

## Pengaruh Model Analisa Elemen Hingga dan Sifat Material Terhadap Perilaku Struktural Tabung Baja Persegi diisi Beton

Mahmud Kori Effendi<sup>1\*</sup>

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta<sup>1</sup>

Koresponden\*, Email: [kori.effendi@uii.ac.id](mailto:kori.effendi@uii.ac.id)

Info Artikel		Abstract
Diajukan	04 Maret 2019	<i>The composite material steel tubes filled with concrete (concrete filled steel tubes, CFST) are becoming widely recommended in modern structural projects. This material is made of steel tubes filled with concrete. This CFST structure has better ductility than the conventional structure. Three-dimensional finite element analysis of CFST beam is performed by using both the nonlinear material properties of steel and concrete and by nonlinear geometry properties of beam. The contact analysis between tip loading and the beam is also considered. The results of the finite element analysis are then compared with experimental results of square steel tubes filled with concrete. The load-deflection and the collapse of the analysis results show similar to the experimental results. However, buckling phenomena cannot be modelled in the finite element analysis. The effect of half and a quarter beam model are studied and the results of the analysis similar to the results of full-scale analysis. The comparison between linear material properties and non-linear material properties are also studied. The linear material analysis result shows a linear response of load-deflection relationship and no collapse mode occurred in the mid span.</i>
Diperbaiki	03 September 2020	
Disetujui	02 Desember 2020	

*Keywords: steel tubes filled with concrete, finite element, half models, a quarter of a model.*

**Abstrak**  
Material komposit tabung baja diisi dengan beton (*concrete filled steel tubes, CFST*) menjadi banyak direkomendasikan dalam proyek struktural modern. Bahan ini terbuat dari tabung baja yang diisi dengan beton. Struktur CFST ini memiliki daktilitas yang lebih baik daripada struktur konvensional. Analisis elemen hingga tiga dimensi balok CFST dilakukan dengan menggunakan sifat material nonlinear baja dan beton dan juga sifat geometri nonlinear balok. Kontak analisis antara ujung beban dan balok juga dipertimbangkan. Hasil analisis elemen hingga kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen balok tabung baja persegi yang diisi dengan beton. Beban-lendutan dan keruntuhan hasil analisis menunjukkan hasil yang mirip dengan eksperimen. Namun, fenomena tekuk tidak dapat dimodelkan dalam analisis elemen hingga. Efek model seperempat penampang dan atau setengah bentang dipelajari dan hasil analisisnya mirip dengan hasil analisis skala penuh. Perbandingan antara sifat material linear dan sifat material non-linear juga dipelajari. Hasil analisis material linier menunjukkan respons linear dari hubungan beban-lendutan dan tidak ada mode kehancuran yang terjadi di rentang tengah.

Kata kunci: tabung baja diisi dengan beton, elemen hingga, setengah model, seperempat model.

### 1. Pendahuluan

Material komposit tabung baja diisi dengan beton atau *concrete filled steel tube* (CFST) menjadi populer dan banyak direkomendasikan dalam proyek struktural modern. Material ini memiliki daktilitas yang lebih baik daripada material struktur konvensional lainnya seperti baja dan beton bertulang [1], [3]. Beberapa percobaan telah dilakukan untuk menguji perilaku lentur balok CFT [4], [6].

C.-C. Hou dkk melakukan serangkaian percobaan pada balok CFST akibat lentur murni untuk memeriksa ketidakstabilan geometris [7]. Hasil percobaan membuktikan bahwa pengisian beton meningkatkan kekuatan lentur dan daktilitas struktural. Pengisian beton pada tabung baja dapat

mencegah tekuk lokal dalam tabung baja dengan rasio  $d/t$  mulai dari 74 hingga 110.

M. Elchalakani dkk melakukan analisis elemen hingga balok tabung baja silinder yang diisi dengan beton yang mengalami lentur murni hingga analisis plastik dengan beban statik [8]. Model plastisitas *concrete damaged plasticity model* digunakan untuk beton. Selain itu, model plastisitas Von-Mises elasto-plastis dengan *strain hardening* digunakan untuk baja. Beberapa peneliti telah melakukan analisis elemen hingga tiga dimensi tabung baja diisi beton dengan menggunakan ANSYS [9], [11] dan ABAQUS [12], [13]. Model elemen hingga tiga dimensi juga digunakan untuk memprediksi tegangan residu yang disebabkan mesin [14].

