

ANALISIS ELEMEN HINGGA NONLINIER KOLOM KONSENTRIS TABUNG BAJA DIISI BETON

Mahmud Kori Effendi

Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Negeri Semarang
Email: pak_kori@yahoo.com

ABSTRACT

Concrete-filled steel tubes (CFST) have the advantages of high ductility, high fire resistance compared to steel structures. CFST columns are able to withstand high axial loads and have begun to be widely used for super-tall buildings in China. Finite element analysis using the MSC Marc/Mentat software was performed instead of experimentation. The concrete elements are using 3D solid elements. The stress-strain curve in the compression region is multilinear after $0,3 f'_c$. Softening occurs after reaching the value of f'_c and returns to the value of $0,3 f'_c$ after $5\varepsilon_0$ strain. For the tensile area, it is modeled as bilinear, that is, after reaching the tensile stress value, the stress remains constant. The Mohr-Coulomb yield criterion is used for concrete with kinematic hardening rules on plasticity. For steel tubes, a bilinear model with strain hardening and Von Mises yield criteria with isotropic hardening rule on plasticity are used. The both ends support and the loading are clamped. Contact analysis was carried out between the steel tube and the concrete. To model the end clamped plates, the rbe2 element is used. The results of the analysis show the load-deflection curve that is almost the same between the experiment and the finite element. The load-strain curve also shows a similar phenomenon. The compressive axial load calculated using AIJ produces a smaller value than the experimental and finite element results. The final deflected column occurs local buckling in the middle of the span.

Keywords: concrete filled steel tube, finite element, axial, column

PENDAHULUAN

Struktur komposit tabung baja diisi beton (*concrete filled steel tube, CFST*) mempunyai banyak kelebihan yaitu daktilitas yang tinggi, mempunyai daya tahan yang tinggi terhadap api dibandingkan dengan struktur baja (Morino, Uchikoshi and Yamaguchi, 2001).

Kolom adalah merupakan suatu elemen struktur yang penting dalam suatu bangunan. Kolom ini menahan beban aksial yang besar yang berasal dari elemen balok, pelat dan elemen lainnya yang ada diatas elemen kolom tersebut. Kolom yang terbuat dari material komposit tabung baja diisi beton sudah mulai banyak digunakan untuk bangunan super tinggi di China (Ding, Wu and Zhao, 2014).

(Hasan, Ekmekyapar and Shehab, 2019) meneliti kolom bulat tabung baja diisi beton yang ditambah dengan tulangan baja di dalam tabung baja. Beban ultimit dari eksperimen dibandingkan dengan peraturan dari Euroce (Eurocode, 2004) dan AISC360-16 (AISC360-16, 2016). Hasil eksperimen digunakan untuk memodifikasi dan menaksir kekuatan dari peraturan tersebut.

Ahmad melakukan eksperimen berupa kolom bulat tabung baja diisi beton dengan *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS) (Ahmad, Kumar and Kumar, 2020). Kekuatan tekan aksial kolom tabung baja dengan beton GGBFS lebih besar daripada kekuatan tekan aksial dengan beton normal. Verifikasi kekuatan tekan aksial dilakukan dengan *Architectural Institute of Japan* (AIJ, 1997)

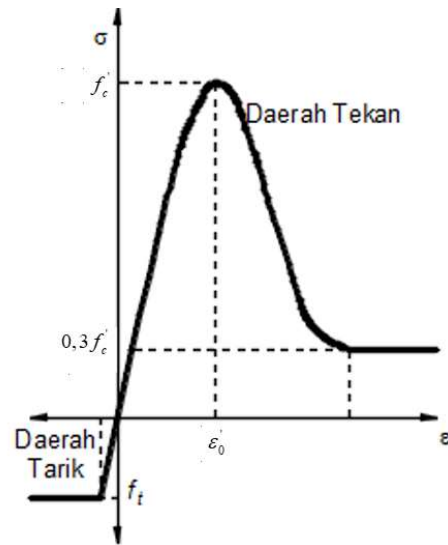
Chincese Code (Chinese Code, 1999), *Eurocode* (Eurocode, 2004), ACI (ACI-318R, 2014).

