatkan tekuk lokal pada kolom CFT dengan beban aksial yang kecil.

Dalam perencanaan struktur, ketahanan terhadap gaya yang terjadi harus direncanakan secara mendetail terutama pada ketahanan terhadap gaya lentur, geser, maupun torsi. Kilpatrick dan Rangan, (1999b) dalam penelitiannya tentang pengaruh eksentrisitas beban menyatakan bahwa semakin besar eksentrisitas gaya maka kekuatan kolom akan semakin berkurang. Adanya kombinasi gaya torsi, lentur, dan geser meningkatkan kemungkinan kegagalan bangunan yang didominasi oleh gaya geser (Huang et al., 2019). Ketahanan lentur dan torsi pada kolom CFT dapat ditingkatkan apabila mutu material dan rasio baja juga ditingkatkan (Xing et al., 2020; Silva et al., 2016). Hasil penelitian Wang et al. (2018) menunjukkan bahwa ketahanan lentur dan torsi pada kolom CFT meningkat akibat adanya kombinasi beban aksial yang bekerja.

Disisi lain, dengan meningkatnya perkembangan teknologi formulasi elemen hingga, penelitian secara analitik melalui aplikasi memungkinkan dilakukan kajian tentang CFT. Penelitian eksperimen dengan beban biaya yang besar dan tingkat keakuratan pengukuran data yang masih kurang dapat digantikan dengan membuat sebuah model serupa yang akan diselesaikan dengan menggunakan aplikasi yang ada. Goto et al (2011) memodelkan perilaku non linier tabung baja dan beton pengisi menggunakan *software* ABAQUS. Dari analisisnya didapatkan hasil yang sangat baik dalam mengevaluasi kinerja histerisis dua arah yang terjadi.

Berdasarkan evaluasi dari beberapa penelitian tersebut, kajian karakteristik perilaku CFT dengan beban lateral siklik eksentrik telah dilakukan dengan menggunakan ABAQUS, terutama dengan memanfaatkan fitur *Concrete Damage Plasticity* (CDP), dengan fokus kajian terhadap pengaruh ketebalan baja dan eksentrisitas gaya lateral. Pada penelitian ini, SNI 7834-2012, yang merupakan standar pengujian untuk struktur yang didesain pada wilayah rawan gempa, telah digunakan dalam aplikasi. Validasi hasil pengujian didasarkan atas bukti eksperimental dan analisis kriteria penerimaan.

## TEORI DAN METODE

### 2.1 *Concrete-Filled Tube* (CFT)

Prosedur menghitung kekuatan aksial dari kolom CFT berdasarkan persimpangan *envelopes* kekuatan dan garis pembebanan non linier telah dilakukan oleh Bradford (1996). Titik potong diperoleh secara grafis atau dengan persamaan polinomial. Beberapa asumsi yang telah dibuat adalah baja merupakan material elastis-plastis sempurna dengan tegangan leleh  $f_y$  dalam MPa dan *Modulus Young* 200.000 MPa, beton memiliki regangan tarik sebesar 0.003 dari tegangan ultimit  $0,85f'_c$ , kondisi kegagalan seimbang didefinisikan ketika regangan beton pada permukaan bagian dalam sayap atas adalah 0,003 dan regangan tarik pada sayap bawah dari bagian baja mencapai regangan leleh. Sebuah model konstitutif untuk beton tidak terkekang disarankan oleh Popovics et al. (1973) dan dimodifikasi oleh Thorenfeldt et al. (1987)

digunakan untuk menggambarkan perilaku tekan beton. Pengekangan beton oleh baja diselidiki oleh Sakino & Sun (2000) untuk memprediksi kekuatan akibat adanya pengekangan oleh baja. Kekuatan beton terkekang ( $f_c'$ ) dapat dihitung berdasarkan persamaan (1)

$$\frac{f_{cc}'}{f_c'} = 1 + 11.5 \frac{\rho_t f_{yt}}{f_c'} \left( \frac{t}{B - 2t} \right) \quad (1)$$

dengan pada persamaan (2):

$$\rho_t = \left( \frac{B}{B - 2t} \right)^2 - 1 \quad (2)$$

dengan  $f_c'$ : kekuatan maksimum beton terkekang (MPa),  $f_c'$ : kekuatan tekan beton tidak terkekang (MPa),  $f_y$ : tegangan leleh baja (MPa),  $t$ : dimensi terluar tabung baja (mm),  $B$ : ketebalan tabung baja (mm).

Perilaku gesekan pada baja dan beton dinyatakan dalam model gesekan Coulomb yang dapat menerima tegangan geser ( $\tau$ ) hingga batas tegangan geser kritis ( $\tau_{cr}$ ) sebelum terjadinya slip. Tegangan geser kritis ( $\tau_{cr}$ ) dinyatakan pada persamaan (3).

$$\tau_{cr} = \mu p \quad (3)$$

dengan  $\mu$ : koefisien gesekan (*friction coefficient*),  $p$ : tekanan pada kontak.