Analisis elemen hingga tiga dimensi dilakukan dengan menggunakan MSC Software [15], software ini belum banyak digunakan oleh peneliti untuk menganalisis balok tabung baja persegi diisi beton. Model material beton dan baja dimodelkan dengan material nonlinear. Geometri nonlinear balok dilakukan dengan analisis *large displacement*. Hasil analisis elemen hingga tiga dimensi kemudian diverifikasi terhadap hasil eksperimen dari [16]. Karena simetri, model setengah dan seperempat juga dianalisis. Perbandingan antara model elemen tiga dimensi skala penuh, setengah bentang dan setengah penampang-setengah bentang kemudian dibandingkan. Pada beberapa kasus penyederhanaan analisis dilakukan. Analisis menggunakan sifat material linear biasanya digunakan. Model elemen hingga skala penuh dengan menggunakan sifat material linier dan nonlinier juga dibandingkan.

## 2. Eksperimen

Satu spesimen benda uji telah diuji untuk memverifikasi model elemen hingga yang diusulkan. Detail spesimen dalam eksperimental telah ditunjukkan pada **Tabel 1**.

### Material Beton dan Baja

Spesimen uji tabung baja persegi diisi beton, Sfs ( $B/t = 33.2$ ), telah diuji di Departemen Arsitektur, *Kyushu University* [16]. Bentuk penampang tabung baja persegi beserta panjang spesimen dan posisi pembebanan yang dianalisis dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 1**. Tegangan leleh tabung persegi adalah  $366 \text{ N/mm}^2$  dan rasio Poisson,  $\nu$  adalah 0,3. Tegangan tekan beton adalah  $71,5 \text{ N/mm}^2$  dan rasio Poisson,  $\nu$  adalah 0,2. Tabel 1 merangkum sifat material baja dan beton.

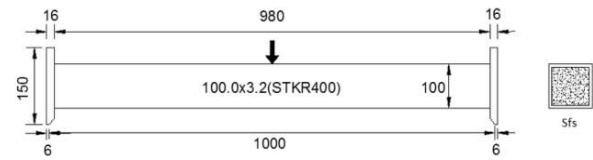
**Tabel 1.** Material properties.

Tabung Baja			Beton		
$sB$	$t$	$f_y$	$E_s$	$\sigma_B$	$E_c$
(mm)	(mm)	( $\text{N/mm}^2$ )	( $\text{N/mm}^2$ )	( $\text{N/mm}^2$ )	( $\text{N/mm}^2$ )
100.0	3.0	366	189000	71.5	39760

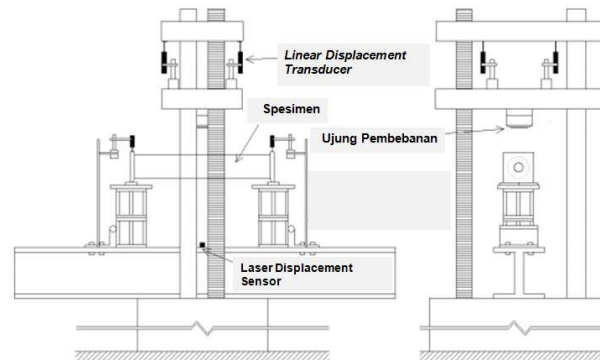
### Uji Eksperimental

Pengaturan uji eksperimental untuk pembebanan statik diilustrasikan pada **Gambar 2**. Tumpuan adalah sendi-rol di masing-masing kedua ujungnya. Tumpuan roller adalah pelat baja ujung hanya dilumasi gemuk di antara pelat baja ujung bawah spesimen dan alas pengujian yang dibuat oleh baja berbentuk H, sehingga ujung spesimen dapat bergerak bebas.

Dua *displacement transducer* dipasang untuk mengukur perpindahan beban dan *laser displacement sensor* ditempatkan di bagian bawah tengah bentang spesimen untuk mengukur lendutan global.