Pada paper ini, analisis elemen hingga dilakukan sebagai pengganti eksperimen. Hal ini dilakukan karena eksperimen membutuhkan biaya yang tidak sedikit jumlahnya. Analisis menggunakan software MSC Marc/Mentat (MSC, 2012). Model elemen hingga dilakukan untuk validasi dengan hasil eksperimen (Giakoumelis and Lam, 2004). Validasi kekuatan aksial tekan digunakan peraturan (AIJ, 1997). Dari hasil penelitian ini diharapkan sebagai dasar untuk analisis kolom bulat tabung baja diisi beton selanjutnya dengan memperhitungkan berbagai kondisi pembebanan, kekuatan tekan beton, kekuatan tarik tabung baja dll.

MODEL KONSTITUTIF UNTUK MATERIAL BETON

Elemen tipe 7 (MSC, 2010), digunakan untuk elemen beton. Elemen ini berupa elemen solid delapan-nodal, isoparametrik, heksahedral, fungsi interpolasi trilinear. Untuk pemodelan beton daerah tekan, tegangan berupa linier hingga $0,3f_c$ dan multi linier setelah nilai tersebut, seperti terlihat pada Gambar 1 (Chansawat *et al.*, 2009). Setelah mencapai nilai f_c terjadi penurunan tegangan hingga mencapai regangan $5\varepsilon_0$ maka tegangan bernilai tetap.

Data $f_c = 57,6$ MPa untuk beton mutu tinggi (Giakoumelis and Lam, 2004). Regangan beton hancur diambil sebesar 0,003. Nilai rasio Poisson adalah 0,3. Kriteria luluh menggunakan kriteria kegagalan Linear Mohr-Coulomb beserta aturan plastisitas *kinematic hardening* (Lelović, Vasović and Stojić, 2019).

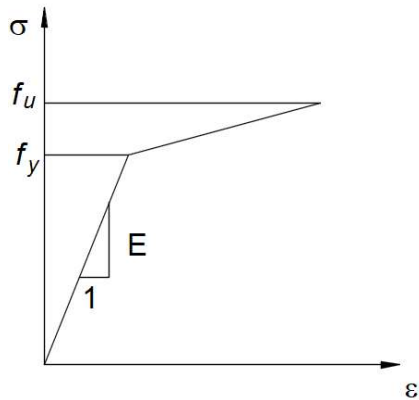


Gambar 1. Kurva regangan-tegangan untuk beton dalam kondisi tekan.

Pada Gambar 1, tegangan beton daerah tarik dimodelkan sebagai bilinear. Setelah mencapai tegangan tarik beton, f_t , maka tegangan beton tetap konstan sebesar f_t , setelah nilai tersebut.

MODEL KONSTITUTIF UNTUK MATERIAL TABUNG BAJA

Elemen tipe 9 (MSC, 2010) digunakan sebagai elemen tabung baja. Elemen tipe 9 ini adalah berupa rangka batang lurus linier sederhana dengan penampang konstan. Hubungan regangan-perpindahan ditulis untuk regangan besar dan analisis perpindahan besar. Material baja tulangan dimodelkan isotropik linier hingga tegangan leleh (f_y) dan bilinear hingga tegangan tarik ultimit (f_u) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Kriteria leleh digunakan Von Mises dengan aturan pengerasan/*hardening rule* isotropik.



Gambar 2. Model tabung baja

ANALISIS ELEMEN HINGGA

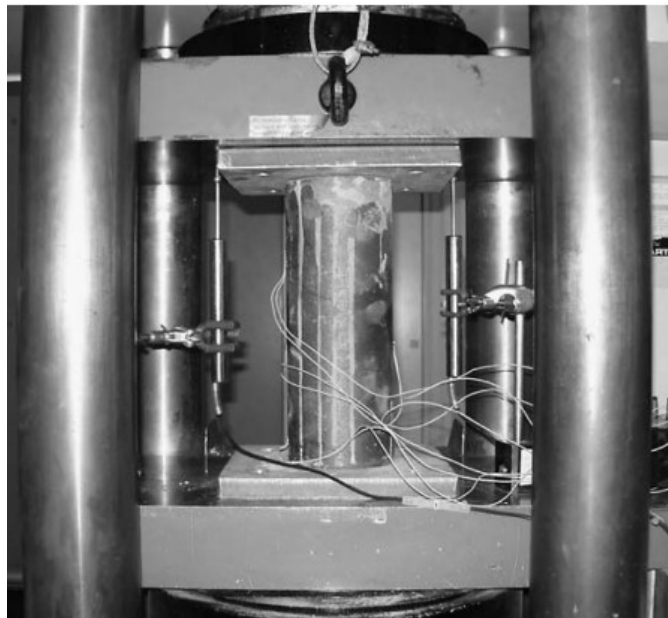
Eksperimen Kolom Tabung Baja Diisi Beton

Kolom tabung baja diisi beton untuk menvalidasi model elemen hingga berupa kolom tabung baja isi beton yang didapatkan dari eksperimen (Giakoumelis and Lam,

2004). Kolom ini terdiri dari tabung baja yang mempunyai diameter, D , 115.02 mm dan tebal, t , sebesar 5.02 mm dengan rasio $D/t=22.9$. Kolom mempunyai panjang sebesar 300.5 mm, sehingga $L/D=2.61$. Untuk sifat mekanik beton dan baja tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat mekanik beton dan baja (Giakoumelis and Lam, 2004).