Berdasarkan pengujian yang dilakukan oleh Roeder & Lehman (1999), kolom CFT dengan beton yang mempunyai sifat penyusutan normal, nilai rata-rata maksimum *bond strength* ( $\tau_{cr}$ ) dapat ditentukan dengan persamaan (4).

$$f_{2cr} = 2.109 - 0.026(d/t) \quad (4)$$

Berdasarkan SNI 1729-2020, batas kelangsingan komponen struktur adalah  $l/t \leq 300$ . Dimana  $l$  merupakan tinggi kolom dan  $t$  merupakan lebar kolom. Untuk struktur yang memikul beban aksial dan lentur, rasio  $b/t$  dapat diperoleh dengan persamaan (5).

$$b/t \leq 2,26 \sqrt{E/f_y} \quad (5)$$

Daktilitas suatu struktur dapat dinyatakan dalam *ductility ratio* ( $\mu$ ) yang diperoleh seperti pada persamaan (6).

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (6)$$

dengan  $\Delta u$ : perpindahan pada saat ultimit,  $\Delta y$ : perpindahan pada saat leleh.

Model histerisis dalam ABAQUS berguna dalam memodelkan regangan besar

dimana respon hasil yang didapat bergantung pada kecepatan laju di bawah pembebanan siklik. Aspek utama dari perilaku tersebut adalah histerisis yang ditunjukkan dalam kurva tegangan-regangan di bawah pembebanan siklik. Untuk mengetahui respon struktur dalam menerima beban berulang, digunakan analisis siklik secara langsung.

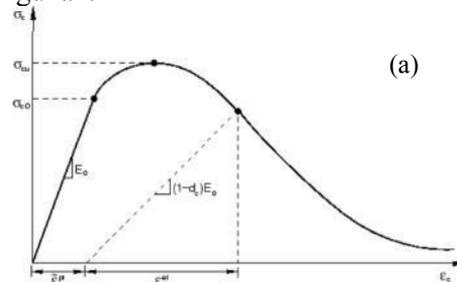
Metode elemen hingga merupakan metode numerik dengan memodelkan dan membagi benda menjadi sistem yang setara dengan benda yang lebih kecil yang dihubungkan dengan titik simpul (*node*) dan garis batas disebut diskritisasi. Dalam menyederhanakan perumusan persamaan kekakuan elemen, metode matrik dapat digunakan karena notasi matriks merupakan notasi sederhana dan mudah digunakan untuk menulis dan memecahkan setiap persamaan aljabar simultan. *Software* ABAQUS merupakan program yang dapat digunakan untuk analisis mikro *modeling* dengan membuat asumsi sederhana.

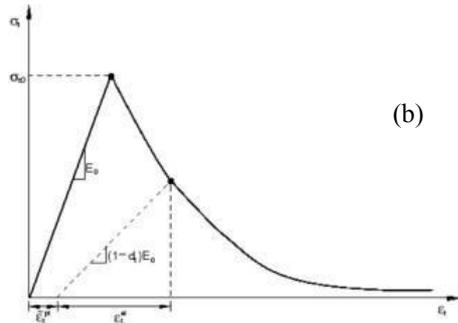
Pada analisis ABAQUS, memodelkan awal keretakan (*microcrack*) dan alur keretakan adalah hal penting yang harus dilakukan. Dengan demikian keruntuhan tekan ( $\sigma_c$ ) dan tarik ( $\sigma_t$ ) dapat diperoleh dari persamaan (7) dan (8). Grafik respon beton terhadap gaya uniaksial tekan dan tarik dapat dilihat pada Gambar 1.

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_o (\epsilon_c - \epsilon_c^{pl}) \quad (7)$$

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_o (\epsilon_t - \epsilon_t^{pl}) \quad (8)$$

dengan  $D_y$  adalah perpindahan luluh,  $D_y/h$  adalah *yield drift ratio*,  $h$  adalah tinggi total bangunan.



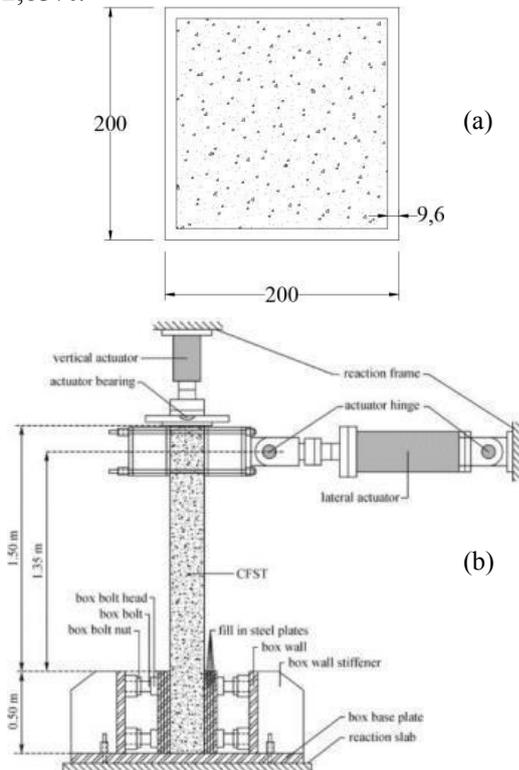


Gambar 1. Respon beton terhadap gaya uniaxial: (a) tekan, dan (b) tarik.

**2.2 Metode**

**Setup Model**

Geometri dan *setup* pengujian yang digunakan untuk validasi adalah model eksperimental oleh Silva et al. (2016) yaitu benda uji SR-StdC-200-10-10%-C (Gambar 2). Kapasitas maksimum dan minimum yang mampu dicapai oleh benda uji eksperimen adalah sebesar  $P_{max}=195,59$  kN dan  $P_{min}=-203,25$  kN dengan *drift* maksimum dan minimum sebesar  $\theta_{max}=2,90$  % dan  $\theta_{min}=-2,83$ %.