**Gambar 1.** Gambar Spesimen Benda Uji (dalam mm)



**Gambar 2.** Pengaturan Uji Eksperimental

## 3. Analisis Elemen Hingga

Dalam studi ini, perangkat lunak komersial, MSC Marc (2012) digunakan sebagai alat analisis struktur balok. MSC Mentat digunakan untuk membuat *mesh*, menetapkan material dan geometri, menetapkan kondisi batas dan pembebanan. Analisis elemen hingga dapat mensimulasikan secara akurat respons struktur jika model digunakan dengan benar. Validitas analisis elemen hingga dengan membandingkan dengan hasil eksperimen. Prosedur iteratif Newton-Raphson dipilih untuk menyelesaikan proses iterasi. Prosedur iteratif diakhiri ketika rasio konvergensi kurang dari kriteria toleransi, baik pengecekan gaya dan atau pengecekan lendutan.

### Parameter Beton dan Baja

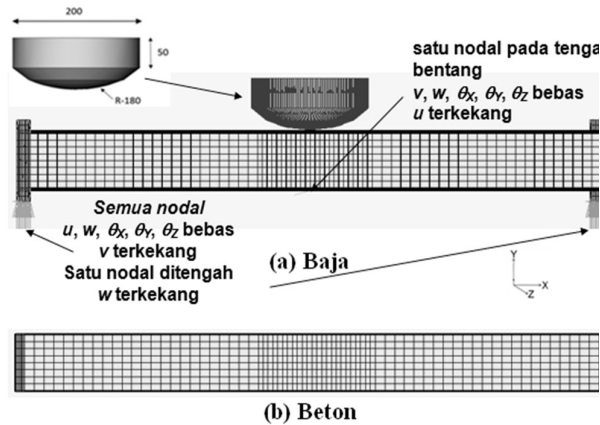
MSC Marc membutuhkan input tegangan dan regangan untuk dimasukkan sebagai *true stress* dan *equivalent plastic strain* [17]. Model baja menggunakan kriteria plastisitas von Mises dan *kinematic hardening rule* sebagai aliran plastik. Kondisi. Beton pengisi disimulasikan dengan menerapkan kriteria hasil Mohr-Coulomb dikombinasikan dengan *isotropic hardening rule*. Input tegangan-regangan beton digunakan dari uji tekan beton dengan pendekatan multi-linier.

### Tipe Elemen, Kondisi Batas dan Segmentasi Mesh

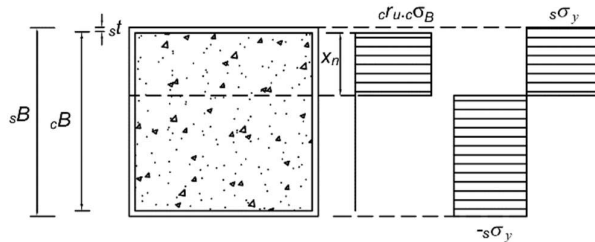
Tipe elemen solid heksahedral, delapan-nodal, isoparametrik, tiga derajat kebebasan per node ( $u$ ,  $v$  dan  $w$ ), (tipe elemen 7 dari MSC Marc, [18]), digunakan untuk model analitik tabung baja dan juga untuk beton.

Balok uji mempunyai tumpuan sendi-rol dengan beban lateral terkonsentrasi pada tengah bentang. Pada **Gambar 3**, semua node pada kedua tumpuan dikekang ke arah sumbu Y ( $v$  terkekang) dan satu nodal di tengah-tengahnya dikekang dalam arah sumbu Z ( $z$  terkekang) untuk menstabilkan analisis. Derajat kebebasan yang tersisa ditetapkan untuk bebas.

Perpindahan satu nodal di bagian bawah penampang tengah bentang dibatasi ke arah sumbu X ( $u$  terkekang), sedangkan derajat kebebasan yang lain ditetapkan bebas. Ujung pembebanan beban lateral ke tabung baja tersusun dari geometri bukan elemen hingga. Perpindahan vertikal ujung beban dilakukan dengan metode kontrol perpindahan. Sehubungan dengan ujung balok, pelat baja dipasang dan digunakan elemen shell dengan sifat material elastik.



**Gambar 3.** Model Elemen Hingga



**Gambar 4.** Momen Ultimit

**Analisis Kontak**

Interaksi kontak diperhitungkan dalam analisis antara geometri ujung beban dan elemen balok tabung baja diisi beton. Toleransi kontak dari geometri dan elemen didefinisikan antara plus dan minus 0,1 mm. Pemodelan antara elemen beton dan elemen baja dimodelkan dengan kontak analisis. Kontak analisis dilakukan dengan *direct constraint procedure*.