Bahan	Properti Bahan	
	Beton	E
ν		0.2
f_t		3 MPa
Tabung Baja	E_s	200000 MPa
	ν	0.3
	f_y	365 MPa
	f_u	486 MPa



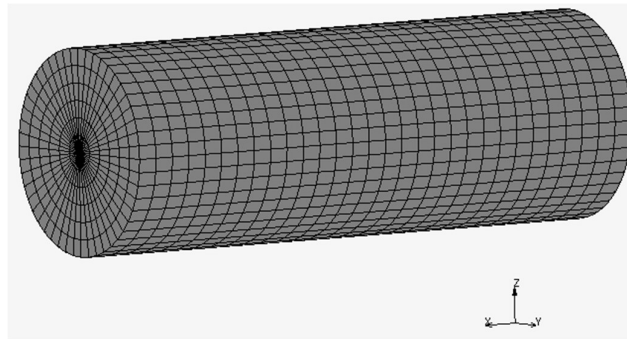
Gambar 3. Pengaturan kolom uji

Pengujian kolom dilakukan dengan menggunakan mesin uji Toni Pack kapasitas 3000 kN. Pengaturan kolom uji dapat dilihat

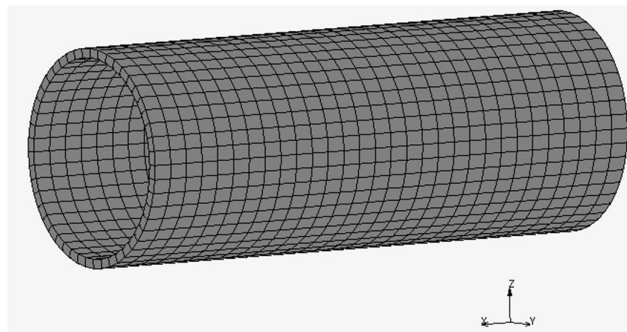
pada Gambar 3. Tabung baja diisi beton di kedua ujung kolom ditutup dengan pelat. Hal ini digunakan sebagai tumpuan ujung

peletakan dan ujung pembebanan. Kondisi ujung ini membuat pembebanan terdistribusi merata dan peletakan menumpu merata pada mesin uji. Untuk mengukur perpindahan aksial maka 2 buah LVD (*linear variable*

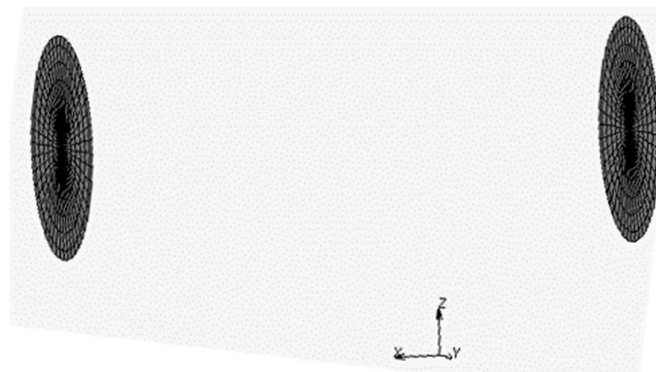
differential transducers) dipasang disamping benda uji. *Strain gauge* dipasang berjarak 50 mm dari kedua ujung benda uji dan di tengah bentang benda uji.



Gambar 4. Model beton skala penuh



Gambar 5. Model baja skala penuh



Gambar 6. Model baja di ujung kolom

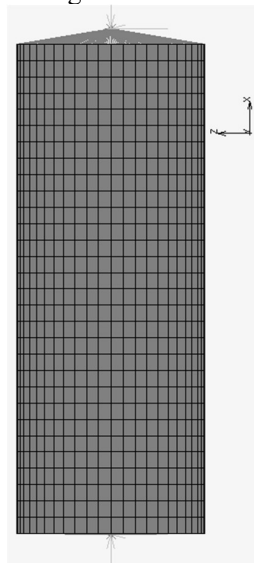
Verifikasi dengan Analisis Elemen Hingga

Program elemen hingga menggunakan software MSC Marc/Mentat (MSC, 2010).