Gambar 2. Benda uji SR-StdC-200-10-10%-C: (a) geometri, dan (b) *setup* pengujian.

**Karakteristik Material**

Pemodelan dan *input* data material baja (Tabel 1) menggunakan nilai tegangan aktual (*true stress*) dan regangan aktual (*true strain*). Data material beton (Tabel 2) menggunakan model Thorenfield et al. (1988) untuk memodelkan perilaku beton dalam kondisi tekan. Tegangan dan regangan tarik pada beton dimodelkan dengan modifikasi model pada penelitian Nie et al. (2013). Parameter plastisitas beton pada pemodelan CDP dikalibrasi menggunakan nilai pendekatan yang dirujuk dan direkomendasi dari beberapa penelitian terkait (Tabel 3) (Wiryadi et al, 2021, Sudarsana et al, 2022).

**Tipe Elemen dan Mesh**

Seluruh elemen dimodelkan dengan *solid eight-node linear brick element* (C3D8R) dengan *reduced integration* dan *hourglass* kontrol untuk menghindari terjadinya *shear locking*. *Fine mesh* digunakan pada semua elemen untuk mencegah terjadinya *convergence problem* pada model. Semua elemen menggunakan *mesh control technique structured mesh* yang tersedia pada ABAQUS.

Tabel 1. Data material baja.

Dimensi (mm)	200 x 200
Berat Jenis, (kg/m <sup>3</sup> )	7850
Poisson Rasio	0,3
Modulus Elastisitas, E (MPa)	200.000
Tegangan Leleh, $f_y$ (MPa)	411
Tegangan Ultimit, $f_u$ (MPa)	519

Tabel 2. Data material beton.

Berat Jenis, (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson Rasio	Kuat Tekan, $f_c$ (MPa)
2400	0,2	53

Tabel 3. Parameter CDP.

Dilation angle ( $\psi$ )	25°–40°
Eccentricity ( )	0,1
Stress ratio ( $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$ )	1,16
Shape factor ( )	0,667
Viscosity Parameter ( )	0,00001

**Interaksi Kontak**

Kontak antara beton dan baja didefinisikan menggunakan *surface to surface contact* dengan tabung baja sebagai *master surface* dan beton sebagai *slave surface*. Interaksi didefinisikan pada arah normal dengan *pressure overclosure hard contact* yang memungkinkan ikatan baja dan beton terlepas apabila tegangan ijinnya

terlampaui. Pada arah tangensial didefinisikan dengan *penalty friction formulation* dengan *friction coefficient* baja dengan beton 0,2 dan baja dengan baja 0,1 (Goto et al, 2011). Li et al. (2022) mendefinisikan *bond strength* memiliki efek yang tidak signifikan pada kurva histerisis sehingga dapat diabaikan.

Tabel 4. Data benda uji.

Model	<i>t</i> (mm)	<i>f<sub>y</sub></i> (MPa)	<i>f<sub>c</sub></i> (MPa)	Beban Aksial P (kN)	Eksentrisitas <i>e</i> (mm)
S8-0	8	411	53	1650	0
S9,6-0	9,6	411	53	1650	0
S12-0	12	411	53	1650	0
S12-2	12	411	53	1650	200
S12-4	12	411	53	1650	400

Tabel 5. Rasio beban variasi ukuran *mesh*.

Ukuran <i>Mesh</i> (mm)	Hasil <i>FEM</i>		Rasio Beban ( <i>Exp/FEM</i> )
	Beban (kN)	Drift (%)	
25	-207,85	-2,86	1,01
	198,21	2,88	1,00
30	-170,73	-2,86	1,23
	182,16	2,88	1,09
35	-156,75	-2,86	1,34
	183,46	2,88	1,08
40	-185,71	-2,86	1,13
	185,68	2,88	1,07

**Perletakan dan Pengaplikasian Beban**

Perletakan diasumsikan terjepit pada bagian bawah dan bebas pada bagian atas sehingga bagian bawah tidak diperbolehkan terjadinya translasi dan rotasi. Aplikator beban dimodelkan dengan *steel element* yang didefinisikan sebagai *rigid body* dengan *tie constraint* pada *reference point* yang agar pergerakan aplikator dapat mengikuti deformasi yang terjadi. Beban diaplikasikan pada aplikator melalui *reference point* dengan *coupling constrain* untuk mewakili bagian yang akan dibebani. Pembebanan diaplikasikan secara bertahap dari beban aksial konstan sebesar 1.650 kN dilanjutkan dengan beban lateral siklik yang mengacu pada SNI 7834-2012 dengan opsi pemberian *rate load* pada *quasi-static analysis* yaitu *amplitude step* sebagai *tubular function* pada ABAQUS.

sehingga digunakan variasi ketebalan baja 8 mm, 9,6 mm dan 12 mm. Variasi eksentrisitas beban lateral adalah beban konsentrik (*e* = 0), beban berada pada eksentrisitas 200 mm, dan beban berada pada eksentrisitas 400 mm. Pada S8-0, notasi S (square) sebagai penampang persegi, angka 8 (delapan) sebagai nilai ketebalan tabung baja yang dimodelkan dan angka 0 (nol) mewakili eksentrisitas beban lateral. Data variasi benda uji disajikan pada Tabel 4.