**4. Momen Ultimit**

Nilai teoritis dari momen ultimit tabung baja diisi beton,  $M_u$ , didasarkan pada Rekomendasi oleh AIJ [19], di mana distribusi tegangan diasumsikan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4**. Sumbu netral,  $x_n$ , adalah diperoleh dengan mengatur jumlah gaya aksial ultimit, Persamaan (1), sama dengan nol. Kemudian,  $M_u$  dapat dihitung dari Persamaan (2). Kontribusi tabung baja dan beton dalam perhitungan gaya aksial utama ditentukan oleh Persamaan (3) dan Persamaan (5), berturut-turut. Kontribusi tabung baja dan beton pada momen ultimit ditentukan oleh Persamaan (4) dan Persamaan (6), berturut-turut.

$$N_u = {}_c N_u + {}_s N = 0 \tag{1}$$

$$M_u = {}_c M_u + {}_s M = 0 \tag{2}$$

$${}_c N_u = x_n \cdot {}_c B \cdot r_U \cdot {}_c \sigma_B \tag{3}$$

$${}_c M_u = \frac{1}{2} ({}_c B - x_n) x_n \cdot {}_c B \cdot r_U \cdot {}_c \sigma_B \tag{4}$$

$${}_s N_u = 2(2x_n - {}_c B) {}_s t \cdot {}_s \sigma_y \tag{5}$$

$${}_s M_u = ({}_s B - {}_s t) {}_s B + 2({}_c B - x_n) x_n {}_s t \cdot {}_s \sigma_y \tag{6}$$

dimana:

- $N_u$  adalah beban aksial ultimit total,
- $M_u$  adalah momen lentur ultimit total,
- ${}_c N_u$  adalah beban aksial ultimit beton,
- ${}_s N_u$  adalah beban aksial ultimit tabung baja,
- ${}_c M_u$  adalah momen lentur ultimit beton,
- ${}_s M_u$  adalah momen lentur ultimit tabung baja,
- $B$  adalah panjang/lebar luar tabung baja,
- $r_U=1$  adalah faktor redukti untuk kekuatan beton,
- ${}_c B$  adalah panjang/lebar bagian beton,
- $t$  adalah tebal tabung baja,
- $x_n$  adalah posisi sumbu netral,
- ${}_s \sigma_y$  adalah tegangan leleh tabung baja,
- ${}_c \sigma_B$  adalah kekuatan standar perancangan beton isi.

**5. Hasil dan Pembahasan**

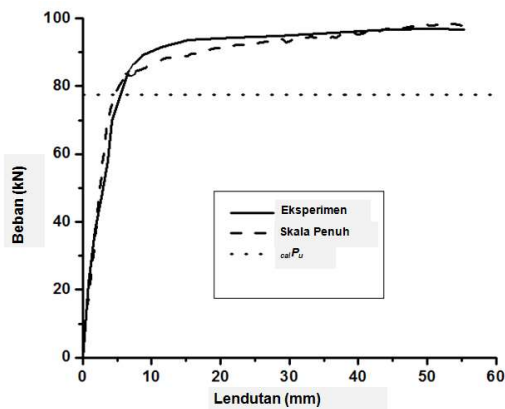
**Perbandingan Kurva Beban-Lendutan dan Mode Keruntuhan antara Analisis Elemen Hingga dan Eksperimen**

Lendutan diukur pada sisi bawah tengah bentang balok dimana lendutan lokal yang terjadi akibat kontak antara tabung baja diisi beton dengan ujung beban. Pada **Gambar 5**, dapat dilihat bahwa kurva beban-lendutan dari analisis elemen hingga skala penuh mempunyai kecenderungan yang hampir sama dengan hasil percobaan.

Beban ultimit hasil perhitungan memakai momen ultimit rekomendasi AIJ [19] pada Persamaan (1) ditunjukkan pada **Gambar 5** dengan garis titik putus-putus. Hasil beban ultimit hasil eksperimen lebih besar daripada beban hasil rekomendasi AIJ,  $calP_u$ , dimana nilainya adalah

Secara umum, analisis elemen hingga dapat dikatakan berhasil untuk memprediksi beban ultimit dan respons plastis spesimen eksperimen.