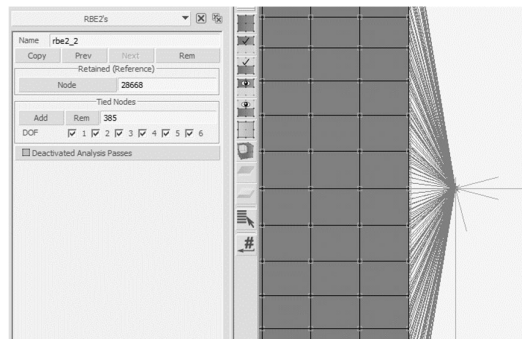
Pemodelan elemen hingga kolom benda uji dilakukan secara 3D dengan skala penuh. *Meshing* beton dapat dilihat pada Gambar 4

dengan terpusat pada titik di tengah lingkaran. *Meshing* tabung baja dapat dilihat pada Gambar 5. Elemen tabung baja dan beton terlihat berupa 3D solid. Interaksi antara beton dan tabung baja dimodelkan dengan analisis kontak berupa *touching* dengan mengatur permukaan elemen tabung baja bersentuhan dengan permukaan elemen beton. Pada Gambar 6, untuk memodelkan kedua ujung pelat baja benda uji, digunakan elemen shell dengan properti material elastik linier. Elemen ini mempunyai tebal 5 mm. Elemen ini dikekang derajat kebebasan perpindahan/*displacement* dan rotasinya. Gambar 7 adalah pemodelan pada beban dan tumpuan dengan

menggunakan elemen batang rigid /*rbe2 element*. Pada Gambar 8, satu nodal (nodal nomer 28668) di pusat lingkaran digunakan sebagai nodal referensi. Nodal ini mengikat nodal sejumlah 385 nodal. Dari nodal referensi ini, nodal nomer 28668, maka beban diberikan. Nodal referensi ini dibuat terkekang terhadap displacement dan rotasi. Perlakuan yang sama seperti diatas juga dilakukan untuk pemodelan tumpuan. Pembebanan dilakukan dengan menggunakan kontrol lendutan.



Gambar 7. Kondisi pembebanan dan kondisi batas



Gambar 8. *Rbe element* pada MSC Marc/Mentat untuk pemberian beban

Beban Ultimit Kolom Bulat Diisi Beton

Kekuatan tekan ultimit teoritis N_{cu1} (Morino and Tsuda, 2003), pada kolom bulat diisi beton dapat dihitung sebagai berikut:

$$\frac{l_k}{D} \leq 4; N_{cu1} = {}_c N_{cu} + (1 + \eta) {}_s N_{cu} \quad (1)$$

$${}_c N_{cu} = {}_c A_c r_u f'_c$$

$${}_s N_{cu} = {}_s A_s \sigma_y$$

$$4 < \frac{l_k}{D} \leq 12; N_{cu2} = N_{cu1} -$$

$$0,125 \{ N_{cu1} - N_{cu3} (l_k/D = 12) \} \left(\frac{l_k}{D} - 4 \right) \quad (2)$$

$$12 < \frac{l_k}{D}; N_{cu3} = {}_c N_{cr} + {}_s N_{cr} \quad (3)$$

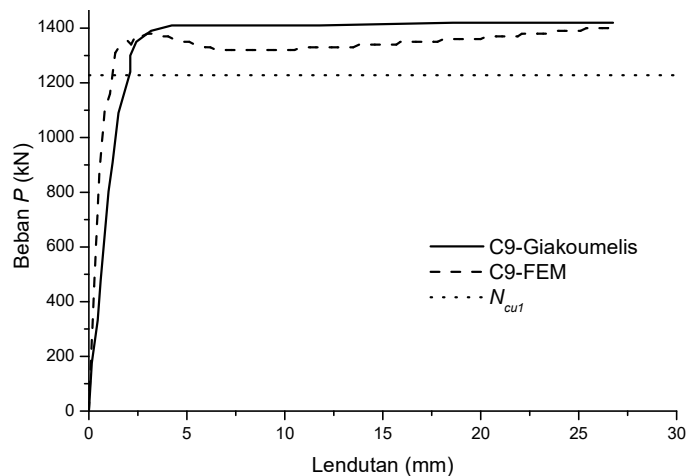
dimana, l_k adalah panjang efektif kolom tabung baja diisi beton, D adalah lebar dan diameter penampang tabung baja, ${}_c A$ adalah luas penampang beton kolom, f'_c adalah tegangan tekan beton, ${}_c r_u = 0,85$ adalah faktor reduksi beton, ${}_s A$ adalah luas penampang tabung baja