**HASIL DAN PEMBAHASAN  
CDP dan Hasil Validasi Model**

Teknik *mesh* yang baik dapat mempengaruhi perilaku struktur dalam menerima distribusi tegangan. Pada penelitian ini, hasil kalibrasi ukuran *mesh* telah disajikan dalam Tabel 5. Dapat disimpulkan bahwa ukuran *mesh* dengan kapasitas beban yang paling mendekati benda uji hasil eksperimen adalah ukuran *mesh* 25 mm. Hal ini sesuai dengan ukuran *mesh* yang disarankan untuk digunakan

**Variasi Benda Uji**

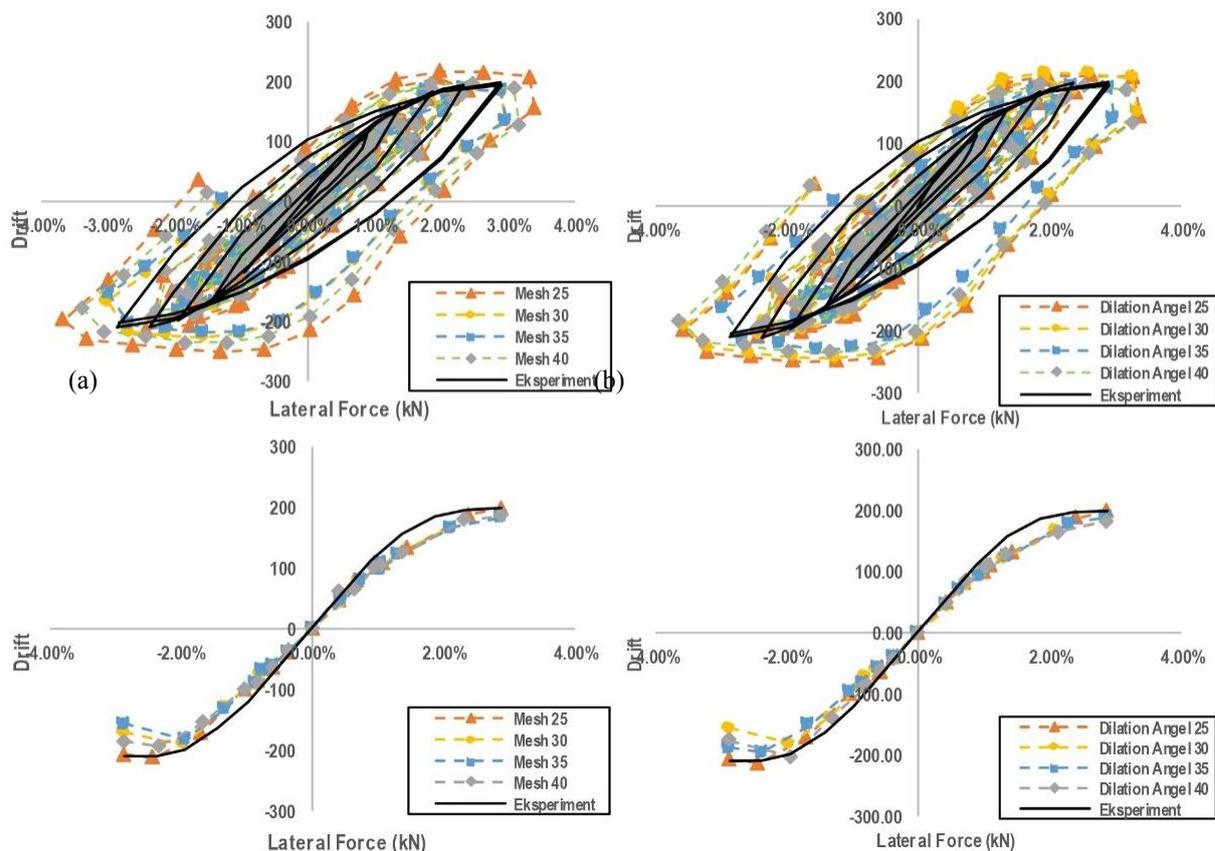
Ketebalan baja divariasikan berdasarkan ketentuan SNI 1729-2020

adalah 25–40 mm yang tidak melebihi ukuran material agregat dominan pada beton (Najafgholipour et al., 2017). Sedangkan, sudut dilasi pada beton yang mengimplementasikan terjadinya perubahan volume pada saat beton dalam keadaan *triaxial stress state* sehingga menyebabkan terjadinya regangan inelastis pada beton, telah pula diuji. Nilai sudut dilasi dengan

kapasitas beban yang paling mendekati benda uji hasil eksperimen adalah nilai ( $\psi$ ) = 25°, seperti disajikan pada hasil kalibrasi sudut dilasi dalam Tabel 6. Nilai sudut dilasi juga sesuai dengan sudut yang direkomendasikan oleh ABAQUS yaitu sebesar 25°–40°.

Tabel 6. Rasio beban variasi sudut dilasi ( $\psi$ ).

Sudut Dilasi ( $\psi$ )	Hasil FEM		Rasio Beban (Exp/FEM)
	Beban (kN)	Drift (%)	
25	-207,85	-2,86	1,01
	198,21	2,88	1,00
30	-157,13	-2,86	1,34
	183,15	2,88	1,09
35	-188,76	-2,86	1,11
	188,58	2,88	1,06
40	-176,22	-2,86	1,19
	182,54	2,88	1,09



Gambar 3. Kurva histerisis dan *backbone*: (a) variasi mesh, dan (b) variasi sudut dilasi.