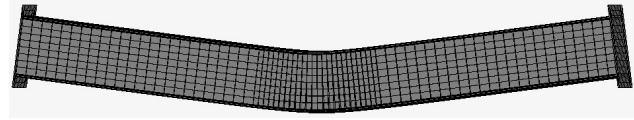
**Gambar 6** menunjukkan mode keruntuhan spesimen Sfs yang dihasilkan dari analisis elemen hingga dengan model skala penuh dibandingkan dengan mode keruntuhan dari eksperimen. Mode keruntuhan hampir mirip dengan hasil eksperimen. Hasil percobaan terdapat tekuk lokal di sekitar pertemuan balok dan ujung beban, namun, dalam analisis elemen hingga tidak menunjukkan fenomena ini. Model elemen hingga pada analisis tidak berhasil memodelkan fenomena tekuk lokal ini.



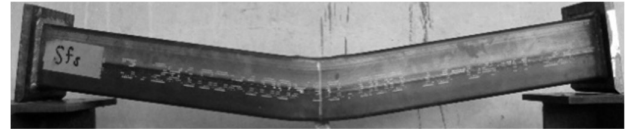
**Gambar 5.** Perbandingan Kurva Beban-Lendutan antara Analisis Elemen Hingga Skala Penuh dan Eksperimen

#### Perbandingan Beban-Lendutan dan Mode Perkecil dari analisis FEM Mempertimbangkan Model FEM

Dalam menganalisis model elemen hingga skala penuh, dibutuhkan waktu yang sangat lama. Proses analisis numerik membutuhkan iterasi yang panjang untuk menghasilkan hasil yang konvergen. Penyederhanaan model elemen hingga diperlukan agar waktu analisis menjadi lebih cepat dan hasil yang diperoleh juga akurat. Pada **Gambar 7**, model balok setengah bentang (S1) dan model balok setengah penampang-setengah bentang (S2) juga dianalisis dalam penelitian ini. Dalam model S1, kondisi batas hampir sama dengan model skala penuh kecuali semua nodal pada bidang tengah bentang tidak bergerak ke arah sumbu  $x$  ( $u$  terkekang). Untuk model S2, kondisi batas hampir sama dengan model S1 kecuali semua nodal pada bidang setengah penampang tidak bergerak ke arah sumbu  $z$  ( $w$  terkekang).

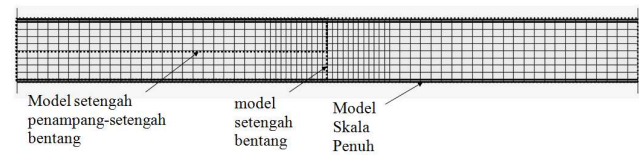


(a) Analisis Elemen Hingga

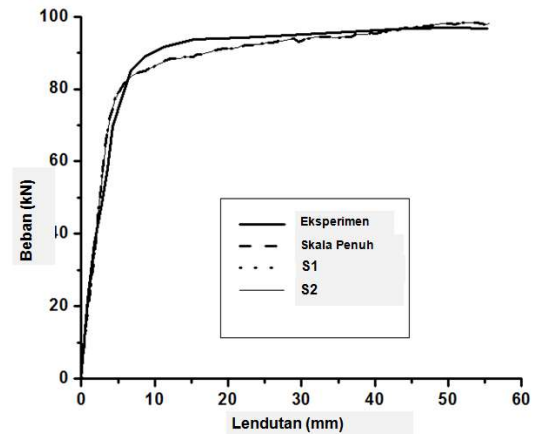


(b) Eksperimen

**Gambar 6.** Perbandingan Mode Keruntuhan antara Analisis Elemen Hingga dan Eksperimen



**Gambar 7.** Model elemen hingga S1 dan S2



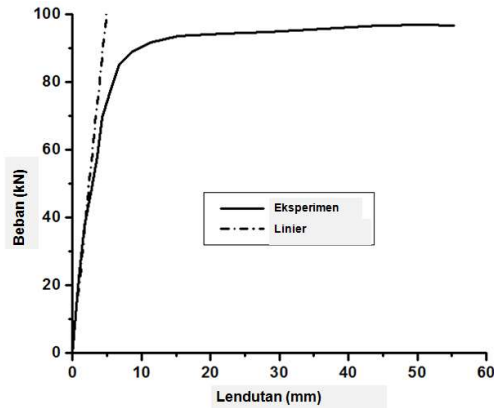
**Gambar 8.** Kurva Beban-Lendutan S1, S2 dan skala Penuh

Perbandingan kurva beban-lendutan yang dihasilkan dari analisis dengan penyederhanaan model S1 dan S2 dapat dilihat pada **Gambar 8**. Hasil perbandingan antara skala penuh, model S1 dan juga model S2 menghasilkan bentuk kurva yang sama persis. Hasil menunjukkan bahwa model setengah penampang-setengah bentang balok tabung baja persegi diisi beton bisa digunakan sebagai pengganti model skala penuh.