kolom, $\eta = 0$ untuk kolom tabung baja diisi beton persegi panjang, $\eta = 0,27$ untuk kolom tabung baja diisi beton bulat, N_{cu1} , N_{cu2} , N_{cu3} adalah kekuatan ultimit kolom tabung baja diisi beton, ${}_c N_{cu}$ adalah kekuatan ultimit kolom beton, ${}_s N_{cu}$ adalah kekuatan ultimit kolom tabung baja, ${}_c N_{cr}$ adalah kekuatan tekuk/*buckling* kolom beton, ${}_s N_{cr}$ adalah kekuatan tekuk/*buckling* kolom tabung baja.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Respon Beban-Lendutan

Gambar 9 menunjukkan perbandingan antara hasil pengujian eksperimen dan hasil yang diperoleh dari analisis elemen hingga, dari aspek hubungan antara beban dan lendutan. Secara umum, kurva beban-lendutan yang diperoleh dari model elemen hingga menunjukkan tren yang sama dengan kurva yang diperoleh secara eksperimental. Dapat disimpulkan bahwa hasil yang diperoleh secara analisis elemen hingga sangat sesuai dengan hasil yang diperoleh secara eksperimental. Benda uji mempunyai $l_k/D = 2,61 \leq 4$, maka dari perhitungan menggunakan persamaan (1) didapatkan nilai kekuatan tekan ultimit, $N_{cu1} = 1228$ kN. Nilai kekuatan tekan ultimit ini lebih kecil daripada nilai kekuatan tekan ultimit hasil eksperimen dan hasil elemen hingga.

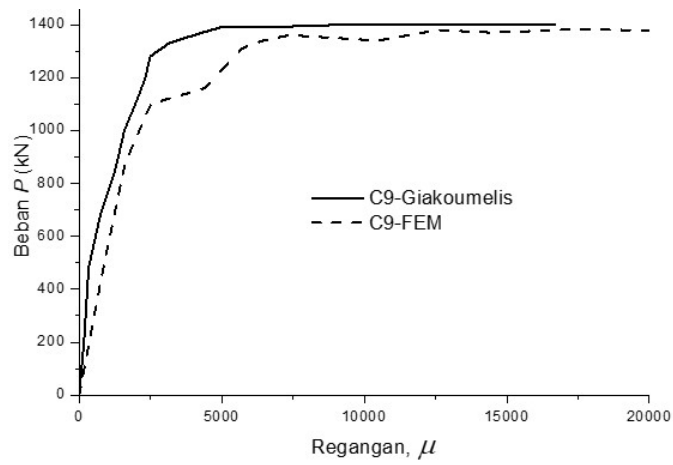


Gambar 9. Kurva beban-lendutan kolom

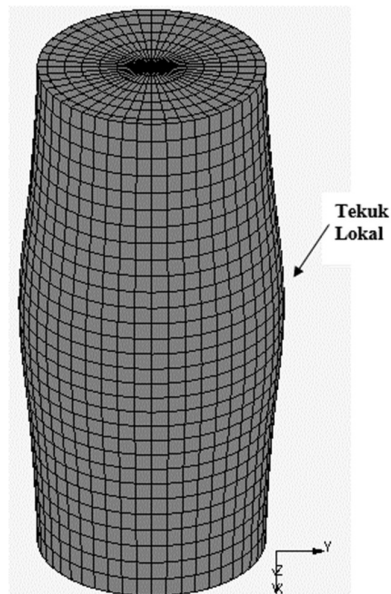
Respon Beban-Regangan

Gambar 10 menunjukkan perbandingan beban-regangan antara hasil pengujian eksperimen dan hasil yang diperoleh dari analisis elemen hingga. Regangan ini diukur pada lendutan aksial kolom mencapai maksimum sekitar 27 mm. Pada eksperimen regangan maksimum terjadi pada regangan

15000 μ . Hasil elemen hingga menunjukkan regangan maksimum melebihi 15000 μ . Perbedaan regangan maksimum ini terjadi kemungkinan regangan hasil eksperimen tidak terbaca setelah mencapai 15000 μ . Pada daerah elastik terlihat bahwa hasil regangan eksperimen sama dengan hasil elemen hingga.