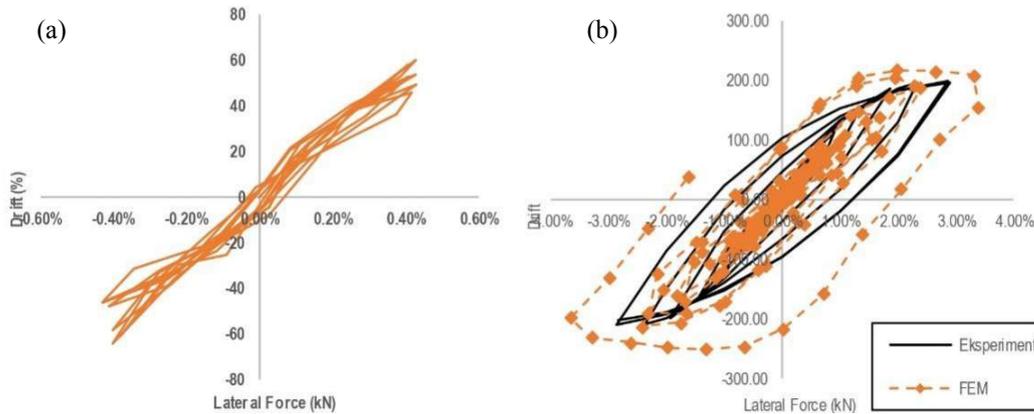
Kurva histerisis dan *backbone* hasil kalibrasi ukuran *mesh* dan sudut dilasi yang disajikan pada Gambar 3 menunjukkan bahwa parameter CDP yang dikalibrasi secara keseluruhan dapat mewakili perilaku benda uji eksperimen sehingga hasil dapat

dikatakan valid, sehingga dapat digunakan untuk analisis selanjutnya.

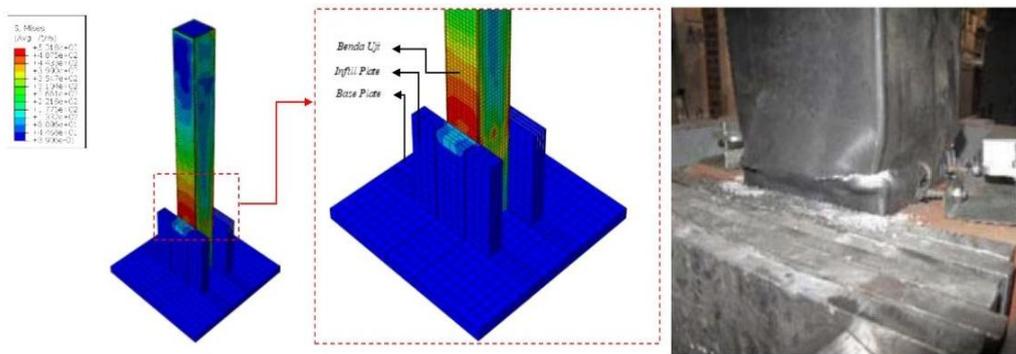
Perilaku benda uji pada awal siklus yang masih pada keadaan elastis kemudian membesar seiring dengan membesarnya beban lateral, seperti ditunjukkan pada

Gambar 4. Rasio beban dan persentase *drift* secara berturut-turut adalah 1,00 (198,21 kN) dan 2,88% (38,84 mm) pada arah beban positif dan 1,01 (-207,85 kN) dan -2,86% (-38,64 mm) pada arah beban negatif. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa baja telah mengalami tegangan leleh namun belum mencapai tegangan ultimit yaitu dengan tegangan yang terjadi sebesar 531,8 N/mm<sup>2</sup>. Adanya efek pengekanan beton oleh tabung baja menyebabkan tegangan beton mencapai nilai 97,0 N/mm<sup>2</sup>.

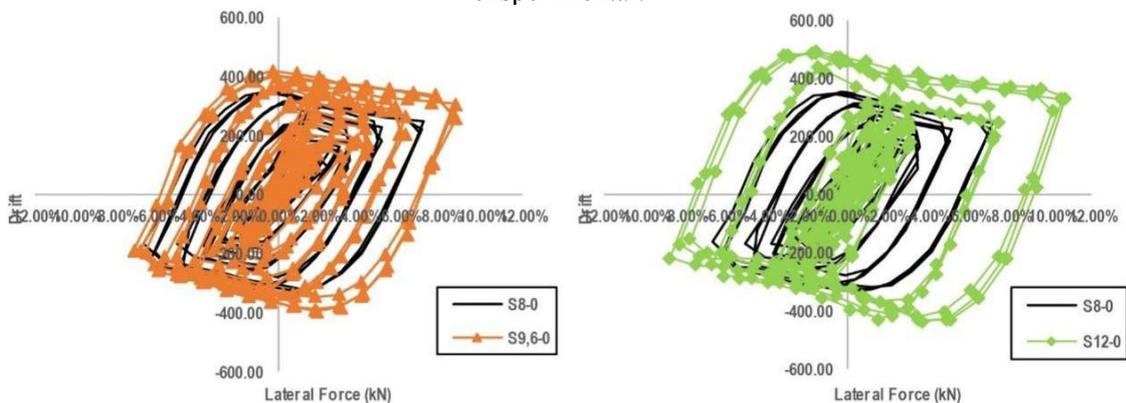
Hasil validasi model yang dicapai telah melebihi 95% dari yang disyaratkan. Dengan demikian, pemodelan dengan fitur CDP dapat memberikan prediksi yang baik terhadap perilaku benda uji. Keruntuhan yang terjadi pada analisis FEM menunjukkan pola dan lokasi yang hampir sama jika dibandingkan dengan hasil uji laboratorium, seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Hal ini mengindikasikan kesesuaian yang baik antara penggunaan aplikasi ABAQUS dan hasil eksperimen yang telah dilakukan.