#### Parameter Studi Material Beton dan Baja

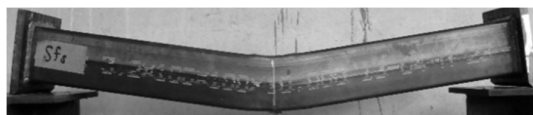
Penggunaan baik material beton dan material baja dengan pendekatan material linier diimplementasikan dalam analisis struktur dan desain elemen bangunan struktural. Pengaruh

bahan linear pada perilaku lentur spesimen Sfs dipelajari. *Meshing*, kondisi batas dan kondisi pembebanana sama seperti analisis sebelumnya. Satu-satunya perbedaan adalah sifat material linier.

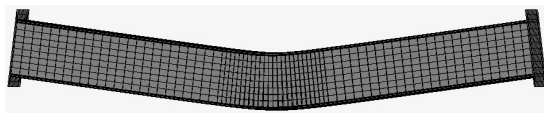


**Gambar 9.** Perbandingan Beban-Lendutan Antara Balok Eksperimen dengan Analisis Elemen Hingga Properti Material Linier dan Nonlinier

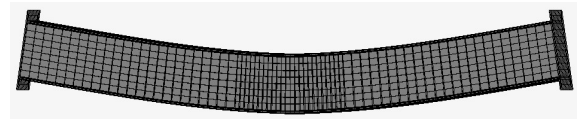
Berdasarkan **Gambar 9**, kurva beban-lendutan yang dihasilkan dari analisis elemen hingga dengan bahan linier yang dipotong pada beban 100 kN dan beban itu tidak sama dengan beban hasil eksperimen. Beban naik secara linier dengan semakin besar lendutan. Perbandingan mode keruntuhan Sfs dengan bahan linier dan dengan bahan nonlinier dan juga hasil eksperimen ditunjukkan pada **Gambar 10**. **Gambar 10 (b)** menunjukkan bahwa mode keruntuhan dihasilkan dari bahan nonlinier terdapat tanda terjadi deformasi plastis dalam tengah bentang balok seperti pada hasil eskperimen, **Gambar 10 (a)**, namun dari **Gambar 10 (c)** yang merupakan analisis elemen hingga dengan sifat-sifat material linier tidak terjadi deformasi plastis pada tengah bentang balok. Balok menunjukkan deformasi berbentuk melengkung.



(a) Eksperimen



(b) Material Nonlinier



(c) Material Linier

**Gambar 10.** Perbandingan Mode Keruntuhan Antara Balok Eksperimen dengan Analisis Elemen Hingga Properti Material Linier dan Nonlinier

## 6. Kesimpulan

Dari hasil analisis dan pembahasan balok tabung baja persegi diisi beton maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Model analisis elemen hingga tiga dimensi dapat menganalisis secara akurat eksperimen balok tabung baja persegi diisi beton
2. Hasil kurva beban-lendutan dari analitik elemen hingga skala penuh dapat dianggap selaras dengan kurva hasil eksperimen.
3. Mode runtuhnya spesimen analisis elemen hingga skala penuh dan hasil eksperimen hampir identik tetapi hasil elemen hingga tidak terdapat tekuk lokal di sekitar pertemuan balok dan ujung pembebanan.
4. Berdasarkan analisis elemen hingga dengan sifat material nonlinier dan sifat geometri balok nonlinier, dapat dilihat bahwa kurva beban-lendutan nonlinier dan mode keruntuhan menunjukkan deformasi plastis di bagian tengah bentang balok.
5. Penyederhanaan model analisis elemen hingga dengan model setengah bentang dan juga hasil dari setengah penampang-setengah bentang menunjukkan hasil yang serupa.
6. Berdasarkan analisis elemen hingga dengan sifat material linier dan sifat geometri balok nonlinear, dapat dilihat bahwa kurva beban-lendutan linier dan mode runtuh menunjukkan bentuk melengkung tanpa tanda deformasi plastis di bagian tengah spesimen.