Gambar 10. Kurva beban-regangan kolom



Gambar 11. Bentuk akhir kolom

Bentuk Balok Akhir Analisis

Kolom tabung baja diisi beton hasil analisis dapat dilihat pada Gambar 11. Dari gambar terlihat bahwa terjadi tekuk lokal / *local buckling* tepat di tengah bentang. Tekuk lokal ini yang membuat beban yang awalnya beban naik setelah itu beban konstan. Pemodelan elemen hingga terbukti mampu untuk memodelkan tekuk lokal. Pada daerah tumpuan terlihat kolom

tidak ada pergerakan, hal ini membuktikan bahwa kolom sesuai dengan kondisi eksperimen dimana kolom tidak bergerak ke arah horisontal ataupun vertikal. Pada ujung pembebanan, pemodelan tutup baja dengan *rbe element* berhasil. Hal ini terlihat bahwa ujung kolom tidak bergerak horisontal dan vertikal seperti pada ujung tumpuan.

KESIMPULAN

Analisis elemen hingga digunakan *software* MSC Marc/Mentat membandingkan benda uji kolom tabung baja diisi beton. Kesimpulan umum dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Model elemen hingga yang diusulkan divalidasi dengan pengujian kolom tabung baja diisi eksperimen didapatkan bentuk kurva beban-lendutan yang hampir sama.
2. Hasil perhitungan beban tekan ultimit berdasarkan AIJ didapatkan hasil lebih kecil daripada hasil beban tekan ultimit eksperimen ataupun analisis elemen hingga
3. Model elemen hingga juga menghasilkan bentuk kurva beban-regangan yang hampir sama dengan kurva hasil eksperimen.
4. Model elemen hingga ini dapat digunakan untuk memodelkan kolom eksperimen sehingga dapat terlihat tekuk lokal / *local buckling* yang terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

ACI-318R (2014) 'Building code requirements for structural concrete and commentary', in. American Concrete Institute.

- Ahmad, S., Kumar, A. and Kumar, K. (2020) 'Axial performance of GGBFS concrete filled steel tubes', in *Structures*. Elsevier, pp. 539–550.
- AIJ (1997) 'Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures'. Architectural Institute of Japan.
- AISC360-16 (2016) 'Specification for structural steel buildings', *American Institute of Steel Construction*.
- Chansawat, K. *et al.* (2009) 'FE models of GFRP and CFRP strengthening of reinforced concrete beams', *Advances in Civil Engineering*. Hindawi, 2009.
- Chinese Code, D. L. T. (1999) 'Chinese design code for steel-concrete composite structures. DL/T 5085-1999'. Chinese Electricity Press, Beijing, China.
- Ding, J. M., Wu, H. L. and Zhao, X. (2014) 'Current situation and discussion of structural design for super high-rise buildings above 250 m in China', *Journal of Building Structures*, 35(3), pp. 1–7.
- Eurocode, E. (2004) '4: Design of Composite Steel and Concrete Structures Part 1-2: General Rules–Structural Fire Design', *British Standards Institution, BS EN*, pp. 1–2.
- Giakoumelis, G. and Lam, D. (2004) 'Axial capacity of circular concrete-filled tube columns', *Journal of Constructional Steel Research*. Elsevier, 60(7), pp. 1049–1068.
- Hasan, H. G., Ekmekyapar, T. and Shehab, B. A. (2019) 'Mechanical performances of stiffened and reinforced concrete-filled steel tubes under axial compression', *Marine Structures*. Elsevier, 65, pp. 417–432.
- Lelović, S., Vasović, D. and Stojić, D. (2019) 'Determination of the Mohr-Coulomb Material Parameters for Concrete under Indirect Tensile Test', *Tehnički vjesnik. Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu; Fakultet elektrotehnike, računarstva ...*, 26(2), pp. 412–419.
- Morino, S. and Tsuda, K. (2003) 'Design and construction of concrete-filled steel tube column system in Japan', *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, 4(1), pp. 51–73.

- Morino, S., Uchikoshi, M. and Yamaguchi, I.
(2001) 'Concrete-filled steel tube column
system-its advantages', *International
Journal of Steel Structures*, 1(1), pp. 33–44.
- MSC (2010) 'Volume B: Element Library', *MSC.
Software Corporation*, pp. 113–661.
- MSC (2012) 'MSC', *Software Corporation, Santa
Ana, CA*.