Gambar 4. Kurva histeresis hasil validasi: (a) kondisi awal siklus, dan (b) akhir pengujian.



Gambar 5. Kontur tegangan pada kolom CFT model validasi FEM dan deformasi benda uji eksperimental.

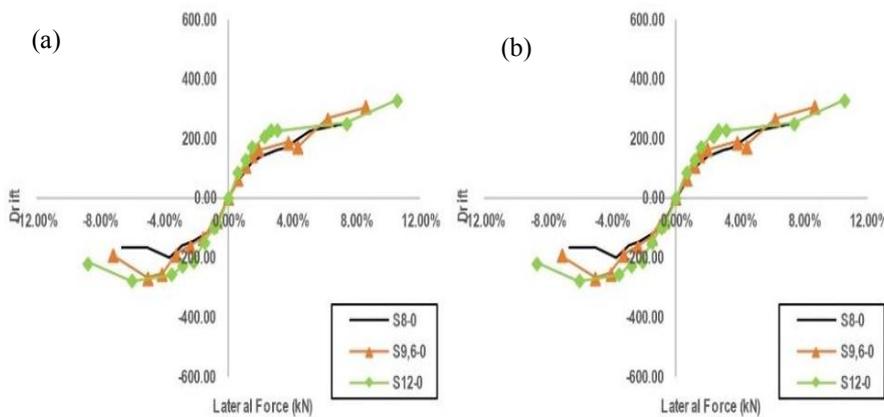


Gambar 6. Kurva histeresis benda uji variasi ketebalan baja

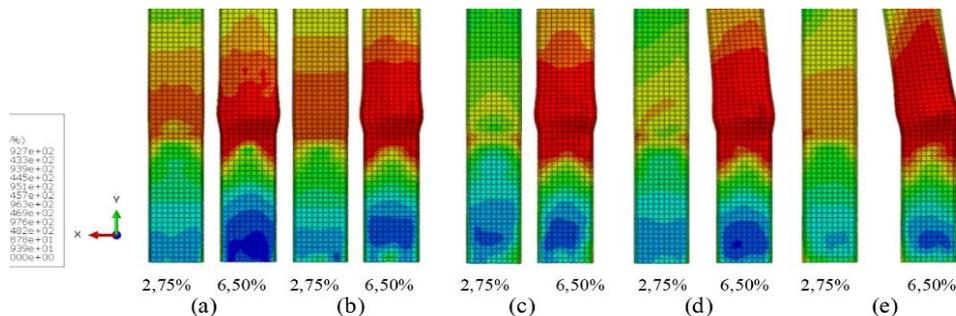
**Pengaruh Ketebalan Baja**

Hasil uji histerisis pada benda uji dengan tebal 9,6 mm dan 12 mm memiliki kurva yang lebih besar dibandingkan dengan benda uji tebal 8 mm, seperti diilustrasikan pada Gambar 6. Sedangkan, hasil uji *backbone*, (Gambar 7(a)), menunjukkan bahwa benda uji dengan ketebalan tabung 12 mm memiliki kapasitas paling besar dalam menerima beban lateral dibandingkan benda uji lain. Peningkatan ketebalan hingga 20% mengakibatkan peningkatan kapasitas hingga 23% pada arah gaya positif dan 11% pada arah gaya negatif. Sedangkan,

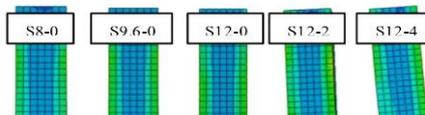
peningkatan ketebalan hingga 50% mengakibatkan peningkatan kapasitas beban hingga 33% pada arah gaya positif dan 16% pada arah gaya negatif. Hasil yang diperoleh ini menunjukkan kecenderungan yang sama dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Silva et al. (2016), dimana kolom CFT dengan rasio lebar dan tebal lebih kecil memiliki kapasitas beban lebih besar (Tabel 6). Tabung baja pada model S8-0 mengalami leleh paling awal dibandingkan dengan benda uji lain. Pada *drift* 2,75% distribusi tegangan pada masing-masing tabung baja dapat dilihat pada Gambar 8.



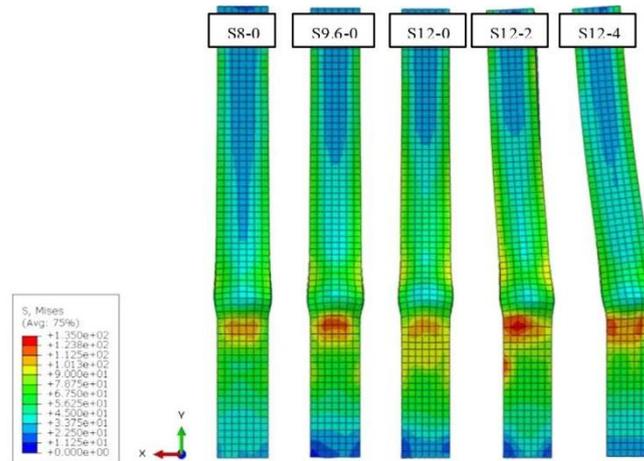
Gambar 7. Kurva *backbone* benda uji: (a) variasi ketebalan, dan (b) variasi eksintrisitas gaya lateral



Gambar 9: Kontur tegangan baja pada drift 2,75% dan ultimit 6,50%



Gambar 8. Kontur tegangan baja pada *drift* 2,75% dan ultimit 6,50%.