## Daftar Pustaka

- [1] Y. Zhang, C. Xu, and X. Lu, "Experimental study of hysteretic behaviour for concrete-filled square thin-walled steel tubular columns," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 63, no. 3, pp. 317–325, 2007.
- [2] Y.-C. Tang, L.-J. Li, W.-X. Feng, F. Liu, and B. Liao, "Seismic performance of recycled aggregate concrete-filled steel tube columns," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 133, pp. 112–124, 2017.
- [3] X.-S. Shi, Q.-Y. Wang, X.-L. Zhao, and F. G. Collins, "Structural behaviour of geopolymeric recycled concrete filled steel tubular columns under axial loading," *Constr. Build. Mater.*, vol. 81, pp. 187–197, 2015.
- [4] J. Cai, J. Pan, and Y. Wu, "Performance of steel-reinforced square concrete-filled steel hollow section (SRSCFSS) columns under uniaxial compression," *Adv. Steel Constr.*, vol. 12, no. 4, pp. 410–427, 2016.

- [5] Y.-F. An, L.-H. Han, and C. Roeder, "Flexural performance of concrete-encased concrete-filled steel tubes," *Mag. Concr. Res.*, vol. 66, no. 5, pp. 249–267, 2014.
- [6] G. Li, D. Liu, Z. Yang, and C. Zhang, "Flexural behavior of high strength concrete filled high strength square steel tube," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 128, pp. 732–744, 2017.
- [7] C.-C. Hou, L.-H. Han, Q.-L. Wang, and C. Hou, "Flexural behavior of circular concrete filled steel tubes (CFST) under sustained load and chloride corrosion," *Thin-Walled Struct.*, vol. 107, pp. 182–196, 2016.
- [8] M. Elchalakani, X.-L. Zhao, and R. H. Grzebieta, "Concrete-filled circular steel tubes subjected to pure bending," *J. Constr. steel Res.*, vol. 57, no. 11, pp. 1141–1168, 2001.
- [9] F. K. Idan, "Finite element analysis of concrete-filled aluminum tube columns," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 12, no. 12, pp. 3054–3062, 2017.
- [10] S. Arivalagan and S. Kandasamy, "Finite element analysis on the flexural behaviour of concrete filled steel tube beams," *J. Theor. Appl. Mech.*, vol. 48, pp. 505–516, 2010.
- [11] Z. Ting, C. Zhihua, and L. Hongbo, "Nonlinear finite element analysis of concrete-filled steel tubular column," in *2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)*, 2011, pp. 2396–2399.
- [12] P. K. Gupta and H. Singh, "Numerical study of confinement in short concrete filled steel tube columns," *Lat. Am. J. Solids Struct.*, vol. 11, no. 8, pp. 1445–1462, 2014.
- [13] M. H. Mollazadeh and Y. C. Wang, "New insights into the mechanism of load introduction into concrete-filled steel tubular column through shear connection," *Eng. Struct.*, vol. 75, pp. 139–151, 2014.
- [14] C. KUMAR, "3D finite element model to predict machining induced residual stresses using arbitrary lagrangian eulerian approach," *J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 2, pp. 309–320, 2018.
- [15] M. S. C. Marc and M. S. C. M. U. M. Version, "MSC," *Softw. Corp. St. Ana, CA*, 2004.
- [16] M. K. EFFENDI, H. KAWAGUCHI, K. MINAMI, and A. KAWANO, "An Analytical Study on Effect of Loading Tip Shapes on Flexural Behavior of Vacant and Concrete-filled Steel Tubular Members Subjected to Concentrated Transverse Loads," *Kou kouzou rombunshuu*, vol. 22, no. 86, pp. 86\_33-86\_45, 2015.
- [17] M. S. C. Marc, "Volume A: Theory and user information," *MSC. Softw. Corp.*, 2010.
- [18] M. S. C. Marc, "Volume B: Element Library," *MSC. Softw. Corp.*, pp. 113–661, 2010.
- [19] Architectural Institute of Japan (AIJ), "Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures." Architectural Institute of Japan Japan, 1997.