Gambar 9. Kontur tegangan beton pada drift ultimit 6,50%.

Efek peningkatan tebal tabung baja 50% memberikan perbedaan kontur yang sangat jelas dan pada akhir pengujian, telah terjadi deformasi pada semua benda uji. Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa semakin tipis tabung baja yang digunakan untuk kolom CFT, maka tegangan leleh kolom akan terjadi semakin cepat.

Saat beban aksial diaplikasikan, model uji mengalami tegangan terbesar pada

bagian bawah kolom. Setelah beban lateral diaplikasikan, beton mengalami tegangan terbesar pada bagian terjepit dan terus meningkat seiring dengan meningkatnya beban lateral hingga akhir pengujian. Distribusi tegangan tersebut dapat dilihat pada Gambar 9. Hasil ini menunjukkan bahwa pengekanan oleh tabung baja menyebabkan tegangan yang mampu diterima oleh beton meningkat.

Tabel 7. Rasio beban variasi eksintrisitas gaya lateral

Benda Uji	Hasil FEM		Rasio Beban
	Beban (kN)	Drift (%)	
S12-0	-279,38	-6,04	1,00
	329,70	10,55	1,00
S12-2	-278,25	-6,35	1,00
	291,82	10,04	0,89
S12-4	-269,26	-5,80	0,96
	253,55	6,72	0,77

Ditinjau dari peningkatan drift yang terjadi, CFT dengan tabung baja tebal 9,6 mm dan 12 mm memiliki nilai daktilitas yang lebih tinggi dari CFT dengan tabung baja 8 mm yang sesuai dengan pernyataan semakin kecil *axial compression ratio* maka daktilitas akan meningkat (Wang et al., 2019). Meningkatnya ketebalan baja hingga 50% meningkatkan daktilitas hingga 41,89% pada arah gaya positif dan 28,16% pada arah gaya negatif. Benda uji S12-0 dengan ketebalan 12 mm memperlihatkan sendi plastis terjadi terakhir serta memiliki panjang yang paling kecil.

**Pengaruh Eksintrisitas Gaya Lateral**

Benda uji dengan beban eksentrik memiliki lingkaran kurva yang lebih kecil dibandingkan dengan benda uji beban

konsentrik, seperti terlihat pada Gambar 7(b). Kurva *backbone* (Gambar 8) menunjukkan bahwa benda uji dengan beban konsentrik memiliki kapasitas paling besar dalam menerima beban lateral. Eksintrisitas gaya hingga 200 mm mengakibatkan penurunan kapasitas hingga 11% pada arah gaya positif dan 0% pada arah gaya negatif. Selanjutnya, eksintrisitas gaya hingga 400 mm mengakibatkan penurunan kapasitas hingga 23% pada arah gaya positif dan 4% pada arah gaya negatif. Hasil yang diperoleh ini sesuai dengan analisis yang telah dilakukan oleh Chen et al. (2018), dimana kolom CFT yang memiliki eksintrisitas yang lebih besar memiliki kapasitas beban lebih kecil.

Hasil uji parameter pada penelitian ini, diperoleh bahwa tabung baja pada model

S12-0 mengalami leleh paling akhir dibandingkan dengan benda uji lain. Distribusi tegangan masing-masing tabung baja pada *drift* 2,75% dapat dilihat pada Gambar 7, dimana efek adanya eksentrisitas gaya menyebabkan kontur tegangan diagonal pada bagian terjepit. Sedangkan distribusi tegangan pada masing-masing tabung baja menunjukkan bahwa telah terjadi deformasi pada semua benda uji pada akhir pengujian (Gambar 8). Hasil ini mengindikasikan bahwa semakin besar eksentrisitas beban lateral, maka tegangan leleh kolom akan terjadi semakin cepat dan distribusi tegangan akan lebih besar yang berfokus pada bagian sudut baja. Pola tegangan yang terjadi menunjukkan semakin besarnya eksentrisitas akan mendorong tegangan ultimit berada pada sudut beton (Gambar 9).

Adanya eksentrisitas gaya sejauh 400 mm menyebabkan torsi pada kolom CFT, yang mengakibatkan terjadinya penurunan daktilitas hanya sampai 97,84% pada arah gaya positif dan 89,32% pada arah gaya negatif. Dari hasil penelitian juga diperoleh bahwa sendi plastis terjadi terakhir serta memiliki panjang yang paling kecil yang dialami oleh benda uji S12-0 dengan beban konsentrik (Tabel 7).

## SIMPULAN

Pemodelan FEM dengan fitur *Concrete Damage Plasticity* (CDP) pada ABAQUS mampu memberikan hasil yang sangat baik dalam memprediksi perilaku keruntuhan benda uji pada kolom CFT dengan pembebanan kombinasi aksial dan siklik bolak-balik. Peningkatan ketebalan baja hingga 50% mengakibatkan peningkatan kapasitas beban terjadi hingga 33% pada arah gaya positif dan 16% pada arah gaya negatif. Peningkatan kapasitas *drift* juga diperoleh hingga 20% pada arah gaya positif dan 48% pada arah gaya negatif. Demikian pula untuk daktilitas meningkat hingga 41,89% pada arah gaya positif dan 28,16% pada arah gaya negatif. Sebaliknya, dengan peningkatan ketebalan baja akan memperkecil panjang sendi plastis. Pada uji ini, distribusi tegangan maksimum terjadi pada kolom CFT. Berbeda dengan hasil penelitian dengan meningkatkan ketebalan baja, pengujian eksentrisitas gaya lateral

hingga 400 mm mengakibatkan penurunan kapasitas beban terjadi hingga 23% pada arah gaya positif dan 4% pada arah gaya negatif. Terjadi pula penurunan kapasitas *drift* hingga 36% pada arah gaya positif dan 3% pada arah gaya negatif. Hal yang sama untuk uji daktilitas yang menurun hingga 2% pada arah gaya positif dan 10% pada arah gaya negatif. Uji eksentrisitas ini juga dapat memperbesar panjang sendi plastis, tetapi hasil uji yang sama diperoleh seperti pada pengujian dengan peningkatan ketebalan baja dimana distribusi tegangan maksimum terjadi pada kolom CFT.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bradford, M. A. (1996) 'Design strength of slender concrete-filled rectangular steel tubes', *ACI Structural Journal*, 93(2), pp. 229–235.
- Chen, S., Wei, P. and Weiming, Y. (2018) 'Experimental study on steel reinforced concrete columns subjected to combined bending – torsion cyclic loading', (August 2017), pp. 1–13.
- Ghasemian, M. and Schmidt, L. C. (1999) 'Curved circular hollow section (CHS) steel struts infilled with higher-strength concrete', *ACI Structural Journal*, 96(2), pp. 275–281.
- Goto, Y., Kumar, G. P. and Seki, K. (2011) 'Finite element analysis for hysteretic behavior of thin-walled CFT columns with large cross sections', *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 14(2011), pp. 2021–2030.
- Huang, H., Hao, R., Zhang, W., Huang, M. (2019) 'Experimental study on seismic performance of square RC columns subjected to combined loadings', *Engineering Structures*. Elsevier, 184(January), pp. 194–204.
- Kilpatrick, A. E. and Rangan, B. V. (1999a) 'Influence of interfacial shear transfer on behavior of concrete-filled steel tubular columns', *ACI Structural Journal*, 96(4), pp. 642–648.
- Kilpatrick, A. E. and Rangan, B. V. (1999b) 'Tests on high-strength concrete-filled steel tubular columns', *ACI Structural Journal*, 96(2), pp. 268–274.
- Li, W., Ma, D. Y., Xu, L., Qian, W. (2022) 'Performance of concrete-encased CFST column-to-beam 3-D joints under seismic

- loading: Analysis', Engineering Structures. Elsevier Ltd, 252(November 2021), p. 113661.
- Najafgholipour, M. A., Dehghan, S. M., Dooshabi, A., Niroomandi, A. (2017) 'Finite element analysis of reinforced concrete beam-column connections with governing joint shear failure mode', Latin American Journal of Solids and Structures, 14(7), pp. 1200–1225.
- Nie, J., Wang, Y. and Fan, J. (2013) 'Thin-Walled Structures Experimental research on concrete filled steel tube columns under combined compression-bending-torsion cyclic load', Thin Walled Structures. Elsevier, 67, pp. 1–14.
- Roeder, C. W. and Lehman, D. E. (1999) 'Composite action in concrete filled steel tubes', Proceedings of 8th Pacific Structural Steel Conference - Steel Structures in Natural Hazards, PSSC 2007, 1(May), pp. 17–29.
- Sudarsana, I. K., Wiryadi, I. G. G., and Susila, I. G. A. (2022). 'Finite element analysis of punching shear-unbalanced moment interactions at edge column-flat plate connections'. Journal of Applied Engineering Science, 20 (1), pp. 91–100. <https://doi.org/10.5937/jaes0-31703>
- Sakino, K. and Sun, Y. (2000) 'Steel Jacketing for Improvement of Column Strength and Ductility.', Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering, 1985, pp. 2525–2540.
- Silva, A., Jiang, Y., Macedo, L., Castro, J. M., Monteiro, R., Silvestre, N. (2016) 'Seismic performance of composite moment-resisting frames achieved with sustainable CFST members', Frontiers of Structural and Civil Engineering, 10(3), pp. 312–332.
- Wang, B., Liang, J. and Lu, Z. (2019) 'Experimental investigation on seismic behavior of square CFT columns with different shear stud layout', Journal of Constructional Steel Research. Elsevier Ltd, 153, pp. 130–138.
- Wang, Y. H., Wang, W. and Chen, J. (2018) 'Seismic behavior of steel tube confined RC columns under compression-bending-torsion combined load', Journal of Constructional Steel Research. Elsevier Ltd, 143, pp. 83–96.
- Wiryadi, I. G. G., Tubuh, I. K. D. K., Wirawan, I. P. A. P. (2021). Pemodelan Tiga Dimensi Beton Silinder yang Diuji Tekan dengan Variasi Tipe Mesh Element dan Efek Reduksi Integrasi. Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, 25(1), pp. 49–56.
- Xing, W., Shena, Q., Wang, J., Sheng, M. (2020) 'Performance and design of oval-ended elliptical CFT columns under combined axial compression-torsion', Journal of Constructional Steel Research. Elsevier Ltd, 172, p. 106148.